

MANTENIMIENTO

Planeación, ejecución y control

Alberto Mora Gutiérrez



Edición:

Luis Javier Buitrago D.

Diseño y diagramación:

Milena Buenaventura Valencia

Corrección:

Gonzalo de Jesús Franco

Producción:

Alfonso Arias Ortiz

Datos cataográficos

Mora, Luis

Mantenimiento. Planeación, ejecución y control

Primera Edición

Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México

ISBN: 978-958-682-769-0

Formato: 21 x 24 cm

Páginas: 528

Mantenimiento. Planeación, ejecución y control

Luis Alberto Mora Gutiérrez

Derechos reservados © Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México.

Primera edición: Alfaomega Grupo Editor, México, septiembre 2009

© 2009 Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

Pitágoras 1139, Col. Del Valle, 03100, México D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana

Registro No. 2317

Pág. Web: <http://www.alfaomega.com.mx>

E-mail: atencionalcliente@alfaomega.com.mx

ISBN: 978-958-682-769-0

Derechos reservados:

Esta obra es propiedad intelectual de su autor y los derechos de publicación en lengua española han sido legalmente transferidos al editor. Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del propietario de los derechos del copyright.

Nota importante:

La información contenida en esta obra tiene un fin exclusivamente didáctico y, por lo tanto, no está previsto su aprovechamiento a nivel profesional o industrial. Las indicaciones técnicas y programas incluidos, han sido elaborados con gran cuidado por el autor y reproducidos bajo estrictas normas de control. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V. no será jurídicamente responsable por: errores u omisiones; daños y perjuicios que se pudieran atribuir al uso de la información comprendida en este libro, ni por la utilización indebida que pudiera dársele.

Edición autorizada para venta en todo el mundo.

Impreso en México. Printed in Mexico.

Empresas del grupo:

México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. – Pitágoras 1139, Col. Del Valle, México, D.F. – C.P. 03100.

Tel.: (52-55) 5089-7740 – Fax: (52-55) 5575-2420 / 2490. Sin costo: 01-800-020-4396

E-mail: atencionalcliente@alfaomega.com.mx

Colombia: Alfaomega Colombiana S.A. – Carrera 15 No. 64 A 29 – PBX (57-1) 2100122, Bogotá, Colombia,

Fax: (57-1) 6068648 – E-mail: sciente@alfaomega.com.co

Chile: Alfaomega Grupo Editor, S.A. – General del Canto 370-Providencia, Santiago, Chile

Tel.: (56-2) 235-4248 – Fax: (56-2) 235-5786 – E-mail: agechile@alfaomega.cl

Argentina: Alfaomega Grupo Editor Argentino, S.A. – Paraguay 1307 P.B. “11”, Buenos Aires, Argentina,

C.P. 1057 – Tel.: (54-11) 4811-7183 / 8352, E-mail: ventas@alfaomegaeditor.com.ar

*Dedicado a mi esposa Martha Cecilia y a mis hijos Valery, Felipe y Jennifer;
por su apoyo durante la realización de este libro*



MENSAJE DEL EDITOR

Los conocimientos son esenciales en el desempeño profesional. Sin ellos es imposible lograr las habilidades para competir laboralmente. La universidad o las instituciones de formación para el trabajo ofrecen la oportunidad de adquirir conocimientos que serán aprovechados más adelante en beneficio propio y de la sociedad. El avance de la ciencia y de la técnica hace necesario actualizar continuamente esos conocimientos. Cuando se toma la decisión de embarcarse en una vida profesional, se adquiere un compromiso de por vida: mantenerse al día en los conocimientos del área u oficio que se ha decidido desempeñar.

Alfaomega tiene por misión ofrecerles a estudiantes y profesionales conocimientos actualizados dentro de lineamientos pedagógicos que faciliten su utilización y permitan desarrollar las competencias requeridas para una profesión determinada. Alfaomega espera ser su compañera profesional en este viaje de por vida por el mundo del conocimiento.

Alfaomega hace uso de los medios impresos tradicionales en combinación con las tecnologías de la información y las comunicaciones (IT) para facilitar el aprendizaje. Libros como éste tienen su complemento en una página Web, en donde el alumno y su profesor encontrarán materiales adicionales, información actualizada, pruebas (*test*) de autoevaluación, diapositivas y vínculos con otros sitios Web relacionados.

Esta obra contiene numerosos gráficos, cuadros y otros recursos para despertar el interés del estudiante, y facilitarle la comprensión y apropiación del conocimiento.

Cada capítulo se desarrolla con argumentos presentados en forma sencilla y estructurada claramente hacia los objetivos y metas propuestas. Cada capítulo concluye con diversas actividades pedagógicas para asegurar la asimilación del conocimiento y su extensión y actualización futuras.

Los libros de Alfaomega están diseñados para ser utilizados dentro de los procesos de enseñanza-aprendizaje, y pueden ser usados como textos guía en diversos cursos o como apoyo para reforzar el desarrollo profesional.

Alfaomega espera contribuir así a la formación y el desarrollo de profesionales exitosos para beneficio de la sociedad.



EL AUTOR

Luis Alberto Mora Gutiérrez es Ingeniero en Ciencias Mecánicas, Univ. Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. Tiene Diplomatura –Experticia en Alta Gerencia, INCE, Puerto Ordaz, Venezuela. Diplomatura –Experticia en Electrónica, INCE, Valencia, Venezuela. Estudios de Maestría iniciados en Administración de Negocios, Univ. Carabobo, Valencia. Es Magíster en Administración de Empresas, Univ. Eafit, Medellín. Tiene Especialización en Mercadeo, Univ. Eafit, Medellín, Colombia. Especialización en Gestión Empresarial, Univ. Politécnica de Valencia, Valencia, España. Suficiencia Investigadora Doctoral, Univ. Politécnica de Valencia, España, Es Ph.D. en Ingeniería Industrial, Énfasis y Tesis *Cum Laude* en Prospectiva, Logística e Ingeniería Mantenimiento, Univ. Politécnica de Valencia, España.

Ha trabajado para empresas mexicanas, venezolanas, colombianas y ecuatorianas, tales como: Industrias Alimenticias Noel, Galletas, dulces, alimentos y conservas, Jefe Mantenimiento Seccional. Industrias Alimenticias Lara Carabobo, Inlaca –Lácteos, jugos y conservas, Subdirector nacional de Ingeniería de Mantenimiento y Proyectos. Pasteurizadora Guayana, Inlaca –Lácteos, quesos, jugos, bebidas y conservas. Gerente general. Industrias Alimenticias del Yocoima, Inlayosa hoy Parmalat, Jugos, lácteos, quesos y afines, Upata.

Gaseosas Postobón, Lux y Pepsi-Cola, Alimentos, bebidas y gaseosas, gerente general. Llorede Grasas, División Plásticos, gerente de División. ADM Limitada, Alimentos y plásticos, gerente general. Coldi Limitada, Gestora y Operadora internacional de Mantenimiento & Pronósticos, gerente general. Univ. Eafit, Medellín, profesor, jefe de la carrera y el Departamento de Ingeniería Mecánica, jefe de PET (prácticas profesionales). Coordinador de la Especialización en Mantenimiento Industrial, director del grupo GEMI, grupo de estudios e investigación en Mantenimiento Industrial. Profesor Investigador en pregrado y postgrado. Asesor y Consultor Empresarial. Colmasu S.A., Empresa Multinacional Andina, Asesorías en Mantenimiento Industrial, director Técnico y Facilitador Proyectos Mayores, Compañía Logística de Inventarios, Pronósticos e Ingeniería de Mantenimiento y de Fábricas, Coldi Ltda.

Tiene experiencias relevantes en mantenimiento, producción, pronósticos, inventarios, estudios de manejo de materiales, producción y repuestos, porque ha trabajado para: Abracol, Aciem, Aciem Atlántico, Acoltex, Aerolíneas Aces, Alico, Arclad S.A., Arrendamientos El Trébol, Ayurá Motors, Bavaria Sab Miller, Y C.C.N. Grupo Bavaria Sab Miller Camacol, Campaña Gobernador Departamento Atlántico Prospectivo Eduardo Verano, Barranquilla, Cantel S.A., Cemex, Censa, Centrales Eléctricas, Cúcuta, C.I. Agrícolas Unidas, Cice, Quito, Clapam, Clínica Imbanaco, Cocier, Cohan, Colcerámica S. A., GS1, Colchones Spring S.A., Bogotá, Colmasu S.A. Mineros de Antioquia, Coltabaco S.A., Comercialización & Mercadeo, Bogotá, Comunidad Europea, España. Confecoop, .Corelca S.A. E.S.P. Cryogas, Deloitte & Touche, Ecopetrol-Oxy, Deloitte and Touche, Eduardoño, El Cerrejón, EEPPM, Emma, Imusa, Empresa de Energía Bogotá. Enersafe S.A., Fabricato, Feria de Ganados de Medellín, FFAAC, IAC, Fuerzas Armadas Navales, Fuerza Naval Arc, Fuerza Aérea, Fenavi, Avícola, FFAAE, Guayaquil, Funcice, Grupo Empresarial Gamma, La Habana, Cuba. Grupo Colcerámica, Grupo Crystal, Tintorería Cristal S.A., Grupo Haceb, GS1 Guatemala, Honduras, Santo Domingo. Hospital Federico Lleras

Acosta, Hospital Pablo Tobón Uribe, IAC GS1, Incametal S.A., Ingeniería Especializada Blandón, IEB, Sector Eléctrico, Interservicios C.T.A., Integral S.A. & U. Eafit, Ipce, ISA S.A. E.S.P., LCM, ISA, Isagen, Laboratorios Bitar, Laumayer Internacional. Consultores Asociados S.A., Leche Carabobo, Leche Inlayosa, Parmalat, Lemahn Brothers, USA. Luker S.A. & U. Eafit, Lloreda Grasas S.A., Lonja de Propiedad Raíz de Medellín, Masa, Mind de Colombia –Software Forecast Pro Xe: Municipio La Estrella, Municipio de Rionegro, Nacional de Chocolates, Nestlé, Noel, New Stetic, Partido Conservador, Partido Liberal, Dpto. Atlántico, Pastelitos S.A., Pasteurizadora Guayana, Peldar S.A., Owens Illinois, Postobón S.A., Premac, Productos Familia Sancela S.A., Publicar S.A., Medellín, Servicios Empresariales, SESO, SESO, Cuba. Grupo Industrial Vidrio Cemento, Cuba. Siemens S.A., Bogotá, Sociedad Portuaria Regional Cartagena, Sofasa, Renault, Toyota, Solla S.A. Surenting, Transelca S.A. E.S.P., UNE, Electricidad Generación, Cuba. Univ. de Antioquia, Univ. de Medellín, Univ. Ricardo Palma, Perú. Univ. del Valle de México, México. Univ. Autónoma de Manizales, Univ. Autónoma de Cali, Univ. Pontificia Bolivariana, Univ. de Carabobo, Univ. Politécnica de Catalunya, España. Univ. Federico Santamaría, Chile. Univ. Industrial de Santander, Univ. Tecnológica de Bolívar, Univ. de Ibagué, V-Factory Inc., WIN Software y Asociados.

Ha sido asesor, consultor, facilitador, desarrollador, conferencista, profesor universitario, en prospectiva, pronósticos, métodos futurísticos, inteligencia de mercados, estadística, gestión empresarial y mantenimiento industrial, en países como Ecuador, Perú, Colombia, Chile, México, Costa Rica, Honduras, República Dominicana, Panamá, Guatemala, Nicaragua, Puerto Rico, España, Estados Unidos. Entre sus Ha escrito los libros *Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios*, *Mantenimiento estratégico empresarial*, *Pronósticos de demanda e Inventarios*, *Mantenimiento industrial*, etc.

CONTENIDO

Mensaje del Editor	V
El Autor	VII
Contenido página Web.....	XVII
Código Web	XVIII
Prólogo	XIX

PRIMERA PARTE

EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO Y LA PRODUCCIÓN..... 1

Introducción	2

CAPÍTULO 1

Evolución del mantenimiento 3

1.1 Historia de hechos relevantes que inciden en el mantenimiento vigente	4
1.1.1 La ingeniería y las tareas de mantenimiento, OIT.....	5
1.1.2 Historia sucinta de hechos de la ingeniería mecánica asociados a mantenimiento	6
1.1.3 Historia	6
1.1.4 Diferentes culturas.....	6
1.1.5 Renacimiento	7
1.1.6 Revolución Industrial	7
1.1.7 Motores y máquinas de vapor	8
1.1.8 Motor de combustión interna.....	8
1.1.9 Aviación	9
1.1.10 Era espacial	10
1.1.11 Época actual.....	11

CAPÍTULO 2

Enfoques recientes de mantenimiento y de producción 13

2.1 Enfoque hacia las acciones de mantenimiento, etapas I y II.....	13
2.2 Enfoque hacia la organización táctica de mantenimiento, etapa III	15
2.3 Enfoque integral logístico de creación de una estrategia de mantenimiento, etapa IV.....	16
2.4 Enfoque hacia las habilidades y competencias de mantenimiento, etapa V	17
2.5 Enfoque hacia la gestión de activos, etapa VI	18
2.5.1 Activos y pasivos	18
2.5.2 De gestión de pasivos a gestión de activos.....	20

2.5.3	La terotecnología.....	22
2.6	La evolución organizacional y estructural de mantenimiento.....	26
2.7	Importancia económica y tecnológica de mantenimiento.....	30
2.8	Definiciones y significados.....	35
2.9	Gestión y mantenimiento.....	36
2.10	Función y objetivo de mantenimiento	38
RESUMEN		39
PREGUNTAS, DESARROLLOS, FOROS Y EJERCICIOS		40

SEGUNDA PARTE

ENFOQUE SISTÉMICO E INTEGRAL -CMD 41

Introducción	42

CAPÍTULO 3

Sistema kantiano de mantenimiento 45

3.1	Unidad de producción.....	47
3.2	Unidad de mantenimiento.....	48
3.3	Sistema integral de mantenimiento.....	50
3.3.1	Categorización del mantenimiento	52
3.3.2	Cuerpo y función de los equipos. Efectos del espacio y del tiempo.....	54
3.3	Niveles del mantenimiento	56
3.4	Estructura, relaciones y elementos	58
3.4.1	Relaciones.....	58
3.4.2	Interacción - CMD.....	62
3.4.3	Métodos de predicción CMD.....	62

CAPÍTULO 4

Disponibilidad 67

4.1	Modelo universal para pronosticar CMD	71
4.1.1	Diferentes disponibilidades de mayor uso empresarial.....	77

CAPÍTULO 5

Confiabilidad - Mantenibilidad CMD - Estimación de $F(t_f)$ y $M(t_f)$ 95

5.1	Confiabilidad - fallas	95
5.2	Probabilidad	96
5.3	Desempeño satisfactorio	96
5.4	Período	96
5.5	Condiciones de operación.....	97
5.6	Curva de confiabilidad	97
5.7	Ejemplo de cálculo y obtención de curva de confiabilidad	98
5.8	Mantenibilidad – Reparaciones	104
5.9	Curva de la bañera o de Davies	106
5.10	Curva de mantenibilidad.....	109

5.11	Estimación de no confiabilidad - $F(t)$ y de mantenibilidad - $M(t)$	114
5.12	Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad y de la mantenibilidad	120
5.13	Recomendaciones y mejores prácticas con los métodos de estimación de $F(t)$ y $M(t)$	135
	RESUMEN	137
	PREGUNTAS, DESARROLLOS, FOROS Y EJERCICIOS	137

TERCERA PARTE

PARÁMETROS Y DISTRIBUCIONES - CMD 139

Introducción	140

CAPÍTULO 6

Estimación de parámetros - Weibull - LogNormal y Normal 141

6.1	Método gráfico de papel de Weibull o Allen-Plait	142
6.2	Fundamentos de la distribución de Weibull	142
6.3	Curvas características de Weibull	143
6.4	Lectura de los parámetros η y β en el papel de Weibull	148

CAPÍTULO 7

Uso del método de regresión lineal con mínimos cuadrados para alinear la función de probabilidad de fallas 157

7.1	Criterios de calidad de la alineación	159
7.1.1	Ajuste	159
7.1.2	Error típico o variación o error estándar del estimado	159
7.1.3	Coefficiente de determinación muestral r^2 y ajustado	160
7.1.4	Coefficiente de correlación	161

CAPÍTULO 8

Transformaciones en Weibull, LogNormal y Normal, para obtener parámetros por regresión 163

8.1	Distribución de Weibull	163
8.1.1	Parámetros de vida útil y de reparaciones en Weibull	164
8.2	Distribución Normal	169
8.2.1	Parámetros de vida útil y de reparaciones en Normal	170
8.3	Distribución LogNormal	175
8.4	Distribución exponencial	183
8.5	Distribución Gamma	184

CAPÍTULO 9

Método de máxima verosimilitud, MLE 195

9.1	Método de máxima verosimilitud - MLE	195

CAPÍTULO 10

Pruebas de bondad de ajuste - Goodness of Fit 201

10.1	Kolmogórov-Smirnov	201
10.2	Anderson-Darling	203
10.3	Ji ² - Chi cuadrado	205

CAPÍTULO 11

Estimaciones de sistemas o equipos en serie y paralelo	207
11.1 Estructura en serie	208
11.2 Estructura en paralelo o redundante activa.....	210
11.3 Estructura en <i>StanDby</i>	211
11.4 Estructura mixta	211
RESUMEN	216
PREGUNTAS, DESARROLLOS, FOROS Y EJERCICIOS	216

CUARTA PARTE

APLICACIONES CMD - ESTRATEGIAS Y ACCIONES 219

Introducción	220

CAPÍTULO 12

Desarrollo de ejercicio integral CMD	221

CAPÍTULO 13

Comportamiento futuro - Nuevos cálculos	233

CAPÍTULO 14

Estrategias y acciones derivadas del CMD - Análisis de confiabilidad - Beta	237
14.1 Análisis de la confiabilidad influenciada por reparaciones futuras estimadas de corto plazo	237
14.2 Análisis de la confiabilidad influenciada por los mantenimientos planeados futuros estimados de corto plazo	238
14.3 Análisis de la función de mantenibilidad influenciada por las reparaciones TTR estimadas en el corto plazo	241
14.4 Análisis de la mantenibilidad influenciada por las tareas proactivas planeadas estimadas en el corto plazo	242
14.5 Recomendaciones estratégicas de acciones y táctica para el ejercicio integral de A_0	244

CAPÍTULO 15

Análisis histórico, presente y futuro cercano de parámetros del ejercicio integral	245
15.1 Estrategias y acciones futuras	245
15.2 Pronósticos de indicadores CMD de corto plazo	249
15.2.1 Pronósticos con series temporales	249
15.2.2 Clases de métodos futurísticos, según el tiempo por evaluar	250
15.2.3 Modelos AR.I.MA - Metodología de Box-Jenkins	254
15.2.4 Características de los AR.I.MA	255
15.2.5 Descripción de los modelos AR.I.MA (Modernos)	255

15.2.6 Metodología de Box-Jenkins	256
15.2.7 En confiabilidad	261

CAPÍTULO 16

Diferentes niveles de cálculo para el CMD. Fases 263

16.1 Distribución de Hastings de dos fases	264
16.2 Distribución de Hjorth de tres fases	265

RESUMEN	266

PREGUNTAS, DESARROLLOS, FOROS Y EJERCICIOS	267

QUINTA PARTE

NIVEL INSTRUMENTAL 269

Introducción	270

CAPÍTULO 17

Fundamentos del nivel instrumental 271

17.1 Niveles instrumentales	271
17.2 Tácticas	272

CAPÍTULO 18

Instrumentos básicos - Factores productivos de mantenimiento - Nivel instrumental 275

18.1 Sistema de información	276
18.2 Recursos humanos. Talento	278
18.3 Herramientas, repuestos e insumos	279
18.4 Capital de trabajo, espacio físico, tecnología, maquinaria, recursos naturales, poder de negociación, recursos humanos, carga laboral, planeación	280
18.5 Mantenimiento: función de producción	280
18.5.1 Función macroeconómica de la producción	281
18.5.2 Cantidad de servicios (o de productos), servicios promedio y productividad	281
18.6 ¿Cuál es la cantidad óptima por usar en un factor productivo?	283
18.7 Parámetros de manejo cuando se utiliza más de un factor productivo	284
18.8 Factores productivos modernos (para mantenimiento y producción)	287

CAPÍTULO 19

Instrumentos avanzados genéricos de mantenimiento, Nivel instrumental 293

19.1 Instrumentos avanzados genéricos	293
19.2 Mejoramiento continuo	303
19.3 Herramientas estadísticas	305
19.4 Diagnóstico, control y rediseño de procesos de mantenimiento y producción	306
19.4.1 Obtención y manejo de los datos	310
19.4.2 Análisis y diagramas de Pareto	311
19.4.3 Diagramas causa-efecto	312
19.4.4 Histograma	314

19.4.5 Distribuciones.....	315
19.5 Diagramas de dispersión, correlación y regresión lineal.....	317
19.5.1 Gráficas de control.....	319
19.5.2 Tamaños muestrales de la población para medias. Números aleatorios	321
19.5.3 Otras herramientas estadísticas	325

CAPÍTULO 20

Instrumentos avanzados específicos de mantenimiento, Nivel instrumental	327
20.1 Análisis de fallas - FMECA, RCFA y RPN.....	327
20.2 Metodología de análisis de fallas	330
20.2.1 RCFA	338
20.3 Procedimiento FMECA-RPN	343
20.4 Valoración cualitativa del riesgo	359
20.5 Gestión y manejo de inventarios, repuestos e insumos de mantenimiento	361
20.6 Clasificación ABC.....	362
20.7 Costos.....	363
20.7.1 Costos de pedir al proveedor o fabricar	364
20.7.2 Costos de sostener.....	364
20.7.3 Costos de agotar	364
20.7.4 Nivel de servicio.....	364
20.8 Denominación Push o Pull ⁶	371
20.8.1 Push.....	371
20.8.2 Pull	379
20.9 Subcontratación	390
20.10 Métodos de diagnóstico rápido y confiable en mantenimiento	394
20.10.1 Flash Audit	395
20.11 Método de diagnóstico jerárquico analítico de componentes principales - Eigen Vector	397
20.11.1 Desarrollo.....	398

CAPÍTULO 21

Instrumentos avanzados específicos técnicos, en mantenimiento.....	405
21.1 Instrumentos avanzados técnicos específicos	405
21.1.1 Inspección visual, acústica y al tacto de componentes	405
21.1.2 Vigilancia de temperaturas.....	406
21.1.3 Control de la corrosión.....	406
21.1.4 Resistencia eléctrica.....	406
21.1.5 Lubricación, engrase y aceites.....	406
21.1.6 Monitoreo de causas y efectos eléctricos	407
21.1.7 Termografía infrarroja	407
21.1.8 Análisis de vibraciones	408
21.1.9 Ferrografía. Análisis de lubricantes. Análisis espectrométrico. Cromatografía.....	409
21.1.10 Líquidos penetrantes	409
21.1.11 Ensayo de pulverizado de partículas magnéticas.....	410
21.1.12 Ultrasonido	410
21.1.13 Ensayos y controles no destructivos	410
21.1.14 Control de ruido	411

21.1.15 Filtros magnéticos	412
21.1.16 Corrientes inducidas.....	412
21.2 Técnicas de control y monitoreo de condición de estado.....	413
RESUMEN	415
PREGUNTAS, DESARROLLOS, FOROS Y EJERCICIOS.....	415

SEXTA PARTE

NIVELES ESTRATÉGICOS, TÁCTICO Y OPERACIONAL..... 423

Introducción	424

CAPÍTULO 22

Nivel operativo 425

22.1 Acciones correctivas	426
22.2 Acciones modificativas	427
22.3 Acciones preventivas	428
22.4 Acciones predictivas	433

CAPÍTULO 23

Nivel táctico.....437

23.1 Nivel táctico.....	437
23.2 Implicaciones de las diferentes clases de tácticas de mantenimiento.....	438
23.2.1 TPM, mantenimiento productivo total.....	439
23.2.2 Pilares del TPM	441
23.2.3 Mantenimiento combinado TPM y RCM.....	450
23.2.4 Mantenimiento proactivo	451
23.4 Decisiones conjuntas o múltiples sobre tácticas	458
23.4.1 Mantenimiento reactivo.....	459
23.4.2 Mantenimiento orientado a resultados.....	459
23.4.3 Mantenimiento de clase mundial (<i>World Class Maintenance, WCM</i>).....	460
23.4.4 Mantenimiento centrado en habilidades y competencias (<i>Core Competences Maintenance</i>)	463
23.5 Otras tácticas	464
23.5.1 Propia.....	464

CAPÍTULO 24

Nivel estratégico, costos e índices.....465

24.1 Índices internacionales.....	465
24.2 Costos	466
24.2.1 Costos fijos.....	467
24.2.2 Costos variables.....	467
24.2.3 Costos financieros	468
24.2.4 Costos de la no disponibilidad por fallas	468
24.3 Indicadores.....	469

24.3.1 Indicadores para la alta dirección. Estratégicos 469

24.3.2 Indicadores operativos..... 470

24.4 Terotecnología, LCC 471

24.4.1 Costo de ciclo de vida (LCC) 471

24.5 Gestión de activos..... 474

RESUMEN 474

PREGUNTAS, DESARROLLOS, FOROS Y EJERCICIOS..... 475

BIBLIOGRAFÍA..... 477

ÍNDICE..... 493

CONTENIDO PÁGINA WEB

Estimación de parámetros para distribución Gamma y método de máxima verosimilitud, MLE.....	190
Estimación de parámetros mediante Método de Máxima Verosimilitud con Weibull de A_1	196
Estimación de parámetros mediante método de máxima verosimilitud de A_1	196
Estimación de parámetros mediante Método de Máxima Verosimilitud de A_1	197
Estimación de parámetros mediante Método de Máxima Verosimilitud de A_1	198
Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste.....	199
Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste.....	206
Estimación de Parámetros para Distribución Gamma y Método de Máxima Verosimilitud MLE.....	218
Estimación de parámetros mediante Método de Máxima Verosimilitud de AI de Weibull con MLE.....	218
Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste.....	218
Cálculo de Pronósticos Clásicos de series temporales	260
Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste.....	268
Power Point – Presentación de Sistemas Visuales – 5S	299
Power Point - Presentación de Sistemas visuales - 5S	303
Distribución Normal Z y probabilidades	317
Determinación de tamaño muestral para medias	323
Distribución Normal Z y probabilidades	325
Casos reales de Análisis de Fallas	338
Programa - Casos reales de Análisis de Fallas	338
Aplicación de RCFA	343
Organizador Excel FMECA	359
Organizador Excel FMECA	361
Relación de severidad ocurrencia detección FMECA	361
Distribución Normal Z y probabilidades	375
Cálculos Asignación & EOQ Push	378
Inventarios automáticos de 10.000 referencias Push o en Pull.....	390
Cantidades Pull	390
Inventarios automáticos de 10.000 referencias Push o en Pull.....	390

CÓDIGO WEB

Para tener acceso al material de la página Web de apoyo del libro *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*:

1. Ir a la página
<http://virtual.alfaomega.com.mx>
2. Registrarse como usuario del sitio.
3. Ingresar al apartado de inscripción de libros y registrar la siguiente clave de acceso:

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the user to enter a registration key.

4. Para navegar en la plataforma virtual de recursos del libro, usar los nombres de Usuario y Contraseña definidos en el punto número dos.

PRÓLOGO

Es importante encontrar un trabajo tan serio, estructurado y bien presentado que aborda diferentes temáticas de mantenimiento, producción y calidad en forma simultánea, con fundamentos teóricos simples de muy buena profundidad y fáciles de implementar en las empresas.

La presentación de un libro siempre es una tarea que implica compromisos. Unas veces con el autor. Otras con la ciencia, entendida ésta en un sentido amplio y no ajeno a planteamientos éticos vitales. El compromiso con el autor nos llevaría a elaborar un texto laudatorio, en el que se enumeraran las excelencias humanas y profesionales del mismo. Y, tal vez, el compromiso con la ciencia nos llevaría a realizar una crítica, prolija y no siempre favorable, de los contenidos de la obra. El conflicto estaría entonces servido. Por fortuna, en este caso ese conflicto no existe, pues la buena calidad, la actualidad, la profundidad y la practicidad de la obra se corresponden con la buena calidad humana, con lo cual ciencia y amistad pueden ir de la mano.

En este libro, el autor, el profesor y amigo, el Dr. Luis Alberto Mora, aúna dos facetas de gran importancia para un consultor empresarial y académico del área de las ingenierías, en la que hace años se lleva desempeñando brillantemente. Esas dos facetas son la sólida formación técnico-científica y la experiencia profesional en el que muchas veces, desde la academia, llamamos “mundo real”. Y logra construir un puente muy sólido de fácil acceso en ambas direcciones, entre estos dos mundos tan aislados, como son la industria y la academia.

Un investigador, docente y experto consultor en el campo de las ingenierías nunca debiera estar falto de estas dos facetas, pues la carencia de cualquiera de ellas hará que sus experiencias y enseñanzas queden sin rigor y aplicabilidad, comprometiéndose la utilidad que los empresarios, los industriales, los ingenieros, los alumnos y los futuros técnicos de las empresas vayan a obtener de ellas.

En el texto se abordan varios temas de importancia clave para muchas empresas de servicios e industriales, y que han generado una auténtica revolución en los últimos años. En el mar de siglas y abreviaturas que, por infortunio e inevitablemente, inunda el mundo de la calidad, del mantenimiento, de la producción y su entorno, se han abierto paso con una singladura firme varios conceptos, como los del RCM¹, el TPM², la confiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad, los inventarios de repuestos, el PMO³, el CMD⁴ y algún otro, que suponen en parte el triunfo del paradigma de la Calidad Total en el ámbito del mantenimiento. Estos y otros temas se presentan y analizan con suficiencia y practicidad científica y empresarial, junto con otros planteamientos más clásicos, pero de vigencia incuestionable.

1. RCM, Reliability Centered Maintenance - Mantenimiento centrado en la confiabilidad, MCC

2. TPM, Total Productive Maintenance - Manejo y mantenimiento productivo total.

3. PMO, Planned Maintenance Optimization - Optimización del mantenimiento plomeado.

4. CMD, Confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad - RAM, Reliability, Availability, Maintenance.

Pero, en el nuevo enfoque presentado, se debe enfatizar sobre cómo se deben abordar las estrategias de la ingeniería de mantenimiento, bajo un enfoque sistémico estructurado, de una manera muy coherente y con aplicaciones extremadamente exitosas en diferentes regiones del mundo.

El autor no olvida el tener presentes las consideraciones económicas, dedicando una parte interesante al tema de los costes asociados al mantenimiento y al LCC, cuyo cálculo y valoración nunca pueden obviar los técnicos del área, porque los temas de costes son definitivamente los que nos harán optar por reparar o por sustituir un equipo, según las circunstancias. Por consiguiente, los lectores de este libro lograrán aprender a plantear nuevos modos, entender integralmente formas más sistémicas y específicas concretas de abordar el tema del mantenimiento, tanto como a manejarse con comodidad y aplicabilidad en entornos más tradicionales. En ambos casos, la información y la formación presentes en la obra hacen su lectura altamente recomendable para los profesionales del área, o para los estudiosos del tema.

Atentamente,

Andrés Carrión García

Ph.D. en Ingeniería Industrial

Director del Departamento de Estadística, Confiabilidad e Investigación Operativa
Universidad Politécnica de Valencia (UPV), España



INTRODUCCIÓN

Este libro se fundamenta en un nuevo enfoque sistémico kantiano que permite entender, manejar y controlar un sistema de mantenimiento y producción, bajo los más modernos y rigurosos conceptos científicos y prácticos encontrados a través de muchos años de experiencia y de estudio del autor, en varios continentes. Está diseñado de tal modo que todos los conceptos se manejan con el más puro tratamiento científico, con aplicaciones fáciles de entender y de llevar a cabo en las empresas. La estructura del libro se desarrolla en dos partes: La primera es de fundamentación, niveles, conceptos y reglas entre los elementos básicos de mantenimiento; esto incluye las partes primera a la cuarta. La segunda parte consta de los cuatro niveles de mantenimiento, así: Nivel instrumental, de la quinta parte. Y niveles operacional, táctico y estratégico de la sexta parte.

La aplicación de conceptos relevantes sobre la medición real de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad se desarrolla en forma seria y sencilla de entender. Y esto permite aplicarlos en las empresas. Se muestran los cálculos correctos que se deben realizar. Y, sobre todo, se describe su interpretación, de manera que se puedan tomar acciones estratégicas que permitan su mejoramiento continuo. Uno de los principales aportes consiste en definir las pautas para entender el mantenimiento como un sistema que posee niveles diferenciales con todos sus elementos, que tiene un lenguaje propio y específico, el cual permite una fácil comunicación entre los actores relevantes: mantenimiento, producción y máquinas.

En esta obra, la concepción integral y detallada del mantenimiento es un aporte relevante, porque permite el manejo y el dominio rápidos de todos los conceptos y las relaciones de unos con otros. A su vez, destaca la necesidad de enfocar el mantenimiento en forma simultánea desde cuatro niveles (instrumental, operativo, táctico y estratégico). En especial, definiendo los niveles superiores de CMD, LCC¹ y costos, con el fin de determinar los niveles inferiores que se manejan de abajo arriba (desde las herramientas hasta encontrar la táctica más ajustada a las necesidades particulares de las empresas de servicios o empresariales).

Se recalca la importancia de medir y controlar de una forma planeada todos los niveles y las acciones de mantenimiento, de manera simultánea, de abajo arriba (que es lo normal en las empresas), y de manera inversa que es lo novedoso de esta obra.

Es muy útil para llevar a la realidad los conceptos internacionales de mantenimiento, dada la diversidad de casos que se presentan, las ayudas en Excel y los ejercicios planteados en el libro y en el programa adjunto de la Web.

1 LCC, *Life Cycle Cost*, o Costo económico del ciclo de vida integral.

EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO Y LA PRODUCCIÓN

PRIMERA PARTE

OBJETIVOS

Manejar los diferentes modelos de parametrización, diferenciando las distintas opciones internacionales de distribuciones, susceptibles de utilizar, de tal forma que le permitan al lector hacer gala de los mejores sistemas de cálculo y predicción de las variables CMD futuras, mediante la selección de diferentes caminos y midiendo el grado de bondad de ajuste de los mismos, con el fin de lograr las mejores mediciones bajo modelos de fácil utilización y con las mejores prácticas internacionales en este campo –Nivel 3–. Aplicar –Escala de Bloom, Barret y Gagné (Gagné@, y otros, 2008).

INTRODUCCIÓN

La primera parte muestra los hechos relevantes que enmarcan la incidencia y el estado del arte actual de mantenimiento y producción, de tal forma que permita conocer sus antecedentes y, por ende, los hitos que señalan su actual estado de desarrollo y enfoque, para entregar los criterios relevantes y prioritarios que encierran el manejo, la gestión y la operación del mantenimiento industrial para toda persona que desee implementarlo con técnicas de última generación en su empresa o industria.

CONOCIMIENTOS PREVIOS REQUERIDOS DE LA PRIMERA PARTE

A quien desee abordar la lectura de esta primera parte, le basta que tenga alguna experiencia somera en el tema, o que en la actualidad profundice en el estudio de esta disciplina o materia en el nivel de pregrado o posgrado, o de formación técnica. Es importante que el lector tenga de antemano alguna experiencia real, mental o conceptual sobre el mantenimiento y la producción industrial, ya que el objetivo de éstos le permite profundizar en los conceptos y en el desarrollo histórico de ambas temáticas a través del tiempo, con el fin de estructurar su concepción integral básica sobre los temas de mantenimiento y producción en el ámbito de la industria.

CAPÍTULO 1

EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO

La principal función del mantenimiento es sostener la funcionalidad de los equipos y el buen estado de las máquinas a través del tiempo. Bajo esta premisa se puede entender la evolución del área de mantenimiento al atravesar las distintas épocas, acorde con las necesidades de sus clientes, que son todas aquellas dependencias o empresas de procesos o servicios, que generan bienes reales o intangibles mediante la utilización de estos activos para producirlos.

La historia del mantenimiento, como parte estructural de las empresas, data desde el momento mismo de la aparición de las máquinas¹ para la producción de bienes y servicios², inclusive desde cuando el hombre forma parte de la energía de dichos equipos.

Se reconoce la aparición de los primeros sistemas organizacionales de mantenimiento para sostener las máquinas desde principios del siglo XX, en los Estados Unidos, donde todas las soluciones a fallas y paradas imprevistas de equipos se solucionan vía mantenimiento correctivo (Newbrough y otros, 1982)³. El autor Junior Reed reconoce la similitud de conceptos, pero se remonta al siglo XVIII con las teorías de producción de David Ricardo, como el origen claro de los sistemas de mantenimiento (Reed, 1971; Ricardo, 1817).

El progreso del mantenimiento como área de estudio permite distinguir varias generaciones evolutivas, en relación con los diferentes objetivos que se observan en las áreas productivas o de manufactura (y en mantenimiento) a través del tiempo. El análisis se lleva a cabo en cada una de estas etapas, que muestran las empresas en función de sus metas de producción para ese momento. La clasificación generacional relaciona las áreas de mantenimiento y producción en términos de evolución.



La principal función del mantenimiento es sostener la funcionalidad de los equipos y el buen estado de las máquinas a través del tiempo.

La historia del mantenimiento, como parte estructural de las empresas, data desde la aparición de las máquinas para la producción de bienes y servicios, inclusive desde cuando el hombre forma parte de la energía de dichos equipos.

1 La función de mantenimiento parece originarse con la era de la industrialización con la aparición de los equipos organizados para producir.

2 Desde mediados del siglo XVIII en la era de la industrialización, en Inglaterra, con las teorías de David Ricardo.

3 Newbrough y otros, 1982.

1.1 HISTORIA DE HECHOS RELEVANTES QUE INCIDEN EN EL MANTENIMIENTO VIGENTE

El mantenimiento⁴ es el sustantivo correspondiente al verbo mantener. La función concreta de mantenimiento es sostener la funcionalidad y el cuerpo de un objeto o aparato productivo para que cumpla su función de producir bienes o servicios. Estos aparatos no son más que los objetos que genera la ingeniería en sus diferentes versiones. Por ejemplo, la ingeniería mecánica con sus máquinas, la ingeniería civil con edificaciones, puentes, carreteras, instalaciones físicas; la ingeniería eléctrica con sus sistemas de generación o transmisión eléctrica; la ingeniería electrónica con sus sistemas y aparatos electrónicos, etc.

En cada rama de la ingeniería cambian los objetos que se han de cuidar para que funcionen correctamente, pero la función de mantener prima sobre la ingeniería en general, lo cual permite afirmar que el objeto que mejor reúne la función de producir otros bienes o servicios son las máquinas. Para tal efecto se hace una revisión histórica sucinta y concreta de la ingeniería mecánica, para describir los hechos antiguos y recientes, que inciden hoy en el mantenimiento. Se deja constancia de que por el hecho de describir situaciones anteriores de ingeniería mecánica, el mantenimiento no es exclusivo de esta rama de la ingeniería. De hecho la Organización Internacional del Trabajo (OIT) en el documento *Clasificación internacional uniforme de ocupaciones*, CIUO, emitido en 1988, define para la ingeniería en general, entre muchas otras, las funciones de construir, reparar y mantener objetos, producto de la ingeniería (OIT-CIUO-1988).

La fundamentación del ejercicio profesional de la ingeniería mecánica se basa en el diseño, la proyección, el funcionamiento, la conservación y la reparación (estas dos últimas tareas son propias de mantenimiento) de maquinaria, instalaciones, sistemas industriales, etc., tal como lo define la OIT mediante las tareas, funciones y actividades de todas las ingenierías reconocidas universalmente.

Este concepto de la ingeniería mecánica es ratificado en la definición de ingeniería "...conjunto de conocimientos por los que las propiedades de la materia y los recursos naturales de energía se hacen útiles al hombre mediante máquinas, estructuras, etc. ...". En particular el concepto de la rama mecánica, adjetivo relativo a la máquina o a la mecánica o realizado por una máquina (Grijalbo, 2000).

En algunos casos se encuentra la asignatura universitaria *Equipos industriales y mantenimiento* en programas de ingeniería industrial. Pero al respecto la OIT (OIT-CIUO-88) se pronuncia sobre las ingenierías no clasificadas dentro de las cuales aparecen: industrial, producción, textiles,



En cada rama de la ingeniería cambian los objetos que se han de cuidar para que funcionen correctamente, pero la función de mantener prima sobre la ingeniería en general.

⁴ Según la Real Academia Española, se define *mantenimiento* como "el conjunto de operaciones y cuidados necesarios para que instalaciones, edificios, industrias, etc., puedan seguir funcionando adecuadamente".

entre otras, donde describe que éstas sólo se dedican a: "...el desarrollo de procedimientos relativos a la eficiencia de la producción,... sobre tecnologías de... o procesos de fabricación...". Pero no enuncia la maquinaria como su objeto, de lo que hace o estudia. Sin embargo, la mayoría de productos o servicios derivados de las otras ingenierías son objetos, artefactos o aparatos que ayudan a producir otros bienes o servicios, lo cual los hace susceptibles de aplicarles mantenimiento.

1.1.1 La ingeniería y las tareas de mantenimiento, OIT

La ingeniería es clasificada en el subgrupo 2145 (62), dentro del segmento 214 arquitectos, ingenieros y afines, los cuales investigan, perfeccionan o desarrollan conceptos, teorías y métodos, o aplican los conocimientos de su especialización en campos como la ingeniería o la tecnología y otros, o en la determinación de la eficiencia económica de procesos de producción⁵.

La construcción aparece como un elemento estructural en el esquema que sugiere el autor Rey Sacristán, para comprender el marco del mantenimiento terotecnológico (Rodolfi, 2000; Husband, 1976; Darnell y otros, 1975 y Thompson, 1980), donde los usuarios⁶, los constructores, compradores y demás entidades o personas relacionadas con el cuerpo o con la función de equipos industriales son vitales en el diseño de esquemas de gestión de mantenimiento (Rey, 1996).

El mantenimiento y la reparación⁷ son partes esenciales del objeto de estudio de la especialización, entendiéndose la función de mantenimiento dependiente del ciclo de vida de las máquinas en sus tres etapas: mantenimiento, reparación o sustitución; y la función de reparación como una especie de mantenimiento especial en un estado de uso (o abuso) más avanzado del equipo; es decir, con una mantenibilidad⁸ más reducida (Ávila, 1992).

Las últimas tareas descritas (construir, mantener y reparar), enunciadas en el documento CIUO - 88, son empleadas en edificios, obras públicas, ciudades, zonas urbanas, otras obras propias de la ingeniería, o de la ingeniería mecánica y afines, y sus aplicaciones industriales, estructuras, instalaciones, máquinas y equipos, sistemas y en métodos de extracción de petróleo, gas natural y otros minerales. O agua, de separación de metales y de refinación y tratamiento; procesos mecánicos, químicos o de otra índole. También sirven para estudiar y asesorar acerca de los aspectos tecnológicos de determinados materiales, productos o procesos industriales, y para asuntos relacionados con la eficiencia de la producción y de la organización del trabajo

5 Se resalta la importancia de enunciar aspectos básicos de mantenimiento, como la ingeniería de fábricas, y la conservación de equipos.

6 Aprovisionamiento, operación, distribución son los departamentos internos: suministros, producción o comercialización de una empresa que son o pueden llegar a ser clientes del servicio del área de mantenimiento.

7 *Mantenimiento*, en esta obra, se refiere a las tareas de mantenimiento que se realizan antes de que ocurra la falla. John Moubrey las define como *tareas proactivas*.

8 *Mantenibilidad* se define como la probabilidad de que un equipo que ha estado trabajando y que ha sufrido cierto nivel de desgaste o de pérdida de funcionalidad, por desajuste, se pueda llevar a una condición especificada definida, dentro de un período de tiempo dado.



La historia de las máquinas, sus desarrollos, avances y retrocesos, está enmarcada por múltiples hechos que inciden en el mantenimiento industrial vigente y actual.

El desarrollo de los mecanismos y de las máquinas tiene su origen en dos vertientes: en *arqueología* que permite el estudio de los mecanismos desde la prehistoria, y en la *biología* que es un gran trabajo continuo de los seres vivos.

(Dounce, 1998). Así mismo, se pueden usar en preparar ponencias (MIT-C1UO-88) e informes científicos o técnicos. Sus tareas incluyen la supervisión de otros trabajadores.

1.1.2 Historia sucinta de hechos de la ingeniería mecánica asociados a mantenimiento

La historia de las máquinas, sus desarrollos, avances y retrocesos, está enmarcada por múltiples hechos que inciden en el mantenimiento industrial vigente y actual. Entre los hechos más relevantes se enuncian algunos que permiten entender el mantenimiento en nuestra época.

1.1.3 Historia

El desarrollo de los mecanismos y de las máquinas tiene su origen en dos vertientes: en la *arqueología* que permite el estudio histórico de los mecanismos que se usan desde la prehistoria⁹, y en la vertiente *biológica* que es un gran trabajo continuo de la naturaleza en los seres vivos, que analiza los complejos mecanismos biológicos de los animales y de las plantas, a través del tiempo (Bautista y otros, 2007). Desde la prehistoria el ser humano utiliza el sílex para la producción de sus máquinas, como cuchillos, martillos, hachas y demás instrumentos y utensilios; es decir, el sílex es aprovechado como una fuente de materia prima para sus instrumentos.

1.1.4 Diferentes culturas

Durante la efervescencia del mundo islámico en la Edad Media se dan las bases de lo que posteriormente ocurre en el Renacimiento, época en que se expande el concepto de la mentalidad creativa e innovadora en Italia, con su teatro y sus escenarios de máquinas, lo cual coincide con la publicación de los 21 libros sobre los ingenios y las máquinas¹⁰. Con la Revolución Industrial en Inglaterra, que se extendió a toda Europa, se consolida todo el desarrollo anterior que dio origen a una cultura que utiliza una máquina a su servicio (no al revés), con la secuencia de un vertiginoso crecimiento en la evolución y el desarrollo de las máquinas y mecanismos, desde lo más recóndito de la historia hasta lo actual de los siglos XIX, XX y XXI. En la cultura china sobresalen su gran progreso en la escritura, y en los medios tecnológicos para masificarla, en ocasiones superior a la que se alcanza en Europa en el siglo XV. Los chinos logran grandes avances en astronomía, biología, matemáticas, física e ingeniería y en los aparatos en que se apoyan para ese crecimiento (China, 2008).

⁹ Estos desarrollos probablemente abren el camino de progreso a las primeras civilizaciones organizadas y a la cultura grecorromana en Europa, y a la China, en Asia.

¹⁰ Que se atribuye a Juanelo Turriano, inventor, mecánico e ingeniero hidráulico italiano.

1.1.5 Renacimiento

Las máquinas adquieren gran difusión y avance en la era del Renacimiento¹¹ en la Europa Occidental. Queda atrás la decadencia cultural de la Edad Media, y sobresale el desarrollo de la tecnología con protagonistas, como: Galileo Galilei¹², Miguel Ángel, Leonardo da Vinci¹³, Francisco di Giorgio, Agostino Ramelli, Georgius Agricola, Isaac Newton, etc.¹⁴. Se dan grandes avances en la astronomía, la medicina, la invención de la pólvora, las armas bélicas, las embarcaciones, el Descubrimiento de América, y muchos más que contribuyen eficazmente a los desarrollos actuales de máquinas, mecanismos y equipos (Renacimiento, 2008).

Después del Renacimiento, el descubrimiento de nuevos territorios permite la expansión y la creación de colonias europeas, que encuentran nuevos minerales y materias primas para su explotación, lo cual implica el desarrollo urgente de nuevos mecanismos y máquinas que, a su vez, permiten un gran avance en la ingeniería mecánica. Con autores como Juanelo (Turriano, 2008), Pedro Juan de Lastanosa (García, 1990), Jerónimo de Ayans y Beaumont, Francisco Lobato, etc., que aportan en gran medida bases tecnológicas de ciertas aplicaciones empresariales en la futura Revolución Industrial de Inglaterra y otros territorios.

1.1.6 Revolución Industrial

Esta época acopia una gran cantidad de inventos, creaciones, bosquejos, mecanismos, máquinas, conocimientos, explicaciones, etc., para lograr un desenfrenado avance en la producción industrial. La creación de la máquina de vapor (Watt, 2008) pone un punto de quiebre en el desarrollo de la ingeniería. Y es cuando se logra aplicar el concepto según el cual las máquinas no requieren al hombre para funcionar, sino más bien que han de servirle a la humanidad para su bienestar y para mejorar su calidad de vida.

En esta época surge un gran desarrollo en la ingeniería textil, empiezan los primeros vestigios de sistemas de producción en grandes volúmenes. Inglaterra es el primer país en donde se implementan sistemas fabriles mecanizados y con algún grado de automatización, que permiten elaborar grandes cantidades de productos (Bautista y otros, 2007).

Los grandes avances tecnológicos que se dan en la Revolución Industrial, como la máquina de vapor, sirven de base para el sistema empresarial moderno que, desde los siglos XIX, XX y en el actual, aprovechan ese cúmulo de conocimientos y otros más



Con la Revolución Industrial en Inglaterra, que se extendió a toda Europa, se consolida todo el desarrollo anterior que dio origen a una cultura que utiliza una máquina a su servicio y no al revés.

11 Siglos XIV, XV y XVI.

12 Galileo descubre la ley del péndulo, trabaja en principios de hidrostática, enuncia algunos principios y leyes sobre la caída de los cuerpos.

13 Entre otros muchos desarrollos, logra grandes avances en acústica e ingeniería hidráulica (en Milán desde 1482 hasta 1497), hace importantes aportes a la industria militar.

14 La dinámica se apoya en algunas leyes del movimiento de Newton, con cuerpos con y sin aceleración.

recientes (como la masificación de la energía eléctrica) para constituir los sistemas productivos de la actualidad.

Con los grandes progresos y avances tecnológicos de las máquinas y los mecanismos en la Revolución Industrial, en el siglo XIX se logra independizar la ingeniería mecánica de las otras áreas de la ingeniería. Y con el advenimiento de los grandes progresos de la ingeniería en el siglo XX se consolidan aún más las especializaciones de la ingeniería.

1.1.7 Motores y máquinas de vapor

La máquina de vapor (Severy, 2008; Watt, 2008 y Barajas, 2003) revoluciona la industria metalúrgica en Inglaterra y luego en Francia, y la hace crecer en volúmenes y producciones en economías de escala, inimaginables para la época. La máquina de vapor permite el rápido crecimiento de los sistemas mundiales de transporte y la expansión de los mercados globales. Existen algunos inventos derivados de la máquina de vapor, como el martillo de vapor de los hermanos Scheider del Greuzot en 1841 y los hornos Siemens (Bautista y otros, 2007). Los primeros sistemas de transporte masivo, que usan la máquina de vapor, aparecen en el transporte fluvial (Barajas, 2003).

La fuerza motriz e industrial que se logra con los animales o el hombre, para los sistemas de fabricación, se sustituye vertiginosamente con la aparición de la máquina de vapor, el automóvil y los motores de combustión interna. En 1771, Joseph Cugnot construye un vehículo tractor metálico autopropulsado, a partir del cual diversos constructores e inventores logran avances significativos en la fabricación de automóviles (Automóvil, 2008).

1.1.8 Motor de combustión interna

Este invento genera cambios radicales en los sistemas empresariales y de transporte masivo de personas y carga industrial. Pese a que el holandés Christiaan Huygens¹⁵ diseña un motor de combustión en 1678, sólo hasta 1876 se consolida este invento, con August Otto (de origen alemán) que dio origen al motor de propulsión con gas. Más adelante, hacia 1887, Karl Benz y Gottlieb Daimler introducen eficaces automóviles de gasolina. Posteriormente la Peugeot se consolida como el primer fabricante masivo de automóviles en serie en 1891, mientras otros fabricantes como Benz en Europa y Olds en Estados Unidos empiezan a consolidar la fabricación masiva de automóviles, hacia 1900 (Motor, 2008).



La fuerza motriz e industrial que se logra con los animales o el hombre para los sistemas de fabricación, se sustituye vertiginosamente con la aparición de la máquina de vapor, el automóvil y los motores de combustión interna.

El invento del motor de combustión generó cambios radicales en los sistemas empresariales y de transporte masivo de personas y carga industrial y dio origen a la producción de automóviles en serie.

¹⁵ Christiaan Huygens, astrónomo, físico y matemático neerlandés, nacido en La Haya.

Entre 1913 y 1920, Hénry Ford se apuntala como un fabricante en masa de vehículos, con cadenas y sistemas organizados de producción y estandarización en sus partes y automóviles, al alcanzar volúmenes de producción de hasta dos millones de carros por año. Hacia 1920, Canadá y Estados Unidos son los artífices del 90% de la producción mundial de vehículos. Durante todo el siglo XX se expande la industria automotriz en todo el mundo, y junto con el petróleo se convierten en dos puntales de la economía mundial (Barajas, 2003).

Por otro lado, en el desarrollo de la industria automotriz es pertinente enunciar a Rudolph Diesel (de origen alemán), quien aporta el motor Diesel, base de la industria del transporte marítimo, fluvial, terrestre, etc., en sistemas de grandes volúmenes de carga pesada en muchos países del mundo (Otto, 2008 y Diesel, 2008).

1.1.9 Aviación

En estos últimos siglos la aviación también presenta avances interesantes. El monje inglés Roger Bacon, en el siglo XIII, descubre que igual que el agua soporta un barco, el aire podría soportar objetos. Posteriormente Leonardo da Vinci¹⁶ aporta algunos diseños que luego sirven de base para construir aeronaves. Los franceses Penaud, en 1871, y Victor Tatin construyen modelos que logran volar por períodos y trayectos cortos. En 1891, un aparato diseñado por Lawrence Hargrave vuela 95 metros. Pierpont Langley, en 1896, vuela con un aeroplano casi 1.200 metros.

Por fin, el 17 de diciembre de 1903, los hermanos Wright, de Estados Unidos, en la ciudad Kitty Hawk logran vuelos significativos que fueron la base para el posterior desarrollo vertiginoso de la aviación con sus modelos Flyer, Flyer II y Flyer III, que paulatinamente alcanzan progresos hasta durar más de media hora en vuelo, en una demostración que hacen en Francia en agosto de 1908 con su aeroplano de motor (Barajas, 2003).

La primera fábrica de aviones del mundo, de la que se tiene registro, es la de los hermanos Voisin en París. Uno de los aviones que se fabrican allí, el *Levavasseur Antoinette* (con un motor de vapor de 40 caballos), tripulado por el brasileño A. Santos D. en 1906 alcanza a recorrer 220 metros en 22,5 segundos. Otro avión de la fábrica de los Voisin, con el piloto Henri Farman, vuela más de dos minutos en 1907. En 1909, Orville (uno de los hermanos Wright) completa con un avión los requisitos de vuelo del Cuerpo de Señales del Ejército de los Estados Unidos, lo que constituye el primer aeroplano operativo con funciones militares.

El estadounidense Glenn Hammond Curtiss vuela un dirigible de Thomas Baldwin, en 1907, y cuatro años más tarde sirve de piloto al primer hidroavión. El francés Louis Blériot logra cruzar el canal de la Mancha, en un recorrido de aproximadamente 37 km, que realizó en unos 35 minutos. Earle Ovington realiza, en 1911, algunos vuelos en Estados Unidos con correo a bordo. Durante la Primera Guerra Mundial y en los



En estos últimos siglos la aviación presenta avances interesantes. El inglés Roger Bacon, en el siglo XIII, descubre que igual que el agua soporta un barco, el aire podría soportar objetos. Tal vez sea el primer paso hacia la aviación moderna.

16 Entre sus deducciones más notables se encuentran el tornillo aéreo o hélice y el paracaídas.

años sucesivos se construyen más aviones que en los últimos quince años. El primer vuelo transcontinental lo realiza Calbraith P. Rodgers en 1911. Y el primer trayecto aéreo transatlántico sin escalas se logra, en 1919, con los británicos John William Alcock y Arthur Whitten Brown. En 1927, el estadounidense Charles A. Lindbergh cruza en solitario el océano Atlántico (Hughes, 2008).

En 1944, los Estados Unidos alcanzan la cifra de 97.694 aviones producidos, y Alemania agrega dos nuevos aportes a la aviación mundial: motores de reacción para aviones y el primer proyectil volante. En general, durante la Segunda Guerra Mundial se logran importantes avances de todo género en la navegación aérea. Hacia 1986 la aviación logra el primer vuelo de una aeronave ligera alrededor del mundo sin escalas. En 1947 nacen la OACI y la IATA¹⁷ como entidades reguladoras del transporte aéreo mundial, ambas con sede en Montreal (Canadá) (OACI, 2008; IATA, 2008 y Barajas, 2003).



La navegación espacial contribuye de manera impresionante al desarrollo de la ingeniería, de los mecanismos, de las máquinas y de todos sus artefactos relacionados.

1.1.10 Era espacial

La navegación espacial contribuye de manera impresionante al desarrollo de la ingeniería, de los mecanismos, de las máquinas y de todos sus artefactos relacionados. Importantes avances se logran a través del vertiginoso crecimiento de la ciencia espacial tanto en el orden militar como científico, en cuyo campo sobresalen diferentes protagonistas, tales como Konstantin Eduardovich Tsiolkovski (de origen ruso) hacia finales del siglo XIX, con sus principios sobre las teorías de vuelos de cohetes y perspectivas de la navegación aeroespacial. El estadounidense Dr. Robert Goddard, quien amplía la gama del conocimiento de cohetes y el comportamiento dinámico de naves en el espacio y lanza por primera vez en el mundo un cohete movido por combustible líquido, en 1926.

Al inicio de la Segunda Guerra Mundial, Alemania alcanza el vuelo controlado de cohetes con giroscopio. Al final de la guerra, ya Rusia y Estados Unidos contaban con avances tecnológicos que les permitían penetrar la atmósfera con cohetes sonda. Una vez finaliza el conflicto global, la mayoría de las tecnologías relacionadas con la navegación espacial se ubican en Estados Unidos, en Rusia, Francia y Gran Bretaña.

En 1957, Rusia pone en órbita el primer satélite espacial llamado *Spútnik*. Posteriormente, con el lanzamiento por Estados Unidos del *Explorer 1*, nace la carrera espacial entre norteamericanos y rusos. La llegada del hombre a la Luna y demás avances tecnológicos vertiginosos por parte de diferentes potencias, entre finales del siglo XX e inicios del XXI, permiten grandes aportes a las máquinas y a los mecanismos y, por ende, crean una necesidad creciente de avanzar en el mantenimiento de estos complejos equipos y sistemas (Einstein NASA, 2008 y Barajas 2003).

17 OACI, Organización de la Aviación Civil Internacional; IATA, Asociación Internacional de Transporte Aéreo.

1.1.11 Época actual

Otras ciencias que se desarrollan a grandes velocidades son la metalurgia con materiales nuevos, con memoria, aleaciones y con materiales inteligentes, por un lado, y por el otro la nanotecnología, la electrónica, la cibernética, la automatización y las micromáquinas. En general, el mundo actual tiene unos ritmos de crecimiento exponenciales, lo que obliga a los mantenedores de estos tiempos a manejar un espectro amplio y profundo de conocimiento para mantener la funcionalidad confiable de los mecanismos y máquinas de producción.



La metalurgia, la electrónica y la cibernética se desarrollan a velocidades exponenciales, lo que obliga a los mantenedores a desarrollar un profundo conocimiento para mantener en funcionamiento los mecanismos de producción.

Evolución histórica.

CUADRO 1.1

		Producción - Manufactura		Mantenimiento e ingeniería de fábricas	
Etapas	Sucede aproximadamente	Orientación hacia...	Necesidad específica	Orientación hacia...	Objetivo que pretende
I	antes de 1950	el producto	generar el producto	hacer acciones correctivas	reparar fallos imprevistos
II	entre 1950 y 1959	la producción	estructurar un sistema productivo	aplicar acciones planeadas	prevenir, predecir y reparar fallos
III	entre 1960 y 1980	la productividad	optimizar la producción	establecer tácticas de mantenimiento	gestar y operar bajo un sistema organizado
IV	entre 1981 y 1995	la competitividad	mejorar índices mundiales	implementar una estrategia	medir costos, CMD, compararse, predecir índices, etc.
V	entre 1996 y 2003	la innovación tecnológica	Gestión y operación integral de activos en forma coordinada entre ambas dependencias anticiparse a las necesidades de los equipos y de los clientes de mantenimientos - Predicciones - Pronósticos - Gestión de activos		
VI	desde 2004				

Fuente: El autor.

CAPÍTULO 2

ENFOQUES RECIENTES DE MANTENIMIENTO Y DE PRODUCCIÓN

El mantenimiento y la producción se ubican en una época contemporánea más reciente. Y si se desglosan sus procesos de evolución y crecimiento de una forma mancomunada en las últimas décadas, se puede ensayar la siguiente clasificación, para comprender de una forma más clara sus roles, sus relaciones y sus funciones, como se explican en los siguientes apartes.

2.1 ENFOQUE HACIA LAS ACCIONES DE MANTENIMIENTO, ETAPAS I Y II

Durante la etapa I aparecen los instrumentos de mantenimiento. En ese momento se contrata o se entrena el personal de mecánica, electricidad, mecatrónica, neumática, electrónica, etc., con el fin de capacitarlo para llevar a cabo las primeras acciones de mantenimiento, que son de índole correctiva y que procuran corregir la falla o parada imprevista en forma prioritaria.

En esta fase aparecen los elementos iniciales requeridos para sostener los equipos: órdenes de trabajo, herramientas, utensilios, almacenes de repuestos e insumos de mantenimiento (Rey, 1996). Surgen las primeras informaciones que luego se constituyen en las bases de datos y luego en el sistema de información. Se desarrollan las técnicas y las tecnologías propias de la empresa en particular, etc. En general, se dan las bases para que el mantenimiento funcione; en la etapa I la prioridad del área de producción es elaborar productos o generar servicios.

Las fallas imprevistas se convierten en el mayor problema de la división de fabricación, pues impiden el desarrollo normal de su actividad. Como consecuencia de esto sucede la aparición de la etapa II de mantenimiento, en la cual el objetivo principal es solucionar las paradas repentinas de los equipos. Por esto el mantenimiento empieza a desarrollar acciones de prevención o predicción de fallas.

En esta fase empiezan a utilizarse técnicas y metodologías propias de las acciones planeadas¹ de mantenimiento, y la empresa adquiere el conocimiento y la destreza

1 Las mismas que John Moubray denomina *tareas proactivas*.



Las fallas imprevistas se convierten en el mayor problema de la división de fabricación, pues impiden el desarrollo normal de su actividad.

para diferenciar las acciones propias de mantenimiento, antes y después de la falla. Se inicia la utilización de técnicas y tecnologías propias de la prevención y predicción, tales como rutinas de inspecciones, planes preventivos, mediciones técnicas, valoración de condición de estado de los equipos. Ensayos no destructivos, registro de datos técnicos, monitoreo de equipos, reposición de elementos antes de que entren en estado de falla. Control de la vida útil de los elementos, medición de la funcionalidad de los dispositivos, análisis de vibraciones, tribología, ajustes de función antes de la falla, etc. Y nace el control operativo de equipos y de sus elementos.

La etapa II permite distinguir entre las acciones correctivas, modificativas (Latino, 1999a), preventivas (Idhammar, 1997a, 1999; Latino, 1999 b y Patton, 1995), y predictivas (Latino 1999a; Mora, 2007a, 1990 y Navarro y otros, 1997). Las dos primeras son posteriores a la falla y las últimas son previas al estado de no funcionalidad del equipo (Mora, 2007b).

En esta etapa sólo se practica el mantenimiento correctivo o reparativo. Las piezas y equipos se llevan al límite de su vida útil, hasta la falla y la recuperación de la función inicial, que consiste en reemplazar la pieza que no funciona sin aplicar un mayor análisis sobre la causa raíz del problema (Benítez, 2007).

En esta etapa II se identifican los equipos, se determinan las tareas para las intervenciones planeadas o programadas (instrucción de mantenimiento). Se definen las recomendaciones de seguridad, se establecen los planes de mantenimiento (programa maestro). Se delimitan y se generan las OT² programadas (planeadas) y no programadas (no planeadas). Se decide y se implementan los mecanismos de manejo y recolección de datos de una forma sencilla, completa y eficiente, que posteriormente se convierten en el sistema de información. Se relacionan los equipos con los respectivos repuestos específicos y genéricos, a la vez que se concretan los parámetros de subcontratación y administración de proveedores.

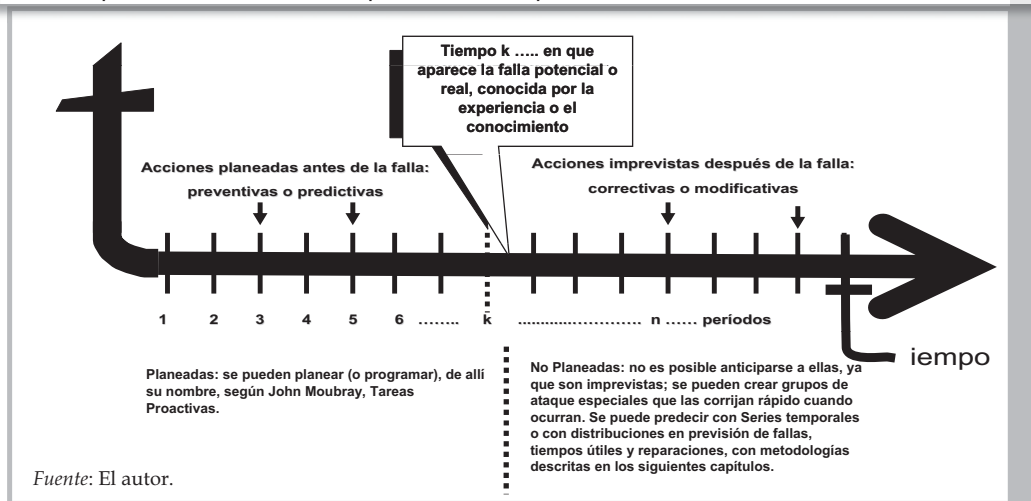
En la fase II también se evalúa la conveniencia de implementar las técnicas de predicción por análisis de síntomas y por evaluación estadística, de acuerdo con la importancia y las características de cada equipo en el proceso.

Para cada equipo fundamental de proceso se definen las acciones de mantenimiento más adecuadas y prioritarias. Se preparan las rutas para recolectar datos (o mediciones). Se identifican las máquinas a las que se les toman datos (con *software* propio o comercial). Se fundamenta el sistema de gestión para recibir estas informaciones y generar las OT apropiadas al proceso productivo (Mora, 1999).

2 OT, órdenes de trabajo; en este nivel o etapa de desarrollo se reciben órdenes de producción hacia mantenimiento, lo cual pone en evidencia el grado de dependencia del segundo con el primero.

Acciones posibles de realizar antes o después de la falla (etapas I o II)

GRÁFICO 2.1



2.2 ENFOQUE HACIA LA ORGANIZACIÓN TÁCTICA DE MANTENIMIENTO, ETAPA III

Una vez las empresas alcanzan la madurez para el manejo real y conceptual de las acciones posibles de mantenimiento, empiezan a adoptar una estructura para el desarrollo secuencial, lógico y organizado del conjunto de acciones de mantenimiento que aplican. Con el fin de gestar y operar el mantenimiento bajo un sistema organizado en esta fase III adoptan una táctica³ de mantenimiento, entre las que se destacan: TPM especialmente enfocada a mejorar la productividad (Roberts@, 2008 y TPM@, 2008), RCM (Smith, 1992; Moubay, 2004 y Smith, y otros, 2003). MCC, TPM y MCC combinados⁴ (Moore@, 2001 y Geraghty, 1996), PMO, Proactivo (Trujillo, 1999a, 1999b; Oiltech, 1995; Pirret, 1999, 37; 1999), Reactivo (Idhammar, 1997a, 1999b, 1999 y Mora, 1999), WCM (Hiatt, 2000), mantenimiento centrado en el riesgo (Tavares y otros, 2005), centrado en objetivos o en resultados (Tavares y otros, 2005 y Williamson, 2008), RCM ScoreCard, (RCM ScoreCard, 2005 y Mather, 2005), PMO (Turner, 2007), mantenimiento centrado en habilidades y competencias, etc., en orden secuencial e histórico⁵.

Es importante aclarar que no todas las empresas evolucionan históricamente al pasar por cada una de las tácticas (Táctica, 2008) en forma secuencial. Y que simplemente

3 Se define como conjunto de reglas para utilizar tropas en combate. Para el caso, es el conjunto de reglas para desarrollar actividades de mantenimiento en empresas de servicios o de procesos industriales.

4 TPM, Manejo y mantenimiento productivo total. MCC, mantenimiento centrado en la confiabilidad. Combinado se le denomina a la utilización simultánea de las mejores prácticas de TPM y MCC.

5 WCM, Mantenimiento de clase mundial, recomendado para empresas que exportan una parte significativa de sus bienes o servicios. RCM ScoreCard, Jack Nicolas Jr. construye un sistema de mantenimiento centrado en confiabilidad a partir de los tableros de mando de control de Kaplan y Norton. Táctica reciente de PMO, Optimización del mantenimiento planeado.



Una vez las empresas alcanzan la madurez para el manejo real y conceptual de las acciones de mantenimiento, adoptan una estructura para el desarrollo secuencial, lógico y organizado del conjunto de acciones de mantenimiento.

En la fase IV las empresas se interesan por medir resultados y pretenden saber qué tan bien hacen su trabajo. Por eso empiezan a establecer sistemas de costeo propios de mantenimiento, como el LCC.

La terotecnología plantea el cuidado integral de la tecnología y su propósito es plantear las bases para la creación de un modelo de la gestión y operación de mantenimiento orientada por la técnica y la logística integral de los equipos.

adoptan una propia que reúne las mejores prácticas de varias de ellas o toman una de ellas sin evolucionar en todas.

En esta fase III, lo importante para producción es maximizar la explotación y la combinación de sus factores productivos. En tanto que el mantenimiento se constituye como una unidad independiente de producción, de apoyo logístico a operación y manufactura, dado que es normal que en las anteriores fases I y II, aún depende del área operativa en cuanto a nivel jerárquico.

2.3 ENFOQUE INTEGRAL LOGÍSTICO DE CREACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO, ETAPA IV

La etapa IV se alcanza cuando las empresas desarrollan con suficiencia los niveles anteriores. En esta fase se interesan por medir resultados y pretenden saber qué tan bien hacen su trabajo. Por eso empiezan a establecer sistemas de costeo propios de mantenimiento, como el LCC⁶. Implementan el registro histórico de fallas y reparaciones. Se establecen sistemas de medición bajo parámetros propios o internacionales. Empiezan a interpretar y a utilizar la curva de Davies (o de la bañera) (Kelly y otros, 1998 y Forcadas, 1983), al involucrar sus deducciones en las labores propias de mantenimiento (Ávila, 1992). Y se comparan con otras empresas similares o diferentes para establecer el nivel de éxito logrado tanto en operación como en mantenimiento y, en general, procuran controlar todas las acciones realizadas.

En este nivel, el área de producción pretende mejorar su competitividad y su mantenimiento. Por eso establece las estrategias con las cuales puede llegar a controlar en forma integral y específica todas las actividades, los elementos, las acciones, la táctica y todos los quehaceres de mantenimiento, con lo cual se consolida la función de mantener.

En esta etapa IV, el resultado de aplicar el conjunto de gestiones y acciones de las etapas anteriores de una forma logística (Ballon, 2004 y Árbones, 1999) conduce a la terotecnología, también conocida como mantenimiento integral logístico.

La terotecnología se apoya en varias ciencias y en diversas áreas del conocimiento, como: la logística, la administración, las finanzas, las necesidades, los deseos y los requerimientos del usuario, la ingeniería, las características del diseño, los costos de fabricación y sostenimiento de equipos⁷, los ciclos de vida de los equipos

⁶ LCC, *Life Cycle Cost* -Costo del ciclo de vida.

⁷ Término equivalente a mantenimiento.

y de la tecnología, la construcción, etc. En especial utiliza la logística, la ingeniería de fábricas y la gestión de tecnología (Dounce, 1998), a partir de que la competitividad se sustituye como parámetro primordial en los negocios por la innovación tecnológica (Etapa V) (Mora, 1999; Dounce, 1998; Kelly y otros, 1998; Husband, 1976; Darnell y otros, 1975 y Rey, 1996).

En el nivel IV, se involucran los directivos y todas las demás áreas corporativas de la empresa en un solo objetivo para obtener la mayor eficiencia productiva y la máxima reducción de costos. En este sistema se establecen metas alcanzables a todas las áreas involucradas, además de detectar las necesidades reales de desarrollo de personal y capacitación, con el fin de que los miembros del área de mantenimiento alcancen niveles adecuados de calificación, para aplicar nuevas tecnologías en procesos de gestión.

Históricamente se demuestra que las empresas, después de alcanzar el nivel IV, regresan a las fases anteriores para profundizar en algún tema especial de cualquiera de los primeros tres niveles.



La terotecnología se apoya en varias ciencias y en diversas áreas del conocimiento como la logística, la administración, los requerimientos del usuario, la ingeniería, los costos de fabricación y sostenimiento de equipos.

2.4 ENFOQUE HACIA LAS HABILIDADES Y COMPETENCIAS DE MANTENIMIENTO, ETAPA V

La etapa V se caracteriza por procurar el desarrollo de habilidades y competencias en todo su personal, y también profundizan en alguna de las etapas anteriores. En este nivel se consolidan las realizaciones de *FMECA*⁸, *RCFA* y *RPN*⁹. Y, en general, la empresa se fortalece en el desarrollo de habilidades y competencias en todos o en algunos de los temas iniciados en las etapas anteriores. En la fase V se logra la consolidación del sistema de información de mantenimiento y producción.

También es probable que se realice una estrategia de mantenimiento integral basada en procesos, donde se analizan las actividades, los procesos y el macroproceso de mantenimiento, mediante la implementación de índices e indicadores sobre la calidad, el tiempo y los costos de cada acción de mantenimiento, al identificar el cliente y el demandante de cada tarea, a la vez que se deben medir todos los parámetros de proceso, ya sea por el método de *Vital Signs-Performance* (signos vitales del *Quantum Performance*) (Hronec, 1995) donde se establece un control total, detallado e interrelacionado del sistema de mantenimiento en tiempo real, con participación de todos los empleados y trabajadores de la empresa (Mora, 2007a). Últimamente se trabaja también con *Balanced ScoreCard*¹⁰ (cuadros y tableros de control) (Kaplan y otros, 1997), aplicado a mantenimiento (RCMScorecard@, 2005) bajo direccionamiento estratégico (Steiner, 1995).

⁸ Análisis de los modos, los efectos, las causas y las criticidades de las fallas.

⁹ *RCFA*, Análisis de la causa raíz de las fallas. *RPN*, Número de riesgo prioritario.

¹⁰ El método de *Signos vitales* inicia desde la base operativa y asciende a los niveles más altos de la organización.

Durante la etapa V también se propende a utilizar la teoría de restricciones *TOC* y de los costos basados en actividad *ABC* (Mora, 2007a), en este nivel de desarrollo (González, 2004).

Así mismo, producción implementa técnicas y tecnologías de punta, como *lean production* o producción ajustada a la demanda, manejo de inventarios, *ABC* de inventarios, sistemas de control, justo a tiempo *APC*¹¹, *CPFR*¹² *CPFR*, pronósticos de demanda, *business forecasting*¹³ sistemas de simulación, *MRPII* (Sherwin y otros, 1995), etc. Y todas aquellas mejores prácticas que aumenten la productividad, la rentabilidad, la competitividad, la utilización de innovación tecnológica; todo con base en una producción ajustada a la demanda requerida.

En este momento de la evolución en el tiempo y cuando las organizaciones pasan por las etapas descritas anteriormente, las empresas alcanzan tal grado de conocimiento, experiencia, desarrollo de tecnologías propias y dominio de modernas técnicas de mantenimiento y producción, que empiezan estas dos áreas a trabajar en forma conjunta y alineada por encima de cualquier obstáculo propio. En aras de optimizar el bien común que las relaciona, que es la máquina (o aparato productivo), pues deja de mirarla como un pasivo que hay que utilizar para producir y mantenerlo para que se pueda utilizar, y pasa a entenderlo como un activo que genera ingresos para la organización.



Se puede afirmar que cuando la organización desarrolla y alcanza una metodología capaz de integrar todos y cada uno de los niveles anteriores se alcanza la etapa VI, definida como gestión de activos, la cual permite integrar todo el conocimiento y las mejores prácticas aprendidas, con el fin de manejar con flexibilidad y éxito sus activos.

2.5 ENFOQUE HACIA LA GESTIÓN DE ACTIVOS, ETAPA VI

Se puede afirmar que cuando la organización desarrolla y alcanza una metodología capaz de integrar todos y cada uno de los niveles anteriores se alcanza la etapa VI, definida como gestión de activos, la cual permite integrar todo el conocimiento y las mejores prácticas aprendidas, con el fin de manejar con flexibilidad y éxito sus activos (parque industrial, equipos, etc.).

2.5.1 Activos y pasivos

La diferencia entre activo y pasivo es que conceptualmente el primero de ellos se asocia a la producción de riqueza, mientras que el segundo se refiere a inversión o gasto (Kiyosaki y otros, 2000). Bajo esta premisa se influye el mantenimiento en cuanto a la forma de visualizar la utilización de los activos. El ingreso se entiende como el flujo nominal que recibe una empresa o familia, producto de una actividad o comercialización

¹¹ *APC*, Administración por categorías, metodología integral de clientes proveedores y productores.

¹² *CPFR*, *Collaborative Planning Forecasting and Replenishment*. *CPFR* es un proceso colaborativo de todos los actores de la cadena productiva y de servicios, que pronostican, planean y se reabastecen en forma integral y mancomunada bajo un proceso de administración conjunta.

¹³ Planeación comercial basada en pronósticos de demanda.

de un bien o servicio, mientras que el gasto es lo que una institución, familia u objeto requiere para ser mantenido.

La transformación empresarial, para alcanzar el nivel de gestión de activos, requiere, entre otras, que todas las acciones del mantenimiento y producción generen aumento de la capacidad de producción, del valor agregado y de su demanda en la búsqueda de conquistar cada día más el mercado potencial. De lo contrario aún se está en una actitud pasiva, opuesta a la presentada en este numeral, que incurre nuevamente en gastos en el manejo de sus equipos.

La evolución hacia la etapa VI de gestión de activos presenta diferentes y diversas formas de ser alcanzada, entre las cuales sobresalen: la inversión en I y D¹⁴ y, procurando disminuir los tiempos de reparación y los de mantenimientos planeados, los cuales se manifiestan con una reducción tangible de los tiempos (correctivos, modificativos, preventivos, predictivos, de espera o demora de recursos) que impiden la función principal de los equipos, como DT , $MTTR$, $\bar{M}$ o con un aumento significativo de los tiempos útiles $MTBM$, $MTBM_C$, $MTBM_p$ ¹⁵ (ver el significado de cada sigla en la parte siguiente), lo que a su vez redunda en costos más bajos y menor requerimiento de capital de trabajo.

Lo anterior se realiza bajo el enfoque de rediseño de procesos al estudiar en forma detallada las acciones de mantenimiento, o mediante el análisis de los trabajos de mantenimiento (Mora, 2007a), ya sea mediante la evaluación estadística de la información, o al desarrollar el conocimiento científico pertinente para mejorar las actividades de reparación o intervención de mantenimiento.

La mejora de los índices CMD se alcanza mediante proyectos y, en especial, con todos aquellos estudios y acciones que conduzcan al aumento de la disponibilidad y del engrandecimiento del tiempo operacional sin fallas o sin reparaciones, medido a través de los índices CMD, UT ¹⁶, $MTBF$ (tiempo medio entre fallas), $MTTF$ ¹⁷. Y en fin, con todas aquellas actividades que propendan hacia el aumento de la confiabilidad (probabilidad de que los equipos operen el mayor tiempo posible sin fallas o reparaciones), y de la mejora de la mantenibilidad (probabilidad de que un equipo que ha estado operando, y que, por ende, ha sufrido cierto desgaste o pérdida parcial o total de su funcionalidad o cierto ajuste, pueda ser restituido a su condición de referencia o trabajo) (Mora, 2007b y Ávila, 1992).



La diferencia entre activo y pasivo es que conceptualmente el primero se asocia a la producción de riqueza, mientras que el segundo se refiere a inversión o gasto.

14 I y D, Investigación y desarrollo en ingeniería.

15 DT es el tiempo que el equipo dura detenido y coincide con el tiempo de reparación. $MTTR$, Tiempo medio entre reparaciones. $\bar{M}$ es el tiempo promedio que toma determinado tipo de tarea de mantenimiento en el equipo. $MTBM$. Este concepto utiliza para el cálculo CMD la disponibilidad alcanzada, operacional u operacional generalizada y significa el tiempo útil promedio de la máquina entre dos actividades de mantenimiento. $MTBM_C$, Tiempo medio útil entre mantenimientos correctivos. $MTBM_p$, Tiempo medio útil entre dos mantenimientos planeados (sean preventivos o predictivos, o combinados).

16 UT , Tiempo útil.

17 $MTTF$, Tiempo medio para fallar; se utiliza sólo la primera vez del cálculo en los elementos de mantenimiento reparables, o en los ítems no mantenibles.



Se puede contribuir con el aumento de la mejora de la confiabilidad mediante el incremento de la demanda y del mercado real y potencial con el fin de aumentar el tiempo útil de funcionamiento al requerir más producción.

La disponibilidad crece cuando se optimizan la preservación de los insumos, los procedimientos de adquisición de elementos para el mantenimiento, el manejo de proveedores y las entregas oportunas de materiales.

Se puede contribuir con el aumento de la mejora de la confiabilidad mediante el incremento de la demanda y del mercado real y potencial, con el fin de aumentar el tiempo útil de funcionamiento al requerir más producción. O mediante la utilización del *Ready Time*¹⁸, con lo cual se acrecienta la disponibilidad (disponibilidad es el resultado de un cálculo numérico que se obtiene a partir de la confiabilidad y de la mantenibilidad, bajo estándares internacionales), porque se eliminan inversiones en procesos que no son estratégicos y que no generen utilidades que compensen la inversión de capital. Y porque mejora la gestión de inventarios y el manejo de repuestos e insumos para mantenimiento y producción.

La disponibilidad también crece cuando se optimizan la preservación de los insumos, los procedimientos de adquisición de elementos necesarios para el mantenimiento, el manejo de proveedores, y las entregas oportunas de materiales y tiempos de servicio.

En síntesis, se mejora la disponibilidad¹⁹, mediante la eliminación de fallas, con la reducción de los tiempos de reparación y mantenimientos planeados, por razón de incrementar los tiempos entre mantenimientos planeados, pero con una vigilancia muy estricta del Beta (se le conoce como el factor de *forma* en que los equipos fallan). Y con el monitoreo permanente de la máquina para que no aparezcan fallas que ya se controlan desde antes de ampliar los períodos entre mantenimientos preventivos o predictivos. O también al eliminar o disminuir los tiempos logísticos requeridos para mantenimiento o producción.

2.5.2 De gestión de pasivos a gestión de activos

Entre los diferentes hechos que permiten la orientación de las empresas hacia la gestión de activos, aparecen varios acontecimientos como relevantes, que se explican en los apartes sucesivos.

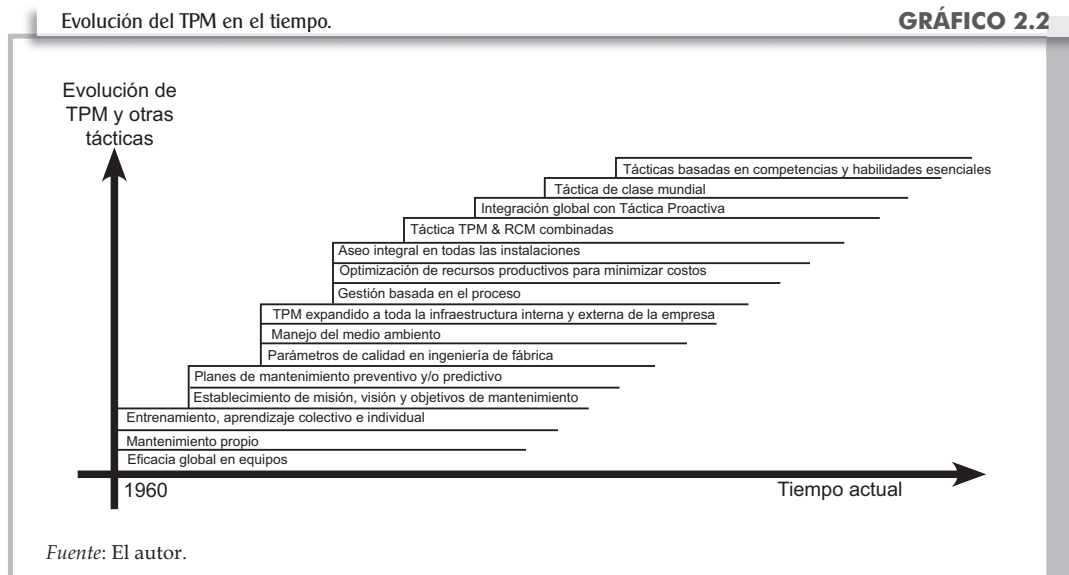
Los inicios se marcan por acciones correctivas de mantenimiento de que generan gastos y actúan de forma pasiva. Posteriormente se pasa a evitar fallas y paradas imprevistas en los equipos mediante acciones preventivas, gobernadas básicamente por períodos de tiempo para los recambios, las reposiciones o cambio de repuestos o, en su defecto, por el número de productos generados o por algún indicador del volumen de bienes producidos. Con estos criterios se determina una parada general de la máquina donde se realiza una inspección general y se desarrollan diferentes actividades como limpieza, ajustes y reparaciones. Todo esto se realiza en aquella época inicial, a partir de la experiencia o de las recomendaciones de los fabricantes.

18 *Ready Time* denota que la máquina funciona correctamente, pero no produce volúmenes significativos de unidades. También cuando opera el equipo al mínimo posible.

19 Disponibilidad = Confiabilidad / (Confiabilidad + Mantenibilidad).

A mediados del siglo XX empiezan a aparecer otras formas de organización del mantenimiento en las cuales simplemente no sólo importa la acción propia del mantenimiento, sino la estructura organizacional para hacerlo. Aparecen las tácticas de mantenimiento, productivo, como el mantenimiento centrado en la confiabilidad y otras que le dan toda la importancia a la organización y a la planeación. En el ámbito mundial aparece el concepto según el cual el mantenimiento ya no depende de la producción, sino que se establece como una unidad independiente, pues deja de ser un departamento gestor de pasivos y causante de gastos.

La aparición del TPM, el cual integra el personal de producción hacia la actividad del mantenimiento, para procurar una mejor productividad, marca un hito en la aparición de tácticas, que luego evolucionan hacia el RCM, combinado, proactivo, reactivo, clase mundial, centrado en objetivos, PMO y muchas otras que se desarrollan en tiempos recientes hasta las últimas como el RCM ScoreCard.



Los japoneses integran los conceptos desarrollados anteriormente. Y los asocian a la necesidad de ocupar el tiempo ocioso del profesional de operación con actividades sencillas y bien definidas de mantenimiento. Eso deja un tiempo disponible a sus profesionales para realizar tareas de análisis y desarrollo de ingeniería de mantenimiento, que permiten reevaluar proyectos de los equipos, instalaciones, así como los métodos y procesos adoptados. Uno de los grandes aportes del TPM consiste en que da las bases para el desarrollo táctico de mantenimiento. El TPM posee normas, con reglas, usos, costumbres y pilares bien definidos y es reconocido como la más antigua y básica de las tácticas de mantenimiento.



A mediados del siglo XX empiezan a aparecer otras formas de organización del mantenimiento, en las cuales simplemente no sólo importa la acción propia del mantenimiento, sino la estructura organizacional para hacerlo.

2.5.3 La terotecnología

En 1976, los autores M. Husband y Dennis Parkes, de Inglaterra, desarrollan un concepto integrador que revoluciona la gestión y la operación de mantenimiento: la *terotecnología*, concepción que involucra los costos en la gestión de mantenimiento bajo la orientación del *LCC*, término que denota la integración de todos los esfuerzos de las etapas de fabricación, producción, explotación, mantenimiento y operación integral de los equipos, para optimizar los rendimientos mediante un excelente mantenimiento bajo un enfoque de costos (Husband, 1976 y Rey, 1996).

Se puede explicar, deducir y sustentar del documento de Parkes, en el concepto según el cual los índices de rendimientos son la confiabilidad, la mantenibilidad, la disponibilidad y los costos asociados a mantenimiento.

La terotecnología plantea el cuidado integral de la tecnología. Y su propósito es plantear las bases y reglas para la creación de un modelo de la gestión y operación de mantenimiento orientada por la técnica y la logística integral de los equipos (Terotecnología) (Kelly y otros, 1998 y Rey, 1996).

Relación entre TPM y terotecnología.

GRÁFICO 2.3



Fuente: El autor.

En el artículo *Tomando decisiones en la administración del mantenimiento*, los autores Pintelon y otro (1991) plantean que si bien la terotecnología se concibe en los años setenta, como una decisión gubernamental de la Gran Bretaña, estos conceptos no se han difundido en la industria mundial, debido a la escasa disponibilidad de metodologías prácticas para

soportarlo. Aunque en los Estados Unidos se utiliza el concepto de ciclo de vida, éste se tiene en cuenta al inicio (Blanchard, 1995) y en la evolución de la terotecnología, que recientemente ha recobrado importancia, debido a las exigentes condiciones de competitividad requeridas a las empresas y a las nuevas herramientas de información disponibles.

La terotecnología está relacionada con la especificación y el diseño para la confiabilidad y mantenibilidad de equipos, maquinaria, edificios y estructuras. Se asocia también a la puesta en marcha de máquinas, al mantenimiento, a las modificaciones, a las reformas, a las ampliaciones y al reemplazo de los equipos, así como a la retroalimentación de información sobre el diseño, el desempeño y los costos de maquinaria.

Ello significa que debe procurarse una visión global de la administración de los activos físicos, para definir de esta forma la terotecnología como una de las bases más influyentes en la actual gestión de activos. Si las inversiones en mantenimiento de un equipo son anualmente el 15% de su valor de compra, en siete años superan su costo inicial (White, 1975). Las tendencias y perspectivas mundiales de la gestión de mantenimiento (Thorsteinsson y otros, 1997), orientadas por la terotecnología, señalan a la Norma británica 3811 como el parámetro base y fundamental de la gestión de activos, a la vez que la definen como epicentro de la terotecnología.

Los ingleses definen en esta norma a mantenimiento como la combinación de todas las técnicas y actividades administrativas asociadas, que intentan retener y conservar el estado original de los equipos en que fueron diseñados y para lo cual se requieren²⁰. La tendencia es que el mantenimiento llegue a adquirir la dimensión de una estrategia corporativa de aplicación mundial, que permita sistemas justo a tiempo en producción. Y que conduzca a una manufactura ágil, que implique a alta confiabilidad en los equipos, que labore bajo el concepto de servicio al cliente, en los momentos oportunos con la mayor disponibilidad (y mantenibilidad) posible y que permita precios de servicios de mantenimiento competitivos.

Cabe anotar que este párrafo y sus enunciados enmarcan la terotecnología como la estrategia marco y macro de mantenimiento, caracterizada en la etapa IV del desarrollo que se muestra en las secciones anteriores.

La terotecnología es una alternativa técnica capaz de combinar los medios financieros, estudios de confiabilidad, evaluaciones técnico-económicas y métodos de gestión para obtener ciclos de vida de los equipos cada vez menos dispendiosos y costosos. Por ser un órgano que relaciona directamente a proveedores, usuarios, diseñadores, oferentes y demandantes de insumos, parece lógico afirmar que la terotecnología es centro vital del mantenimiento.

A partir de 1980, con el desarrollo de los computadores personales, de uso masivo a costos reducidos y lenguajes sencillos, los órganos de mantenimiento



La terotecnología está relacionada con la especificación y el diseño para la confiabilidad y la mantenibilidad de equipos, maquinaria, edificios y estructuras.

Los ingleses definen la norma británica a mantenimiento como la combinación de todas las técnicas y actividades administrativas asociadas, que intentan retener y conservar el estado original de los equipos en que fueron diseñados.

20 Norma 3811 de la Asociación Británica de Normas Técnicas - 1984.



Con el desarrollo de los PC los órganos de mantenimiento desarrollan sus propios programas, lo que elimina la dependencia de disponibilidad humana y de equipos para atender sus prioridades de procesamiento de información, a través de un computador central institucional.

El análisis y el diagnóstico consisten en conformar un grupo de trabajo interdisciplinario, que es asesorado o no por consultores externos, y coordinado por el director de ingeniería de fábricas, IF.

pasan a desarrollar y usar sus propios programas. Todo esto elimina los inconvenientes de dependencia de disponibilidad humana y de equipos para atender sus prioridades de procesamiento de información a través de un computador central institucional, que además minimiza las dificultades de comunicación en la transmisión de sus necesidades para el analista de sistemas, quien no siempre está familiarizado con el área de mantenimiento.

Para complementar esto surge una metodología inglesa²¹ para auditar el área de mantenimiento, la cual permite evaluar de una forma integral y detallada casi todos los parámetros empresariales de mantenimiento, ya que puede evaluar diferentes tópicos de mantenimiento mediante aproximadamente 650 preguntas que miden doce componentes básicos de mantenimiento y sus resultados se entregan en forma numérica y de radar. Las personas que participan son funcionarios de mediano y de alto rango de las áreas de producción, mantenimiento y gerencia de planta (Mora, 2007b).

El análisis y el diagnóstico consisten en conformar un grupo de trabajo interdisciplinario, que es asesorado o no por consultores externos, y coordinado por el director de ingeniería de fábricas, IF²², para evaluar la situación actual de los distintos aspectos de la gestión y operación del mantenimiento. El grupo debe conformarse con representantes de todas las áreas relacionadas con mantenimiento como: materiales, producción, suministros, compras, proyectos, finanzas, contabilidad, sistemas, inventarios, almacenes, desarrollo de personal, nómina, recursos humanos, investigación y desarrollo, sistemas, departamento jurídico de contratos, activos, con reuniones permanentes y periódicas en donde se revisan las evaluaciones, las metas, los logros y reconsideraciones.

El mayor nivel de servicio exigido en la calidad de los bienes y servicios producidos en la década de los ochenta, por parte de los consumidores, ayuda al mejor posicionamiento de mantenimiento.

Tanto así que en 1993 este reconocimiento es aceptado en la norma ISO 9000, cuando se incluye la función mantenimiento en el proceso de certificación, al dar a mantenimiento el mismo nivel en la organización que el de operación. Este hecho ya fue identificado por la ONU en 1995 (Tavares y otros, 2005), en la búsqueda de optimizar la calidad, la confiabilidad operacional, los costos de producción (o servicio), la oportunidad, la garantía de seguridad del trabajo y de la preservación del medio ambiente.

²¹ *Flash Audit System*.

²² IF, Ingeniería de fábricas, término que se usa para denotar un área global de la empresa que incluye las divisiones de mantenimiento, proyectos, producción, calidad y otras afines.

Programa Flash Audit inglés, para el análisis y diagnóstico de mantenimiento.

GRÁFICO 2.4

FLASH AUDIT

Compañía

País:

Address

Dirección física

Ciudad

Código Área

Estado o Provincia

Email o Web

Teléfono

Apartado Aéreo

Fax

Maintenance Manager

Coordinador

Nombres y Apellidos

Function

Grado Académico

Edad

Años en la empresa

PARTICIPANTES

Nombre Apellidos

Cargo

Grado Académico

Edad

Años en la empresa

☐ 1. Director Ingeniería

☐ 2. Funcionario de Producción

☒ 3. Funcionario de Mantenimiento

☐ 4.Muestra resultados

Fecha: Año - Mes - Día:

Objetivos del mejoramiento del programa Flash Audit y áreas que cubre.

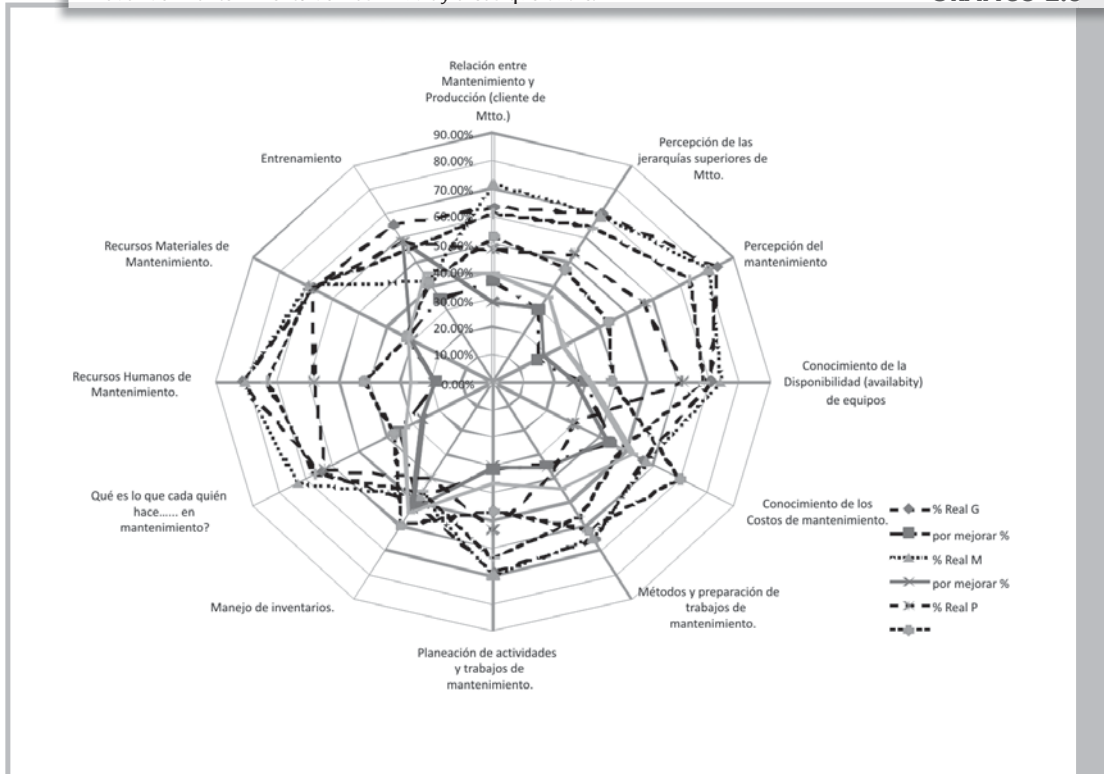
GRÁFICO 2.5

Flash Audit Mejoramiento		Gerentes		Mantenimiento		Producción		Total	
No.	Concepto	% Real G	por mejorar %	% Real M	por mejorar %	% Real P	por mejorar %	% Real Total	por mejorar %
1	Relación entre Mantenimiento y Producción (cliente de Mtto.)	63.24%	36.76%	71.32%	28.68%	47.79%	52.21%	60.78%	39.22%
2	Percepción de las jerarquías superiores de Mtto.	70.16%	29.84%	69.35%	30.65%	53.23%	46.77%	64.25%	35.75%
3	Percepción del mantenimiento	83.65%	16.35%	80.77%	19.23%	56.73%	43.27%	73.72%	26.28%
4	Conocimiento de la Disponibilidad (availability) de equipos	70.45%	29.55%	73.86%	26.14%	61.36%	38.64%	68.56%	31.44%
5	Conocimiento de los Costos de mantenimiento.	56.25%	43.75%	57.50%	42.50%	30.00%	70.00%	47.92%	52.08%
6	Métodos y preparación de trabajos de mantenimiento.	65.53%	34.47%	64.77%	35.23%	38.26%	61.74%	56.19%	43.81%
7	Planeación de actividades y trabajos de mantenimiento.	68.48%	31.52%	69.57%	30.43%	53.26%	46.74%	63.77%	36.23%
8	Manejo de inventarios.	50.45%	49.55%	47.32%	52.68%	40.18%	59.82%	45.98%	54.02%
9	Qué es lo que cada quién hace..... en mantenimiento?	64.66%	35.34%	73.28%	26.72%	62.93%	37.07%	66.95%	33.05%
10	Recursos Humanos de Mantenimiento.	81.62%	18.38%	80.88%	19.12%	58.09%	41.91%	73.53%	26.47%
11	Recursos Materiales de Mantenimiento.	67.59%	32.41%	69.44%	30.56%	67.59%	32.41%	68.21%	31.79%
12	Entrenamiento	65.28%	34.72%	41.67%	58.33%	58.33%	41.67%	55.09%	44.91%
						Promedio		62.08%	37.92%

Los valores relevantes por mejorar están por encima de la media.

Radar del mantenimiento de Flash Audit y áreas que cubre.

GRÁFICO 2.6



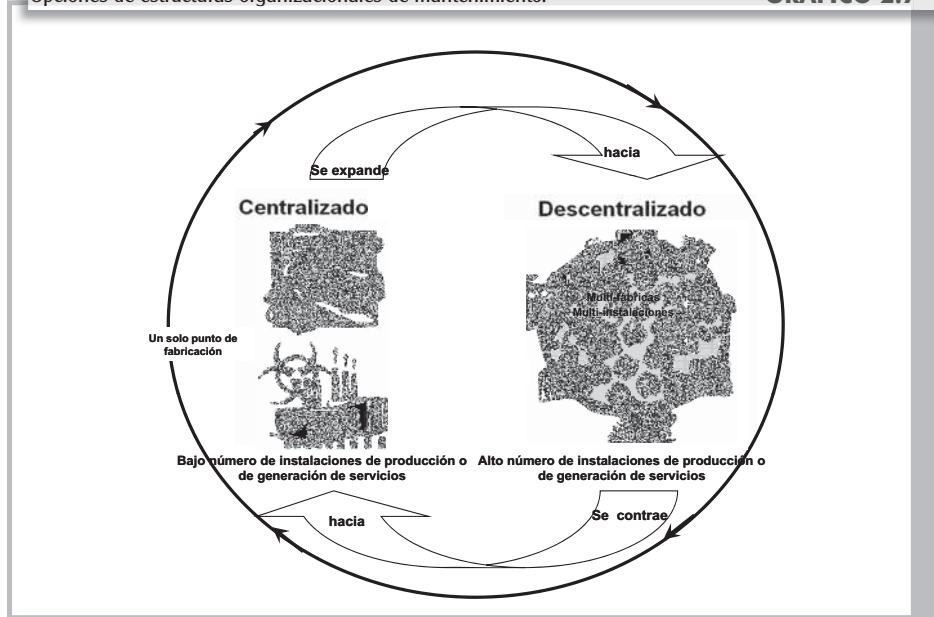
2.6 LA EVOLUCIÓN ORGANIZACIONAL Y ESTRUCTURAL DE MANTENIMIENTO

La forma como interactúan mantenimiento y producción, dentro de un esquema de ingeniería de fábricas, IF, o de ingeniería de confiabilidad en un sistema empresarial, puede aportar muchas clasificaciones, que dependen del punto de vista que se tome. Inicialmente, el mantenimiento puede ser centralizado, descentralizado y mixto.

En el mantenimiento centralizado su área se encuentra en el mismo nivel jerárquico de la operación. Esta gestión puede darse en empresas medianas y pequeñas donde es un requerimiento para un mejor control. Y se puede asociar a organizaciones en crecimiento que consolidan una estructura característica de las etapas III y IV de la evolución de mantenimiento.

Opciones de estructuras organizacionales de mantenimiento.

GRÁFICO 2.7



Esta estructura se puede aproximar a empresas que sólo poseen una o pocas instalaciones físicas de servicios o fábrica. Para el sistema descentralizado cada unidad de negocio de la empresa tiene su propio organismo de planeación, ejecución y control del mantenimiento. Es típico encontrarlo en organizaciones de gran magnitud con muchas instalaciones físicas de servicio o con muchas empresas (o fábricas) propias (o filiales), o que físicamente son distantes y pertenecen a una sola corporación (HajShirmohammad y otros, 2004).

Por último, el término intermedio, que es una mezcla de las dos anteriores, es una estructura organizacional más compleja y difícil que las dos anteriores. Se puede encontrar en empresas que evolucionan en su crecimiento hacia la expansión, al buscar el sistema descentralizado o de recogimiento o reducción hacia el modelo centralizado. La mezcla puede darse en cualquiera de las funciones de planear, ejecutar o controlar, en dos de ellas o en todas.

Otro punto de vista según el cual se debe analizar la evolución estructural de mantenimiento es su grado de dependencia. Es indiscutible que al ser mantenimiento una división de servicio y de apoyo logístico a fabricación, es lógico pensar que nazca de este departamento, de modo que en las primeras etapas de desarrollo es probable que dependa enteramente del área operativa. En este modelo de dependencia producción es quien toma las grandes decisiones de mantenimiento, y es el área de manufactura omnipotente en el direccionamiento, planeación, control y ejecución del mantenimiento.



Otro punto de vista desde el cual se debe analizar la evolución estructural de mantenimiento es en su grado de dependencia; al ser una división de servicio y de apoyo logístico a fabricación, es lógico pensar que nazca de este departamento.

Entre los inconvenientes que presenta la dependencia de mantenimiento de producción están:

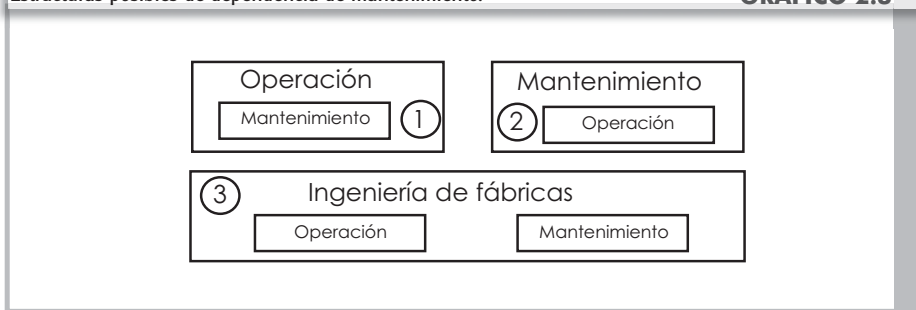
- El desconocimiento del área técnica y de la no disponibilidad de tiempo para profundizar en los problemas y en la ciencia requerida para atender niveles tecnológicos altos.
- La falta de una visión de largo plazo en las decisiones de mantenimiento, pues su interés prioritario es la explotación de los equipos, lo cual genera frustración en los funcionarios de mantenimiento y normalmente se ve a mantenimiento como un componente pasivo, generador de gastos en la empresa.

Es muy difícil la programación de paradas de equipos para realizar actividades de mantenimiento, ya que normalmente se actúa con acciones correctivas y eventualmente modificativas. No hay presencia de acciones planeadas, y es muy difícil en ellas llegar a la etapa III de mantenimiento, pues no tienen las condiciones para consolidar una táctica y mucho menos una estrategia (etapa IV). En general, es poco recomendable para una organización de servicios o fabril (Mora, 2007a).

El estudio *EUREKA* de *benchmarking* realizado en Europa y Norteamérica, en múltiples empresas, indica que en el 23% de las empresas el gerente de operación administraba el mantenimiento y sólo en el 16% funcionaban las áreas de mantenimiento y producción en forma conjunta; y que en el 84% de las compañías la gerencia de mantenimiento tenía una posición jerárquica media (Riis y otros, 1997)²³.

Estructuras posibles de dependencia de mantenimiento.

GRÁFICO 2.8



Otra forma posible de dependencia es un departamento de mantenimiento con amplios poderes y con mucha influencia sobre las demás dependencias de la empresa. En este caso se presentan los mismos síntomas enunciados para el anterior, pero en forma inversa, pues es muy difícil lograr la programación de la producción, ya que todas las decisiones de ingeniería de fábricas están sujetas a la voluntad variable del área de ingeniería de mantenimiento. Y es probable que no se tengan parámetros de calidad

²³ Estudio *EUREKA*: *European Benchmark Study on Maintenance*, EBSOMEU 724 (1993).

para evaluar el servicio de mantenimiento, por lo que, en general, éste puede ser deficiente, normalmente con los costos altos, circunstancia que no permite lograr la adecuada efectividad del mantenimiento.

El sistema ideal es que ambas áreas (mantenimiento y operación) tengan igual nivel jerárquico, donde el uno actúa como oferente (mantenimiento) de un servicio y el otro como demandante (producción) receptor de dicho servicio. De esta manera se toman las decisiones en forma alineada y de mutuo acuerdo. Este modelo es el ideal y es así como puede funcionar normalmente una empresa de servicios o productos, para alcanzar las seis etapas de desarrollo planteadas anteriormente.

El tercer punto de vista para analizar la evolución del mantenimiento en el tiempo es a partir de su fortaleza, caso en el cual puede hablarse de varias opciones:

1. Un departamento muy grande conformado por un número amplio de funcionarios, donde se tiene el concepto de que todas las actividades de mantenimiento y proyectos deben realizarse dentro de mantenimiento. Entre las limitaciones que tiene esta organización están los costos, pues normalmente éstos son mayores que los de proveedores externos, no siempre se alcanzan a cubrir todas las actividades y necesidades de sostenimiento y siempre se solicitan más recursos (físicos y humanos) en las instancias superiores.
2. Un departamento minúsculo, siempre escaso de recursos, totalmente antagónico al anteriormente descrito.
3. La tendencia mundial de tener un departamento de mantenimiento muy concentrado, con el personal mínimo necesario para las actividades clave, declaradas como no indiferentes que agregan valor, y de una importancia estratégica muy alta para la empresa en cuestión, donde las tareas de mantenimiento de menor valor agregado se subcontratan. Igualmente las acciones de baja tecnología o de amplio conocimiento de mantenimiento se trasladan a operación con bajo riesgo de error. Aquellas labores en donde se dispone de proveedores locales o internacionales con mayor valor agregado o tecnología que los que tiene la propia empresa se subcontratan con precios inferiores a los internos. El personal de mantenimiento que queda es de alto conocimiento técnico y se destina principalmente a las tareas trascendentales de ingeniería de mantenimiento.

Este modelo es el más recomendado por su alto contenido técnico, con un alto valor agregado en el servicio de mantenimiento y, en general, propende por un alto grado de satisfacción al cliente interno (producción u operación) o externo, con la mayor oportunidad y al menor costo posible.

4. El estudio de su organigrama funcional y de los diferentes roles que asume el personal en el desarrollo de las funciones normales. Se han revisado varios libros especializados, y se ha tenido en cuenta la experiencia de diferentes empresas de diversos países en dos continentes. A partir de eso se puede afirmar que no hay un modelo único y exitoso con relación a cómo estructurar el mantenimiento.

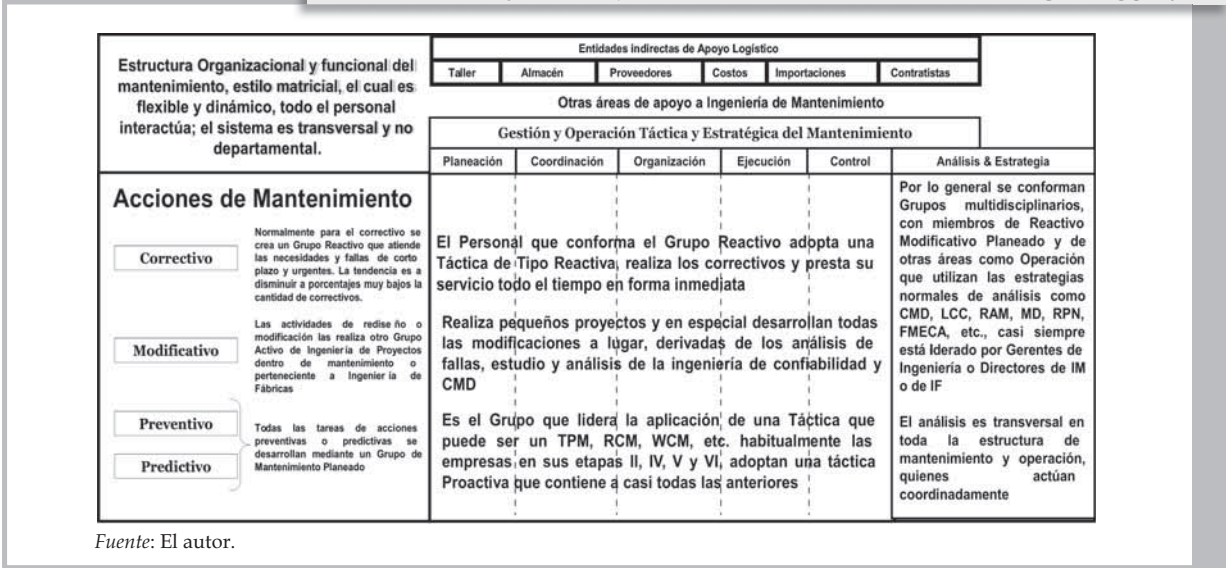


El sistema ideal es que ambas áreas, mantenimiento y operación, tengan igual nivel jerárquico, donde el uno actúa como oferente (mantenimiento) de un servicio y el otro como demandante (producción) receptor de dicho servicio.

Lo que sí se observa en las organizaciones que alcanzan las etapas III, IV, V y VI es que su estructura es matricial, donde se tienen funciones y cargos, porque se utilizan acciones de mantenimiento, y se asume una táctica, todo esto manejado mediante una estrategia (Mora, 2007a).

Estructura sistémica, organizacional y funcional de mantenimiento.

GRÁFICO 2.9



La particularidad de este sistema está en ser dinámico y flexible. En él se conforman grupos de diferentes acciones de mantenimiento: correctivo, modificativo y planeado. Se pueden adoptar diferentes tácticas en simultáneo, con el predominio de una en especial, y las funciones estratégicas son transversales. En general, su éxito estriba en que se adapta a cada organización en particular, pero es simplemente una directriz beneficiosa en la medida en que se acomode a las necesidades y en especial a la etapa de desarrollo de mantenimiento en que se encuentre la empresa.

2.7 IMPORTANCIA ECONÓMICA Y TECNOLÓGICA DE MANTENIMIENTO

La realidad que adquiere la etapa VI de mantenimiento, bajo la orientación de gestión de activos, la posiciona como estratégica dentro de la organización, lo cual la convierte en un área clave, donde se deben incrementar todos los esfuerzos posibles de la empresa encauzados a la búsqueda de beneficios económicos de corto y de mediano plazos.

El departamento de mantenimiento, desarrollado como una unidad estratégica de negocios, generadora de ingresos, se ha constituido en la meta durante las últimas

décadas en varios países de Europa y Estados Unidos. En este aspecto muchos autores e industriales investigan al respecto, al tratar de cambiar el enfoque cerrado de mantenimiento orientado a producción.

Esta situación se ve influenciada positivamente por el aseguramiento de la calidad en mantenimiento, en producción y en las demás divisiones industriales y técnicas de las empresas. Por la necesidad de diseñar planes estratégicos especiales de mantenimiento en concordancia con los de la organización. Por el creciente aumento en la calidad del personal operativo y ejecutivo de mantenimiento. Y por la utilización de nuevas estrategias de gestión, el efecto de planes muy eficientes de capacitación y entrenamiento de personal directivo y de planta. La buena gestión de mantenimiento genera muchos ahorros a las empresas, y en algunos casos produce otras fuentes de ingreso para la organización (De Groote, 1994).

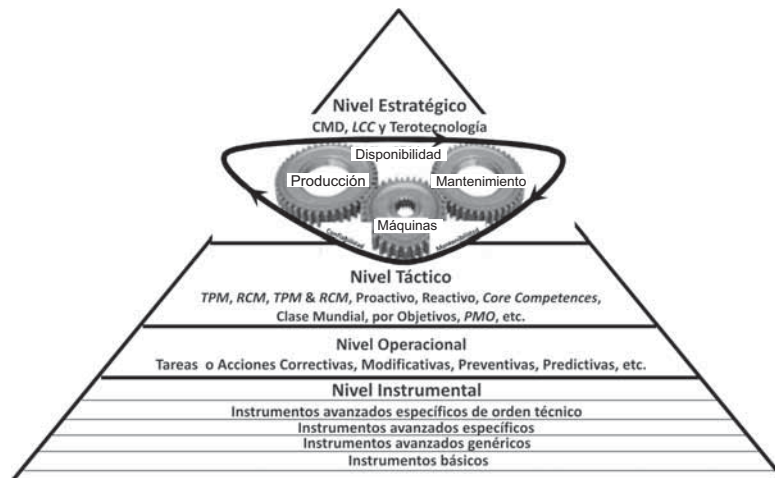
El mantenimiento proactivo de la etapa III considera que los mantenedores quieren hacer algo más que registrar y mantener sus activos. Su gran objetivo es investigar científicamente mediante una metodología formal de análisis de fallas y de las causas que originan la falla (AMEF@, 2005). Desean aumentar la confiabilidad y la mantenibilidad mediante reingeniería de activos, a la vez que pretenden optimizar la gestión y operación del mantenimiento, al utilizar las metodologías de rediseño de procesos en forma sistémica, orientándose por la gestión de activos (Tavares y otros, 2007).



El departamento de mantenimiento desarrollado como una unidad estratégica de negocios, generadora de ingresos, se ha constituido en la meta durante las últimas décadas en varios países de Europa y Estados Unidos. En este aspecto muchos autores e industriales investigan al respecto, al tratar de cambiar el enfoque cerrado de mantenimiento orientado a producción.

Enfoque Sistémico Integral Kantiano de Mantenimiento Estratégico.

GRÁFICO 2.10



Fuente: El autor.

Durante las etapas IV, V y VI se evalúan los riesgos de cada parte del proceso productivo (o de servicio), que es donde se tiene en cuenta la implementación de la teoría de restricciones *TOC* en búsqueda de obstáculos de la producción. Para eso se realiza el análisis de criterios para mejorar la eficiencia, o ampliar su capacidad, o duplicar este elemento para mejorar su confiabilidad. A lo anterior se agrega una serie de técnicas para evaluar el reflejo en los costos de producción (o generación del servicio) y los riesgos a la seguridad y al medio ambiente, así como la búsqueda de una mejor ejecución de las actividades de mantenimiento.

Estas tres etapas también permiten utilizar el análisis de las actividades basadas en costos por medio de la investigación de sus vectores de origen²⁴, para determinar aquellos que agregan más valor a los procesos o a los servicios al procurar su mejora, a la vez que admiten la posibilidad de eliminar o reducir los rubros que aportan menor valor agregado.

Los direccionadores de costos son las formas como las actividades consumen los recursos y establecen la relación entre ellos (recurso que se utiliza y actividad), lo cual se logra aplicar con las técnicas de tableros de control (*Balanced ScoreCard* (Cuadros y Tableros de Control) (Kaplan y otros, 1997) empleado a mantenimiento (RCMScorecard@, 2005 y Mather, 2005) o de signos vitales (*Vital Sign del Quantum Performance*) (Hronec, 1995). Además se utilizan de forma masiva los indicadores de clase mundial en el proceso de decisión, al comparar la relación disponibilidad-necesidad (demanda) (González, 2004).

A todo esto se suma la utilización de la técnica de *Árbol de decisiones* (o cuadro de decisiones del *FMECA*) (AMEF@, 2005) o *RCFA* (Stamatis, 1995) para definir el tipo de intervención más adecuada que se ha de aplicar. De tal manera que los costos totales sean los más bajos posibles, sin disminuir el grado deseado de calidad y atención, y dentro de los plazos prometidos de intervención a producción.

De todas formas es normal que las empresas evolucionen en su recorrido histórico por todas las etapas (o en algunas de ellas), de una u otra manera, con un desarrollo armónico acorde con el momento en que viven, tanto desde los aspectos técnicos como comerciales y de mercado.

Al final del proceso evolutivo aparece la gestión de activos como un sistema de administración de mantenimiento (operación, ingeniería de fábricas o de confiabilidad), que permite interrelacionar todos los departamentos de una empresa para trabajar de una forma integral, con el fin de optimizar todos los activos que se utilizan para el objetivo social de la empresa y para facilitar los procesos de producción y de mercadeo, con información total en tiempo real en una plataforma informática. Su utilización proporciona un valioso apoyo para los procesos estratégicos y operativos de la empresa, lo que la convierte en una herramienta eficiente para el aumento de la disponibilidad, la productividad y la minimización de los gastos.



Es normal que las empresas evolucionen en su recorrido histórico por todas las etapas, con un desarrollo armónico acorde con el momento en que viven, desde los aspectos técnicos, comerciales y de mercado.

²⁴ También denominados *direccionadores*.

La gestión de activos incorpora el concepto del ciclo de vida de los activos (LCC)²⁵, al colaborar a las empresas en la mejor utilización de sus recursos y a ajustarlos a la demanda actual y futura, a la vez que alarga la vida útil de las máquinas. El soporte que da la gestión de activos a lo largo de todo el ciclo de vida maximiza la utilización de los recursos en el tiempo, y ofrece la posibilidad de acortar el período de realización de un proyecto o de la ejecución de mantenimiento u operación.

La inversión monetaria que se utiliza en la gestión y la operación del mantenimiento representa un alto porcentaje del capital de trabajo total de la empresa, e incluso en ocasiones llega a ser tan alto como el capital requerido para la producción y el manejo de insumos y materias primas. Las inversiones en equipos son muy relevantes, pero es poco probable que sean suficientes por sí solas, por lo que requieren ir acompañadas de mucha inversión en infraestructura, gestión y operación.

Los costos asociados a los departamentos de mantenimiento son un rubro importante dentro del balance general de las empresas. El mayor porcentaje de los activos de una organización está representado por tierra, edificios y equipos, los cuales tienen un impacto directo sobre el valor neto de la compañía y la habilidad de ella para generar utilidades (Wrennall, y otros, 1994).

El EUREKA, estudio de *Benchmarking*²⁶ ya mencionado, muestra la influencia de las diferentes tecnologías y culturas empresariales sobre la gestión de mantenimiento. Por ejemplo, entre los años 1981 y 1991 en Dinamarca las compañías invierten en mantenimiento aproximadamente el 4,9% del valor de sus activos, cifra que posteriormente se incrementa desde 1991 hasta 2000, en un 0,6% (Thorsteinsson y otros, 1997 y Riis y otros, 1997). El estudio complementario del EUREKA - 93, liderado por Wireman, sobre industrias norteamericanas, muestra que ellas gastan en promedio anual en mantenimiento entre el 10 y el 15%. Dentro de los problemas que tienen las industrias aparecen: altos inventarios de repuestos, averías inesperadas, falta de control, deficiencia en la gerencia, etc. (Wireman, 1994, 2001).

Navarro y otros autores refieren que las industrias norteamericanas en general, cuando poseen estructuras fabriles con menos de cinco años de existencia, invierten alrededor de un 5% de sus ingresos en mantenimiento. Y que en la medida en que esta edad de equipos empieza a incrementarse también aumenta la inversión en el mantenimiento de su maquinaria, hasta alcanzar cifras cercanas al 15% de las ventas brutas.

Navarro cita varios datos sobre un estudio realizado en Inglaterra que revelan que el costo de mantenimiento allí oscila aproximadamente en el 17% anual del valor de las instalaciones. Un personal de mantenimiento próximo al 15% del total y un valor del 5% de las ventas (que coincide con el enunciado por Newbrough). En España el



Al final del proceso evolutivo aparece la gestión de activos, como un sistema de administración de mantenimiento que permite interrelacionar todos los departamentos de una empresa, para trabajar de una forma integral.

La inversión utilizada en la gestión y la operación del mantenimiento representa un alto porcentaje del capital de trabajo total de la empresa, e incluso en ocasiones es tan alto como el capital requerido para la producción y el manejo de insumos y materias primas.

25 Ciclo de vida económico, costos integrales a lo largo del proceso de vida del activo.

26 Significa aprender de los otros (personas o empresas), identificarlos, estudiarlos y mejorar con base en lo aprendido.



En los países en vías de desarrollo el rubro de mantenimiento es más alto que en las naciones desarrolladas. Para todos ellos se justifica darle el mayor apoyo logístico a mantenimiento, con el fin de optimizar los recursos económicos de la empresa.

Los aspectos económicos hacen de mantenimiento una de las áreas más relevantes en las empresas, pero no se queda atrás el factor tecnológico, debido a los avances técnicos y científicos en todos los campos de la ciencia y en los procesos de manufactura.

promedio es del orden del 10,5% del PIB²⁷ (Newbrough y otros, 1982 y Navarro, y otros, 1997).

Estos hechos denotan la importancia y el volumen económico tan relevante que se maneja en el área de gestión de mantenimiento, lo que induce a dedicar más esfuerzo de gestión y organización al tema de mantenimiento (Newbrough y otros, 1982). En Francia la inversión o los gastos de mantenimiento oscilan entre el 5 y el 8% de las ventas totales o del valor de los activos totales de la empresa (Sourís, 1992). En Suecia la industria manufacturera invierte en mantenimiento cerca del 15% en promedio (entre el 11 y el 30%) de los costos de producción (Ahlmann, 1987).

En los países en vías de desarrollo el rubro de mantenimiento es más alto que en las naciones enunciadas en párrafos anteriores. En general, para todos ellos se justifica darle el mayor apoyo logístico a mantenimiento, con el fin de optimizar los recursos económicos de la empresa, ya que el capital de trabajo es muy sensible al rubro de mantenimiento.

La gestión de activos permite obtener la máxima rentabilidad de los equipos de operación empresarial. Y ello se puede lograr de varias maneras; entre ellas: aumentar la demanda, disminuir los costos de fabricación, optimizar el apalancamiento financiero, mejorar los procesos logísticos y disminuir los costos de mantenimiento.

Los gastos de sostenimiento se pueden disminuir de diferentes formas. Entre ellas sobresalen la eliminación o el control de las fallas. Eso se logra con la utilización del análisis de fallas, *FMECA*, *RCFA*, *RPN* y mediante la ampliación de los tiempos entre mantenimientos. Este último se alcanza cuando se controla el factor Beta del CMD, debido a que se puede mantener el nivel de confiabilidad de los equipos aun al ampliar

los tiempos entre acciones de mantenimiento (siempre y cuando no vuelvan a aparecer fallas ya controladas anteriormente).

Si bien los aspectos económicos hacen de mantenimiento una de las áreas más relevantes en las empresas, no se queda atrás el factor tecnológico, debido a los avances técnicos y científicos mundiales en todos los campos de la ciencia. Y en especial en los procesos de manufactura, a través de los cuales se realiza la agregación de valor a servicios, productos y bienes masivos, al utilizar los equipos de producción, los cuales a su vez requieren el servicio de mantenimiento. Esto exige que se establezcan parámetros en el área de sostenimiento que puedan dar respuesta a estos nuevos requerimientos de las áreas de producción, suministros y distribución.

Para tal efecto se deben tener en cuenta nuevos desarrollos científicos y experimentales en el tema. Así como las más modernas técnicas de gestión y operación del mantenimiento, que mediante la aplicación de ciencias modernas, como la terotecnología, pueda enfrentar los nuevos retos tecnológicos del área.

27 PIB, Producto interno bruto.

Wireman define el mantenimiento como la última frontera. Quiere decir que es un nuevo descubrimiento, muestra su gran potencial en las empresas, y esboza su gran capacidad para contribuir a la mejora de la competitividad de las organizaciones.

Numerosas tecnologías y diferentes organizaciones industriales han influenciado en las conductas gerenciales de mantenimiento. Menciona que los grandes desarrollos, implementados en las industrias, obligan a la gestión de mantenimiento a ser un área de permanente aprendizaje tanto en el campo tecnológico como en el científico. En el presente, la tecnología y las organizaciones son las que definen las pautas de los sistemas gerenciales de mantenimiento (HajShirmohammad y otros, 2004; Thorsteinsson y otros, 1997 y Wireman, 1994, 2004).

2.8 DEFINICIONES Y SIGNIFICADOS

El papel de mantenimiento es incrementar la confiabilidad de los sistemas de producción al realizar actividades, tales como planeación, organización, control y ejecución de métodos de conservación de los equipos, y sus funciones van más allá de las reparaciones. Su valor se aprecia en la medida en que éstas disminuyan como resultado de un trabajo planificado y sistemático con apoyo y recursos de una política integral de los directivos (Mora, 1999).

Los elementos comunes encontrados en los países nórdicos indican que la gestión de mantenimiento necesita tener unos parámetros comunes para su buen funcionamiento. Tales como definir unos objetivos claros para su mejor funcionamiento, adoptar adecuados sistemas de información para la toma de decisiones, planear y controlar las actividades relevantes de mantenimiento, entrenar e investigar mucho alrededor de la gestión tecnológica de mantenimiento, etc. Todos estos parámetros se requieren para alcanzar niveles óptimos en sus procesos de mantenimiento industrial (Riis y otros, 1997 y HajShirmohammad y otros, 2004).

La prolongación o la recuperación de las funciones de la maquinaria está directamente relacionada con el mantenimiento. Sus objetivos son prevenir eventos indeseables y evitarlos, recobrar para el servicio los mecanismos que han fallado y, en general, asegurar la disponibilidad apropiada para la producción.

La función que cumple mantenimiento es la de procurar el buen estado de los equipos para la adecuada función de producir bienes en las organizaciones, mediante la sistematización de la información como el medio eficaz para el buen desempeño de la organización (Wireman, 2001 y Riis y otros, 1997).

Los doce principios más importantes en la gestión de mantenimiento, enunciados por la comisión EUREKA, son:



El papel de mantenimiento es incrementar la confiabilidad de los sistemas de producción al realizar actividades. Tales como planeación, organización, control y ejecución de métodos de conservación de los equipos.

La prolongación o la recuperación de las funciones de la maquinaria está directamente relacionada con mantenimiento. Sus objetivos son prevenir eventos indeseables, recobrar para el servicio los mecanismos que han fallado y asegurar la disponibilidad apropiada.

Principios básicos de mantenimiento.

CUADRO 2.1

Temas técnicos	Recursos humanos	Campo económico
* Servicios * Productos * Calidad de productos * Método de trabajos de mantenimientos * Manejo de materiales * Control de todas las actividades de mantenimiento	* Función de las relaciones internas * Función de las relaciones externas * Función de la organización de mantenimiento	* Estructura de mantenimiento * Economía en la gerencia de mantenimiento * Economía frente a la producción

2.9 GESTIÓN Y MANTENIMIENTO

La palabra *gestión* se relaciona con la dirección de empresas, aplicada a un sistema técnico y social cuya función básica es crear bienes o servicios que contribuyan a elevar el nivel de vida de la humanidad.

La expresión *empresa* se entiende como un conjunto formado por hombres, máquinas, tecnología, información, planeación y recursos financieros que procura alcanzar unos objetivos establecidos con antelación (eficacia y eficiencia), al manipular adecuadamente los recursos disponibles (eficiencia), a la vez que se protege la naturaleza con la mayor efectividad. La gestión es el integrador para lograr estas premisas (De Miguel, 1990).

La eficiencia con que la gestión de mantenimiento contribuye para alcanzar la producción total mediante la dotación de capacidades y la fiabilidad del parque industrial, se plasma al maximizar la disponibilidad de los equipos (Rey, 1996).

La gestión de una empresa se refiere a su administración, y está relacionada con las desagregaciones que hace Fayol: planear, organizar, dirigir, coordinar y controlar (Fayol y otros, 1996), las cuales se sintetizan abruptamente en general por las escuelas modernas de gestión en: planear, ejecutar y controlar.

La gestión involucra el concepto de conducción o dirección aplicada por diferentes personas a través de la organización, que en las empresas formales está diseminada en todos los niveles de la estructura y se ejerce en todas las divisiones de ella. La gestión no es propia de algo e incluye personas o grupos de personas.

En mantenimiento es necesario reconocer dos aspectos básicos: gestión y operación. La primera se refiere al manejo de los recursos, a su planeación y a su control, mientras que la segunda es la realización física del servicio de mantenimiento.



En mantenimiento es necesario reconocer dos aspectos básicos: gestión y operación. La primera se refiere al manejo de los recursos, a su planeación y a su control, mientras que la segunda es la realización física del servicio de mantenimiento.

Navarro, Pastor y Mugaburu enuncian que la gestión de mantenimiento debe enfocarse en dos direcciones: una de ellas es en la gestión que realiza mantenimiento con los demás departamentos enmarcado en los objetivos de la empresa y el segundo nivel en la gestión integral e interna, propia del departamento.

La primera de ellas define las pautas que se siguen en las buenas relaciones que debe tener mantenimiento para operar dentro de un marco integral de la empresa, con el fin de buscar mejores niveles de colaboración y de trabajo en equipo al seguir las pautas de la organización. En el segundo bloque de gestión integral interna depende exclusivamente de cómo disponga sus recursos productivos para generar un buen servicio de mantenimiento al menor costo posible y con la mayor calidad, mediante el logro de excelentes niveles de satisfacción al cliente.

Lorick se refiere a la gestión de mantenimiento como la organización de un área gerencial de mantenimiento que exige la necesidad de establecer sistemas de gestión y operación, mediante procesos, apoyándose en sistemas computarizados para manejar las actividades inherentes a mantenimiento.

Para implementar este proceso sistémico se requiere establecer una organización que permita gerenciar el sistema de mantenimiento, de tal forma que se pueda tener una planeación detallada global y específica de las rutas y actividades del mantenimiento por realizar. Así mismo utilizar el sistema de información para definir en forma anticipada todos los servicios y los recursos necesarios para la operación del mantenimiento. Instaurar metodologías que permitan el mejoramiento permanente tanto de las actividades como de la gestión. Conformar grupos interactivos de análisis y operación del mantenimiento. Desarrollar sistemas de monitoreo de todas las actividades y del control de la gestión global, incluidos sus costos, con permanentes reportes de indicadores de toda índole. Indudablemente todo esto contribuye a elevar la eficiencia (Lorick y otros, 1998 y González, 2004).

Sourís afirma que las diversas funciones para la gestión de mantenimiento parecen coincidir en que es el área encargada de asegurar a producción la disponibilidad de equipos, mediante la ponderación de las imperfecciones de diseño, de las obsolescencias tecnológicas y de la acción del tiempo. La gestión de mantenimiento debe estar enmarcada en los objetivos de la empresa, lo cual se concreta en un presupuesto según la actividad industrial de la empresa origen.

Las limitaciones de mantenimiento varían con el tipo de industria. Pero dependen de disponibilidad financiera, políticas de utilización del parque industrial, niveles de productividad, fiabilidad de los equipos, vida útil de los equipos, obsolescencia tecnológica de las máquinas, calificación y calidades del personal de mantenimiento²⁸.

Por otro lado, Reiter expresa que la gestión de mantenimiento debe proveer un sistema que planifique, organice, dirija, controle y administre todas las actividades inherentes al mantenimiento. A la vez que debe permitir un negocio eficaz, fiable, ágil, capaz de responder a las necesidades de producción, que procure la competitividad

28 La alta interrelación de mantenimiento y producción se ratifica en el hecho de que la gestión de mantenimiento depende de la tecnología de los equipos y del tipo de actividad industrial y organización, a la que pertenecen.



El esquema moderno de mantenimiento implica la vinculación de herramientas propias de la gestión. Y el concepto integral se maneja desde la base de utilizar en forma eficaz y eficiente los factores productivos en forma individual y conjunta.

y la productividad de la empresa y que propicie la activa participación de sus empleados (Reiter y otros, 1994).

El esquema moderno de mantenimiento implica la vinculación de herramientas propias de la gestión. Y el concepto integral se maneja desde la base de utilizar en forma eficaz y eficiente los factores productivos en forma individual y conjunta, para aplicarlos mediante una adecuada gestión de mantenimiento (correctiva, modificativa, preventiva, predictiva o combinación de ellas). Con la definición de metas concretas que se deben lograr en cada una de las variables importantes de mantenimiento, al utilizar el concepto de servicio al cliente. Para centrar la organización en el desarrollo de habilidades y competencias esenciales en el recurso humano motivado. Para satisfacer los requerimientos del usuario de mantenimiento interno o externo (Mora, 2007b).

Se resalta la importancia de que mantenimiento deja de trabajar bajo el enfoque de manejar un presupuesto a tener que salir a buscar sus propios ingresos. Para eso debe desarrollar estrategias de mercadeo que le permitan alcanzar niveles de productividad y competitividad (Dounce, 1998), mediante el establecimiento de planes estratégicos de alta dirección, como empresa independiente que tiende a convertirse en generadora de ingresos propios y adicionales a la empresa de su origen.

La gestión de mantenimiento contempla la planeación, la organización, la coordinación, la dirección, la ejecución y el control de todas las actividades inherentes a mantenimiento, con el fin de cumplir su misión.

2.10 FUNCIÓN Y OBJETIVO DE MANTENIMIENTO

Según Albert Ramond y Asociados (Estados Unidos de América), la función principal de mantenimiento es maximizar la disponibilidad que se requiere para la producción de bienes y servicios, al preservar el valor de las instalaciones. Para minimizar el deterioro de los equipos, lo cual se debe lograr con el menor costo posible y a largo plazo (Newbrough y otros, 1982).

El objetivo de mantenimiento es: "...conseguir un determinado nivel de disponibilidad de producción en condiciones de calidad exigible, al mínimo coste, con el máximo nivel de seguridad para el personal que lo utiliza y lo mantiene y con una mínima degradación del medio ambiente. Al conseguir todos estos puntos se está ante una buena gestión integral de mantenimiento" (Navarro y otros, 1997).

Si bien es cierto que esta definición tiene un buen cubrimiento, deja por fuera aspectos tan importantes como la libertad del cliente, para optar por un mantenimiento propio o subcontratado. Además de que no contempla el enfoque de mantenimiento frente al estado de avance de la organización y es indiferente al nivel tecnológico de los equipos. A pesar de que enuncia la palabra integral no dimensiona la posibilidad de que el servicio de mantenimiento atienda a clientes externos e internos no tradicionales, como aprovisionamiento y distribución.

La función de mantenimiento, según la fuerza marítima de los Estados Unidos, es definida a través de la oficina de operaciones navales de la Marina de Guerra en 1969, en su documento 3M, como la ejecución de todas las actividades inherentes de mantenimiento que contribuyan al funcionamiento continuo de los sistemas productivos, de los equipos de proceso, dentro de las características originales de diseño, conservándolos en un estado óptimo corporal para una utilización más racional, mediante un uso efectivo y eficiente del presupuesto y del personal de ingeniería de conservación (Mora, 1999).

En síntesis, la misión principal de mantenimiento es garantizar que el parque industrial esté con la máxima disponibilidad cuando lo requiera el cliente o usuario. Con la máxima confiabilidad y fiabilidad, durante el tiempo solicitado para operar. Con las velocidades requeridas, en las condiciones técnicas y tecnológicas exigidas previamente por el demandante, para producir bienes o servicios que satisfagan sus necesidades, deseos o requerimientos. Con los niveles de calidad, cantidad y tiempo solicitados, en el momento oportuno al menor costo posible. Y con los mayores índices de productividad y competitividad posibles para optimizar su rentabilidad. Es decir, para generar mayores ingresos.

También debe analizarse la capacitación y la culturización de los clientes, mediante un enfoque integral logístico²⁹ que utilice una estrategia coherente con la empresa (Mora, 2007b).



La misión principal de mantenimiento es garantizar que el parque industrial esté con la máxima disponibilidad cuando lo requiera el usuario, durante el tiempo solicitado para operar, con las velocidades requeridas, en las condiciones técnicas y tecnológicas exigidas previamente.

RESUMEN

En esta primera parte se describe de una forma estructurada y sucinta la historia de diferentes hechos que inciden en los criterios fundamentales del mantenimiento y de la producción industrial de la actualidad. Y la vez presenta los diferentes eventos y sucesos que definen la estructura fundamental y organizacional de una división de mantenimiento industrial. Con lo cual el lector puede construir sus conceptos mentales sobre los criterios y parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de implementar la gestión y la operación del mantenimiento en el ámbito empresarial, con el fin de que sean efectivas en resultados.

²⁹ Se refiere a la logística como el área del conocimiento que procura los recursos físicos y humanos requeridos para agregar valor. Lo cual se involucra totalmente al mantenimiento logístico integral estratégico.

PREGUNTAS, DESARROLLOS, FOROS Y EJERCICIOS

- Según su criterio, establezca al menos cinco etapas del mantenimiento industrial, caracterizando cada una de ellas con los principales conceptos que se dan en cada etapa evolutiva.
- Considera usted que mantenimiento debe actuar como una entidad de servicio o de producción. Explique al menos tres razones técnicas para ello.
- Según la OIT, ¿cuáles son las funciones principales del departamento o la unidad de mantenimiento en una empresa? Enuncie al menos tres y describa su explicación y aplicación.
- Construya una definición moderna de mantenimiento, a partir de las diferentes opiniones y conceptos, de los distintos autores descritos en esta parte y, argumente su enunciado.
- Argumente al menos cinco hechos históricos de mantenimiento. Explíquelos y sustente su incidencia en la estructura que debe tener una división de mantenimiento, en la actualidad, desde la óptica: funcional, operativa, organizacional, de servicio al cliente, complejidad, de gestión, operación y metodología de ejecución de trabajos, que garantice la efectividad del mantenimiento.

ENFOQUE SISTÉMICO E INTEGRAL-CMD

SEGUNDA PARTE

OBJETIVOS

Revisar los principios fundamentales, las estructuras, las normas, las relaciones, etc., entre los actores relevantes del mantenimiento industrial, bajo una concepción sistémica kantiana e integral, que permita su control mediante la medición de sus principales parámetros universales: confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, bajo estándares internacionales y con base en las mejores prácticas mundiales, con el fin de alcanzar el éxito estratégico, mediante la utilización de un modelo estandarizado de cálculos y predicción del CMD, al menos hasta la etapa de Alineación – Nivel 2 – Comprender – Escala de Bloom, Barret y Gagné (Gagné y otros, 2008).

INTRODUCCIÓN

La segunda parte de este libro procura que el lector vislumbre los elementos fundamentales del mantenimiento industrial y sus interrelaciones, bajo un enfoque integral, moderno y diferente de los modelos clásicos, de tal manera que facilite la comprensión con el fin de optimizar sus recursos para su gestión y operación, a la vez que pueda controlar con los más excelsos indicadores de éxito del mantenimiento, como lo son: confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, bajo parámetros y metodologías internacionales.

El mantenimiento industrial puede definirse como una ciencia, ya que cumple todos los requisitos definidos para ello por la Real Academia Española (RAE), la cual define que un conjunto de conocimientos obtenidos a través de la observación, del estudio, de la experiencia y del razonamiento, debidamente estructurados en forma sistémica y de los cuales se pueden deducir principios, leyes generales, comportamientos y predicciones, etc., permiten constituir una ciencia (RAE, 2005).

Por su parte, Grijalbo y Mondadori complementan la definición de ciencia en los términos siguientes:

Ciencia. f. Tipo de conocimiento lógicamente estructurado sobre un conjunto grande, amplio de fenómenos que, enfocados bajo un determinado punto de vista, aparecen íntimamente relacionados; engloba definiciones, postulados y leyes enmarcadas en una teoría con que se intenta describir la estructura de una parte de la realidad a la que remite en último extremo su objetividad a través de la verificación, la predicción y, en algunos casos, la técnica (Grijalbo, 2000).

En general, el mantenimiento cumple con todas las condiciones descritas, ya que posee un amplio y diverso conjunto de conocimientos derivados de la práctica industrial, del estudio de numerosos autores mundiales y locales acerca del tema, del establecimiento de diferentes principios y leyes generales de aceptación universal, y de definiciones amplias y específicas sobre los múltiples aspectos relacionados con ella.

En cuanto a la presentación lógica, estructurada y coherente de conocimientos, es el enfoque que el autor sustenta y demuestra a través del contenido, con un enfoque sistémico kantiano¹ que soporta toda la organización del documento y el cual permite una fácil comprensión y una aplicación empresarial de todos los conceptos y métodos prácticos que se presentan.

¹ De Immanuel Kant; el filósofo alemán elabora una Teoría del conocimiento que se basa primero en la intuición sensible, después en la razón.

El considerar el mantenimiento como una ciencia permite su tratamiento profundo, serio, coherente y estructurado, de tal forma que todos los conocimientos que se desarrollan sean realizables y útiles a los lectores.

En esta parte se dan las bases y los conceptos fundamentales para comprender en forma global y específica todos los temas relevantes del mantenimiento aplicado, al utilizar los diversos desarrollos mundiales, y las mejores prácticas internacionales.

A partir del enfoque kantiano, el mantenimiento es susceptible de sintetizar y de categorizar en diferentes niveles con sus elementos de relación estructural. Por tanto en esta parte se trata el mantenimiento como una ciencia que data desde los confines de la existencia del ser humano sobre la tierra, cuando utilizaba utensilios y herramientas simples y complejas, que le ayudaban en su supervivencia individual y colectiva.

Bajo esta perspectiva sistémica se pueden unificar los conceptos, pensamientos y diferentes aspectos del mantenimiento, hasta la fecha tratados bajo esquemas diferentes; para ello se adopta una metodología integradora que facilita su concepción y su aplicación empresarial.

CONOCIMIENTOS PREVIOS REQUERIDOS

La persona que desee abordar la lectura de esta segunda parte debe tener claridad sobre los conceptos básicos de mantenimiento y operación, a la vez que se obliga a manejar con claridad la estructura organizacional de ambos departamentos en las empresas; debe tener habilidades fundamentales en la obtención, el manejo y el procesamiento de datos e información técnica sobre los tiempos de operación y mantenimiento en sistemas industriales. Necesita conocer y manejar las funciones fundamentales de distribuciones y saber generar cálculos matemáticos seguros y precisos, mediante el seguimiento paciente y riguroso de la metodología propuesta en esta parte para la medición y la predicción confiable de los indicadores CMD.

CAPÍTULO 3

SISTEMA KANTIANO DE MANTENIMIENTO

El enfoque sistémico kantiano plantea la posibilidad de estudiar y entender todo fenómeno, dado que define que un sistema está compuesto básicamente por tres elementos: personas, artefactos y entorno.

En todo sistema es fundamental la participación de las personas, ya que ellas son las que hacen que el sistema exista, y son las que le dan ese carácter real, en forma contextual, de forma mental².

Indudablemente, el mantenimiento es un sistema mental que se construye de forma intelectual por el ser humano, y que los elementos de un sistema kantiano son los artefactos³ que, en el caso particular del mantenimiento, constituyen el conjunto de máquinas, componentes, sistemas de producción, herramientas, utensilios, líneas de fabricación, documentos como órdenes de trabajo o historia de los equipos, aparatos, materias primas, insumos, repuestos, sistemas de información, etc., los cuales son elementos reales requeridos para hacer el mantenimiento.

El tercer componente de un sistema kantiano es el entorno, el cual es de carácter mental (o intelectual) y corresponde a todos aquellos sitios en donde se desenvuelve la naturaleza del sistema, y en donde se encuentran las máquinas que hacen posible la producción de bienes reales o de servicio (Chiavenato, 2005).

El enfoque kantiano permite visualizar y probar la existencia de relaciones entre diferentes elementos de un sistema real o mental, y para el caso del mantenimiento se reconoce la existencia de diferentes elementos que se entrelazan. Entre ellos se pueden nombrar las *personas*, que son directos usuarios o explotadores de los equipos de fabricación, los productores y los que preservan el activo o máquina denominados *mantenedores*. En cuanto a los artefactos, en este grupo se incluyen todos



El mantenimiento cumple con todas las condiciones descritas para ciencia, pues posee un diverso conjunto de conocimientos derivados de la práctica industrial, del estudio de autores mundiales y del establecimiento de diferentes principios y leyes de aceptación universal.

El considerar el mantenimiento como una ciencia permite su tratamiento profundo, serio, coherente y estructurado, de tal forma que todos los conocimientos que se desarrollan sean realizables y útiles a los lectores.

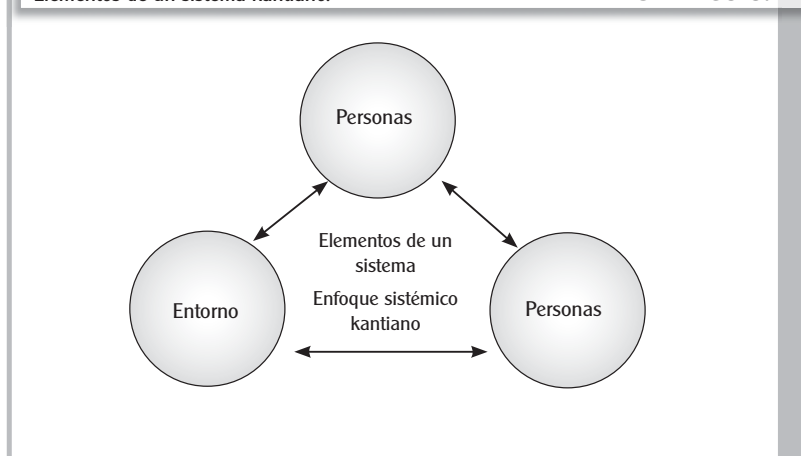
2 Parece ser que este entendimiento mental es exclusivo de los seres humanos.

3 La RAE lo define como palabra derivada del latín *arte factus* que significa hecho con arte.

los equipos o elementos productivos directos o indirectos que se describen en el texto. Por último, el entorno es el que comprende los sitios de producción, como fábricas fijas o móviles, por un lado y, por el otro, también incluye los espacios donde se prestan los servicios de mantenimiento.

Elementos de un sistema kantiano.

GRÁFICO 3.1



A partir del enfoque kantiano, el mantenimiento es susceptible de sintetizar y de categorizar en diferentes niveles con sus elementos de relación estructural.

Al utilizar el enfoque kantiano en un sistema básico de producción se pueden reconocer tres elementos: productores (personas), fábricas (entorno) y máquinas (artefactos), los cuales interactúan y permiten la elaboración industrial de bienes o servicios.

El modelo de la teoría de sistemas define a los departamentos de las empresas, como módulos administrativos independientes (mantenimiento, producción, etc.), a los cuales los denomina unidades, y éstos a su vez conforman un sistema con metas propias individuales y comunes al sistema (empresa). Un sistema es un conjunto de unidades recíprocamente relacionadas (Bertalanffy, 1994). Las unidades a su vez se pueden considerar como elementos de un sistema cuando se encuentran relacionadas entre sí por alguna forma de interacción o interdependencia (Chiavenato, 2005).

Los objetivos específicos para una unidad, por lo general, buscan los mayores beneficios mediante la maximización de las utilidades y la reducción de los posibles desperdicios de insumos o materias primas durante el proceso industrial, con una adecuada utilización de los recursos disponibles. El concepto de departamento de mantenimiento se resume en la prestación de un buen servicio para las instalaciones y el equipo para reducir al mínimo las paradas de máquinas por fallas imprevistas, lo cual es posible si se incrementa la eficacia en el empleo de dichos elementos y de los recursos humanos, con el menor costo posible (Newbrough y otros, 1982).

Con el fin de entender la aplicación de estos conceptos a un sistema de mantenimiento, se aplican de forma individual e independiente a los departamentos de operación y de sostenimiento de maquinaria,

para posteriormente usarlos en un sistema integral industrial, de tal forma que se pueda visualizar la interacción de ambas unidades y el sistema global unificado de mantenimiento empresarial.

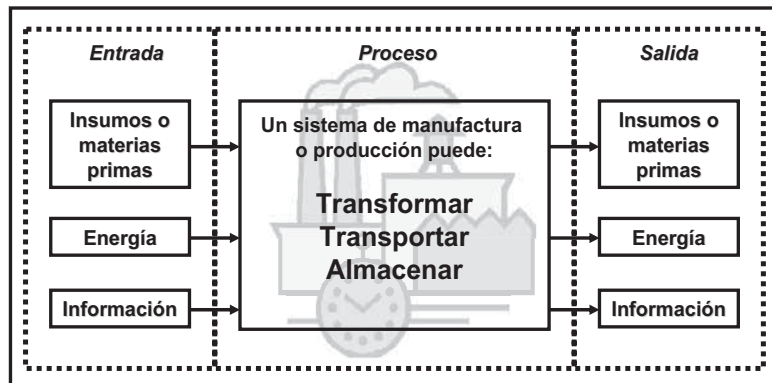
3.1 UNIDAD DE PRODUCCIÓN

Al utilizar el enfoque kantiano en un sistema básico de producción se pueden reconocer tres elementos: productores (personas), fábricas (entorno) y máquinas (artefactos), los cuales interactúan y permiten la elaboración industrial de bienes y/o servicios.

La función propia de un sistema de producción es lograr la agregación de valor, a partir de tres acciones básicas: transformación, transporte o almacenamiento, las cuales pueden estar presentes en forma combinada; es difícil encontrarlas puras en los procesos industriales. Por ejemplo, en la generación hidráulica de energía eléctrica se puede pensar que la acción fundamental es transformar. Sin embargo, es necesario almacenar y transportar la energía como parte de la acción de producción energética. En el caso de una fábrica textil se entiende que la acción más relevante es transformar pero, igual que la anterior, requiere almacenamiento y transporte para ser completada la elaboración de textiles o derivados. En una oficina estatal de registros de nacimiento y de los demás actos de la sociedad, básicamente se almacena información pero exige la transformación y el transporte para ser utilizada por y para los ciudadanos. En un sistema de transporte de mercancías en forma simultánea se desarrolla la acción de almacenamiento.

Sistema de agregación de valor fabril, empresarial o de servicios.

GRÁFICO 3.2

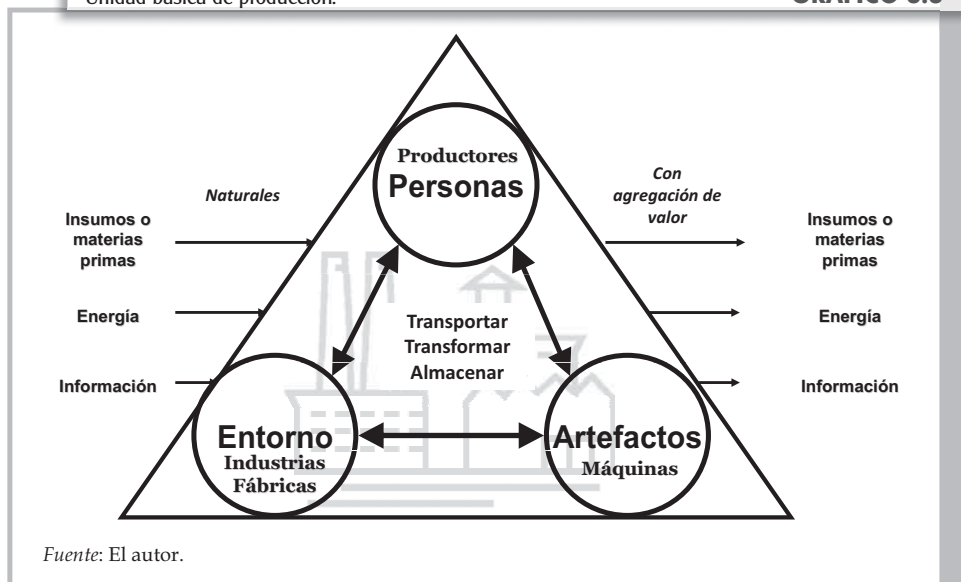


Fuente: El autor.

Las acciones básicas de producción son susceptibles de utilizar en insumos o materias primas (productos en proceso o terminados), información o energía. Un proceso de manufactura se logra al aplicarle acciones que le permitan transformar y/o transportar y/o almacenar.

Unidad básica de producción.

GRÁFICO 3.3



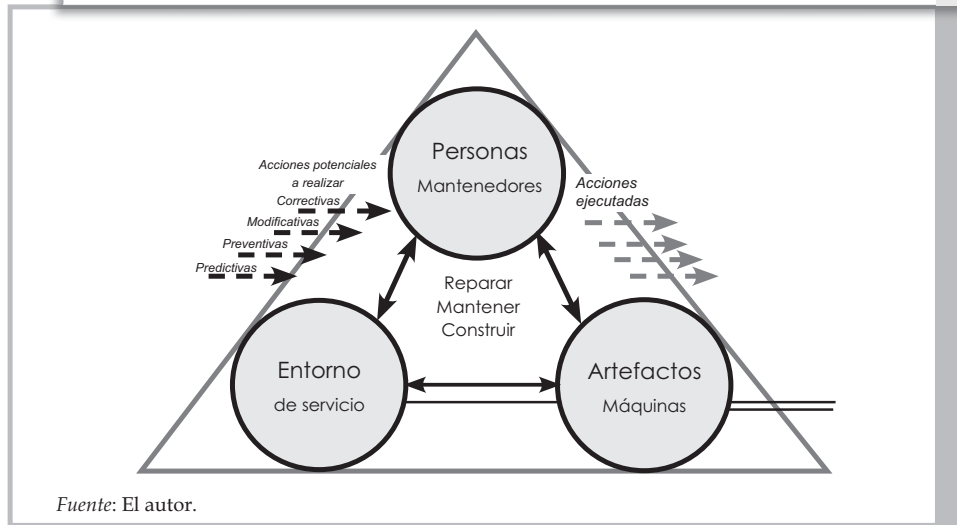
3.2 UNIDAD DE MANTENIMIENTO

El enfoque sistémico puro, cuando se utiliza en mantenimiento, parece admitir el reconocimiento de tres elementos fundamentales: mantenedores (personas), máquinas o equipos industriales o de operación (artefactos) y sitios físicos en donde se prestan los servicios de mantenimiento (entorno).

Para hallar la función básica de un sistema de mantenimiento es posible utilizar la definición de ingeniería que se describe en la clasificación internacional uniforme de ocupaciones (CIUO) de la OIT, donde se enuncia que algunas de las funciones de los arquitectos, ingenieros y afines son construcción, reparación y mantenimiento de edificios, obras públicas, etc., y en especial de aplicaciones industriales como máquinas y equipos, entre otras (OIT-CIUO-88, 1988). Con esta premisa se entiende que el mantenimiento es una ciencia que se aplica en elementos, máquinas o sistemas productivos que genera el ser humano, y cuyo fin es preservar los equipos industriales mediante su construcción, reparación o mantenimiento.

Unidad elemental de mantenimiento.

GRÁFICO 3.4



Fuente: El autor.

La construcción figura como elemento estructural en el esquema sugerido por Rey Sacristán para comprender el marco del mantenimiento terotecnológico (Husband, 1976; Darnell, y otros, 1975; Thompson, 1980), donde los usuarios AOD, los constructores, compradores y demás entidades o personas relacionadas con el cuerpo o la función de equipos industriales, son vitales en el diseño de esquemas de gestión de mantenimiento.

El mantenimiento y la reparación son partes esenciales del objeto de estudio (mantenimiento) en ingeniería de fábricas, donde se entiende que la función de mantenimiento depende del ciclo de vida de las máquinas (en sus tres etapas: mantenimiento, reparación o sustitución) y de la situación de reparación, como una especie de mantenimiento especializado en un estado de uso (o abuso) más avanzado del equipo; es decir, con una mantenibilidad más reducida (Ávila, 1992).

Las tareas descritas (construir, mantener y reparar) que se enuncian en el libro CUIO-88, son aplicadas a: “edificios, obras públicas, ciudades, zonas urbanas, otras obras propias de la ingeniería, o de la ingeniería mecánica y afines, y sus aplicaciones industriales (estructuras, instalaciones, máquinas y equipos⁴), sistemas y métodos de extracción de petróleo, gas natural y otros minerales o agua, de separación de metales y de refinación y tratamiento; procesos mecánicos, químicos o de otra índole” (OIT-CUIO-88, 1988).

El enfoque sistémico puro cuando se utiliza en mantenimiento, parece admitir el reconocimiento de tres elementos fundamentales: mantenedores, equipos industriales y sitios físicos donde se prestan los servicios de mantenimiento.

4 Estos tres últimos elementos son los objetos donde se concretan las tareas y las actividades de

Funciones primarias de mantenimiento.

GRÁFICO 3.5



El mantenimiento y la reparación son partes esenciales del objeto de estudio en ingeniería de fábricas, donde se entiende que su función depende del ciclo de vida de las máquinas en sus tres etapas: mantenimiento, reparación o sustitución.

Ahora, si se encuentran los elementos comunes entre las unidades de producción y mantenimiento, su estudio se puede enfocar con mayor precisión, al igual que permite obtener un sistema más macro e integral, que pertenece al concepto ingeniería de fábricas que contiene ambas divisiones de ingeniería: la de operación y la de sostenimiento.

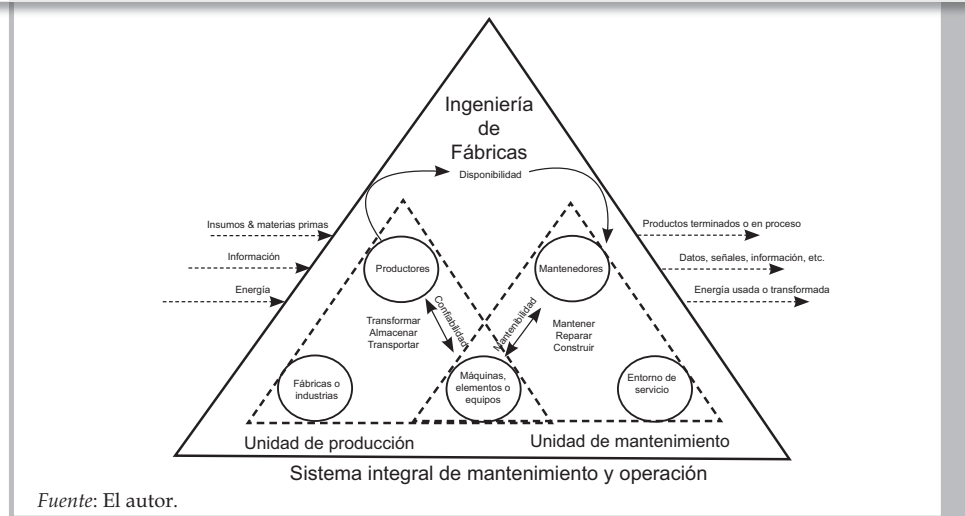
3.3 SISTEMA INTEGRAL DE MANTENIMIENTO

Con el fin de determinar los actores principales de la ingeniería de fábricas, en el *Gráfico 3.6* se presenta la ilustración de los elementos superpuestos de las dos funciones básicas. El sistema integrado permite visualizarlos en un sistema de ingeniería de fábricas, que son los mantenedores, los productores y las máquinas; de esta forma se pueden establecer las primeras leyes de mantenimiento, en las cuales el sistema kantiano permite establecer que la relación entre producción y máquinas está gobernada por la confiabilidad, la correspondencia entre el mantenimiento y las máquinas se estipula por la mantenibilidad, y que la relación mantenimiento-máquina-producción⁵ se define por la disponibilidad, que es el efecto integrado de la ingeniería de fábricas, donde se marca como el efecto o el parámetro más relevante del sistema.

⁵ Nótese que no es una relación cerrada sino abierta en mantenimiento y producción, los cuales se relacionan a través de las máquinas y no en forma directa.

Sistema integrado de ingeniería de fábricas: mantenimiento-máquinas-producción.

GRÁFICO 3.6



Fuente: El autor.

Entonces, se puede afirmar que el enfoque sistémico kantiano de mantenimiento, que se define como ingeniería de fábricas, establece que la relación entre los tres elementos es permanente o cerrada entre máquinas (parque industrial) y los otros dos participantes (mantenimiento y operación), pero es abierta entre estas dos, de tal forma que las mejores prácticas indican que la relación entre mantenimiento y producción debe hacerse con los equipos⁶ y no en forma directa, ya que carece de sentido si no se habla de máquinas y de su comportamiento en el tiempo frente a sus fallas y a su disponibilidad.

El mantenimiento es el elemento que comprende a las personas que ofrecen y prestan el servicio de conservación de equipos a los departamentos o empresas que producen bienes o servicios, mediante los recursos de que disponen.

La producción AOD es el elemento que requiere y demanda el servicio de mantenimiento de los equipos que utiliza, para producir bienes o servicios.

El parque industrial es el conjunto de elementos, equipos, artefactos, objetos, herramientas o líneas de producción⁷, que se utilizan para la agregación de valor en los productos o servicios.

El tratamiento del mantenimiento (como una ciencia) permite sintetizar sus elementos principales en tres: producción, máquinas y



El enfoque sistémico kantiano establece que la relación entre los tres elementos es permanente o cerrada entre parque industrial y mantenimiento y operación, pero abierta entre estas dos, de modo que las mejores prácticas indican que la relación entre mantenimiento y producción debe hacerse con los equipos.

El mantenimiento es el elemento que comprende a las personas que ofrecen y prestan el servicio de conservación de equipos a los departamentos o empresas que producen bienes o servicios, mediante los recursos de que disponen.

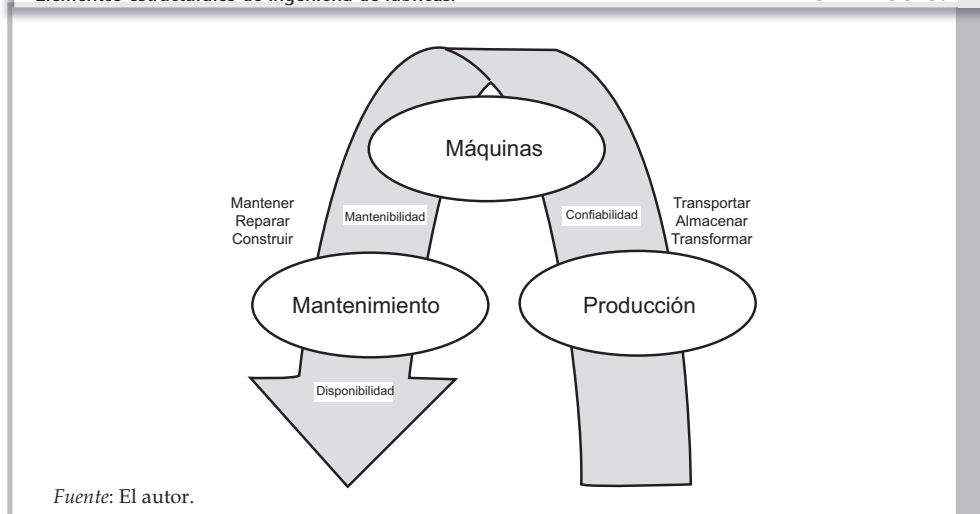
6 Es decir que la comunicación y las conversaciones entre mantenedores y productores deben referirse en todo momento a las máquinas, y no tratarse directamente mantenimiento y producción.

7 Donde se aplican las distintas acciones o tareas de mantenimiento.

mantenimiento; a la vez admite su jerarquización en niveles de categorías (Bertalanffy, 1994; Whorf, 1952, 1953 y Uexcüll, 1920) y establece las relaciones y las condiciones entre sus tres elementos.

Elementos estructurales de ingeniería de fábricas.

GRÁFICO 3.7



El parque industrial es el conjunto de elementos, equipos, artefactos, objetos, herramientas o líneas de producción que se utilizan para la agregación de valor en los productos o servicios.

El tratamiento del mantenimiento como ciencia permite sintetizar sus elementos principales en tres: producción, máquinas y mantenimiento; a la vez admite su jerarquización en niveles de categorías y establece las relaciones y las condiciones entre sus tres elementos.

3.3.1 Categorización del mantenimiento

El enfoque kantiano admite definir las categorías de la ingeniería de fábricas, como una metodología científica que establece los parámetros jerárquicos (Whorf, 1952) que definen las diferentes temáticas conceptuales; esta jerarquización permite unificar el lenguaje del tema con el fin de facilitar su estudio, tratamiento y aplicación empresarial.

Las categorías son divisiones jerárquicas que permiten simplificar el tratamiento profundo de los diferentes conceptos que facilitan su organización, que consiente en el análisis de sus diferencias y similitudes, para la estructuración total de los diferentes temas que los conforman.

Una primera aproximación a la categorización del mantenimiento, se encuentra instituida por la casa noruega ESReDa en su *Manual Handbook* (ESReDa, 2001) donde se establecen tres niveles: táctico, operativo y estratégico para presentar una adecuada clasificación para diversas tareas, acciones y temas del mantenimiento.

La ESReDa establece que normalmente los departamentos no tienen muy definida su estructura organizacional y menos sus costos sistémicos. La función de mantenimiento tiene una alta influencia en la rentabilidad de las empresas y en la ingeniería integradora de plantas.

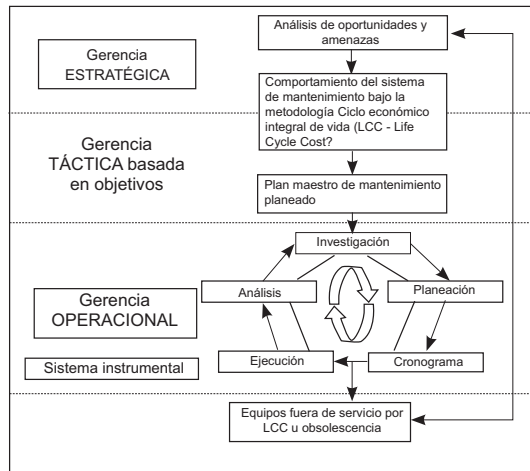
Los controles gerenciales deben apuntar a las metas definidas, a los procesos establecidos y en especial a las estrategias que se plantean, lo cual hace que las empresas descubran nuevas oportunidades de mercado, mantenimiento y producción, al integrar todos los recursos con las decisiones estratégicas que se toman, de tal manera que todo se haga en un enfoque global y específico (ESReDa, 2001). En general la casa ESReDa establece tres niveles⁸ donde se desarrollan todas las actividades y gestiones de mantenimiento.



Los controles gerenciales deben apuntar a las metas definidas, a los procesos establecidos y a las estrategias que se plantean, lo cual hace que las empresas descubran nuevas oportunidades de mercado, mantenimiento y producción.

Niveles de mantenimiento de la casa ESReDa.

GRÁFICO 3.8



Fuente: ESReDa, 2001.

Si bien la ESReDa es un buen acercamiento a la síntesis del mantenimiento, se deben instaurar lazos más fuertes para darle solidez a este concepto, en el cual se fundamentan todo el tratamiento y la aplicación de la ciencia de mantenimiento (ESReDa, 2001).

El enfoque kantiano se fundamenta en las concepciones de espacio y tiempo; por eso es necesario identificar las acciones tanto del espacio como del tiempo sobre las máquinas durante su vida útil.

Parece ser que la acción del tiempo⁹ afecta más los componentes o elementos corpóreos de las máquinas, y la acción del espacio se entiende mejor en la tecnología que portan las máquinas, denominadas alma de los equipos, y la cual consiste en la función principal para la cual éstas son diseñadas (ESReDa, 2001).

⁸ Los niveles se muestran en la parte izquierda de la Ilustración correspondiente.

⁹ Espacio y tiempo del enfoque sistémico kantiano o de la terotecnología.



El mantenimiento enfocado bajo los parámetros de espacio y tiempo, de Immanuel Kant, suministra la comprensión de la función del sostenimiento y/o la preservación de los equipos.

La función de mantenimiento se entiende como sostener o alargar la vida útil de los elementos o equipos de producción, y atiende dos componentes básicos de éstos: el cuerpo y la función.

Las actuaciones que se hacen en términos del tiempo, para restituir el equipo a sus condiciones normales de operación (o diseño), dan lugar a la clasificación que se hace de las acciones de mantenimiento: antes o después de la falla.

3.3.2 Cuerpo y función de los equipos. Efectos del espacio y del tiempo

El tratamiento que realiza el autor Enrique Dounce Villanueva acerca del tema es una aproximación importante; él considera que se distinguen dos actividades básicas en la conservación de los equipos industriales: preservación y mantenimiento. Define la conservación como “toda acción humana que, mediante la aplicación de conocimientos científicos y técnicos, contribuye al óptimo aprovechamiento de los recursos existentes en el hábitat humano y propende hacia el desarrollo integral del hombre y la sociedad”. Divide la conservación en dos grandes ramas: una de ellas es la preservación (la cual atiende las necesidades de los recursos físicos) y la otra es el mantenimiento (que se encarga de cuidar el servicio que proporcionan estos recursos) (Dounce, 1998).

El mantenimiento enfocado bajo los parámetros de espacio y tiempo, de Immanuel Kant, suministra la comprensión de la función del sostenimiento y/o la preservación de los equipos.

La función de mantenimiento se entiende como sostener o alargar la vida útil de los elementos o equipos de producción, y atiende dos componentes básicos de éstos: el cuerpo y la función. El efecto que realiza el tiempo (con el espacio invariable) sobre los artefactos o equipos está más asociado con el deterioro de los elementos corpóreos¹⁰, al actuar como causante de desgaste o de falla parcial o total en las máquinas.

A diferencia de la acción del espacio (con el tiempo inactivo) que afecta la función se identifica en términos de la tecnología usada en los diferentes equipos que prestan la misma función a través del tiempo¹¹; particularmente se asocia a la falla total o parcial de la función para la cual son diseñadas las máquinas o el parque industrial¹². Se concibe que dos agentes pueden afectar la vida útil (tanto en cuerpo como en función): el ser humano y el medio ambiente, que deterioran los equipos o los ponen en estado de falla parcial o total.

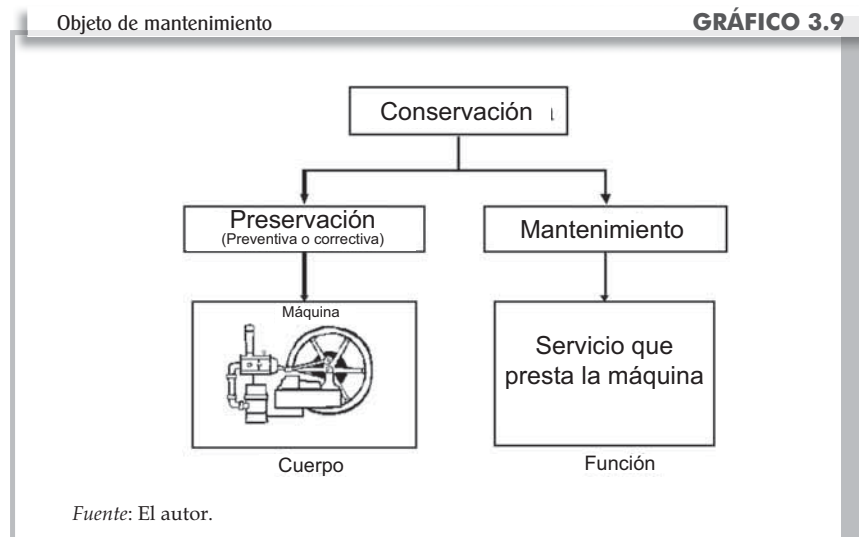
Las actuaciones que se hacen en términos del tiempo, para restituir el equipo a sus condiciones normales de operación (o diseño), dan lugar a la clasificación que se hace de las acciones de mantenimiento: antes o después de la falla.

La acción del espacio kantiano hace que cada vez las tecnologías de los equipos sean más complejas y modernas, lo que implica para mantenimiento una mayor utilización de técnicas y prácticas más profundas, más fuertes, más científicas y con mayor uso de informática y tecnología.

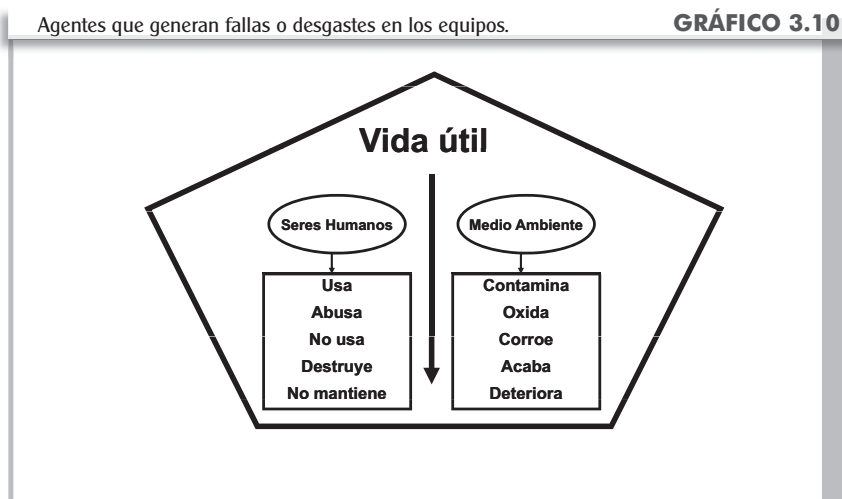
10 Corpóreos, para denotar que forman parte del cuerpo y siempre son de índole material.

11 Dejando el tiempo constante, como si no existiera.

12 Parque industrial, conjunto de elementos, máquinas, equipos, instalaciones fabriles, etc.



En el *Gráfico 3.11* se ilustra el efecto del espacio y del tiempo (enfoque kantiano) sobre los equipos, que la máquina utilizada siempre desempeña la misma función, escribir; lo que cambia es su componente tecnológico (más complejo, al lado derecho). El espacio es el componente requerido para que cada día se afinen y se desarrollen más las tácticas de mantenimiento, como el *TPM*, *RCM*, *TPM* y *RCM* Proactivo, *PMO* Reactivo, Clase mundial, Centrado en objetivos, *RCM ScoreCard*, entre otros.



Efecto del espacio y del tiempo (enfoque kantiano) sobre los equipos.

GRÁFICO 3.11



Fuente: El autor.

3.3 NIVELES DEL MANTENIMIENTO

Se plantean cuatro niveles o categorías al jerarquizar los diferentes tópicos que maneja el mantenimiento.

Niveles y categorías del mantenimiento bajo enfoque sistémico.

GRÁFICO 3.12



Fuente: El autor.

Nivel 1 - Instrumental (funciones y acciones)

El nivel instrumental abarca todos los elementos reales requeridos para que exista mantenimiento en las empresas; procura el manejo sistémico de toda la información construida, solicitada en un sistema de mantenimiento en lo referente a las relaciones entre *personas, recursos productivos y máquinas*. A este grupo pertenecen a todos los registros, documentos, historia, información, codificación, entre otros; en general todo lo que identifica a los equipos, a los recursos de AOD y de mantenimiento; la administración de la información y su tratamiento estadístico; la estructura organizacional de los tres elementos descritos de un sistema de mantenimiento. En este nivel también clasifican instrumentos más avanzados como las 5S, el mejoramiento continuo, etc., y herramientas avanzadas específicas y de orden técnico, como análisis de fallas, manejos de inventarios, pronósticos, etc.

El nivel instrumental comprende todos los elementos necesarios para que exista un sistema de gestión y operación de mantenimiento, e incluye: información, máquinas, herramientas, repuestos, utensilios, materias primas e insumos propios de mantenimiento, las técnicas, los registros históricos de fallas y reparaciones, inversiones, inventarios, refacciones, modificaciones, trabajadores, personas, entrenamiento y capacitación de funcionarios, entre otros.

Dentro de esta categoría se pueden encontrar diferentes niveles en cuanto a instrumentos: básicos, avanzados genéricos y específicos, como también específicos de orden técnico. En general, se abarcan todos los elementos físicos e intangibles que requieren las personas para realizar las acciones¹³ concretas de mantenimiento sobre los elementos o máquinas.

Nivel 2 - Operacional (acciones mentales)

El nivel operacional comprende todas las posibles acciones por realizar en el mantenimiento de equipos por parte del oferente, a partir de las necesidades y los deseos de los demandantes. Las acciones correctivas, preventivas, predictivas y modificativas.

Nivel 3 - Táctico (conjunto de acciones reales)

El nivel táctico contempla el conjunto de acciones de mantenimiento que se aplican a un caso específico (un equipo o conjunto de ellos); es el grupo de tareas de mantenimiento que se realizan para alcanzar un fin al seguir las normas y reglas establecidas para ello. En este nivel aparecen el *TPM*, el *RCM*, el *TPM* y el *RCM* combinados, *PMO*, reactiva, proactiva, clase mundial, *RCM Scorecard*, entre otros.



El nivel instrumental abarca todos los elementos requeridos para que exista mantenimiento en las empresas; procura el manejo sistémico de toda la información construida, solicitada en un sistema de mantenimiento, en cuanto a las relaciones entre *personas, recursos productivos y máquinas*.

El nivel operacional comprende todas las posibles acciones por realizar en el mantenimiento de equipos por parte del oferente, a partir de las necesidades y los deseos de los demandantes.

El nivel táctico contempla el conjunto de acciones de mantenimiento que se aplican a un caso específico; es el grupo de tareas de mantenimiento que se realizan para alcanzar un fin al seguir las normas y reglas establecidas para ello.

¹³ Acciones, operaciones, o tareas que se dan en el nivel 2 operacional de mantenimiento.

Nivel 4 - Estratégico (conjunto de funciones y acciones mentales)

El campo estratégico está compuesto por las metodologías que se desarrollan para evaluar el grado de éxito alcanzado con las tácticas desarrolladas; esto implica establecer índices, rendimientos e indicadores que permiten medir el caso particular con otros de diferentes industrias locales, nacionales o internacionales. Es la guía que permite alcanzar el estado de éxito propuesto y deseado. Se alcanza mediante el *LCC*, el *CMD*, los costos, la terotecnología, etcétera.

3.4 ESTRUCTURA, RELACIONES Y ELEMENTOS

El enfoque sistémico permite entender que el estudio y el análisis del tema de mantenimiento se debe abordar de manera estructural; es decir, tiene un orden y una secuencia; de esta manera se facilitan su entendimiento, su aplicación y la ejecución de operaciones, las tácticas y estrategias en la empresa.

La estructura se da en el caso particular al tener una serie de elementos (mantenedores, productores y máquinas) organizados e independientes, que se relacionan entre sí de una manera formal con reglas y niveles identificables.

3.4.1 Relaciones

Los elementos mantenimiento, producción y máquinas se relacionan entre sí a partir de premisas y normas de aceptación universal, así: la relación entre productores (producción) y máquinas la establecen los principios de la confiabilidad¹⁴; la relación entre mantenedores (mantenimiento) y máquinas se define por las reglas de la mantenibilidad; la relación entre mantenedores y productores se da por una relación indirecta a través de los equipos y está gobernada por los cánones de la disponibilidad. Esta última relación muestra que cuando las conversaciones entre producción y mantenimiento son sobre las máquinas puede ser mucho más fluida que cuando se da en forma directa entre los dos departamentos sobre otros temas que no se refieren a *CMD*. De aquí que en ocasiones existen conflictos directos entre las dos áreas, lo cual muestra que siempre y cuando las conversaciones se den en términos de equipos y de sus comportamientos, la relación es más sencilla y eficaz.

La confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad son prácticamente las únicas medidas técnicas y científicas fundamentadas



El enfoque sistémico permite entender que el estudio y análisis del tema de mantenimiento se debe abordar de manera estructural, es decir, que tiene un orden y una secuencia.

La confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad son prácticamente las únicas medidas técnicas y científicas fundamentadas en cálculos matemáticos, estadísticos y probabilísticos que tiene el mantenimiento para su análisis y su evaluación.

¹⁴ El término confiabilidad en inglés es *Reliability*. En este libro los términos fiabilidad y confiabilidad son asumidos como idénticos.

en cálculos matemáticos, estadísticos y probabilísticos que tiene el mantenimiento para su análisis (Mora, 2007b) y su evaluación integral y específica. Por medio del CMD es como se pueden planear, organizar, dirigir, ejecutar y controlar totalmente la gestión y la operación del mantenimiento.

Es curioso observar cómo la mayoría de las tácticas conocidas como *TPM*, *RCM*, proactiva, reactiva, clase mundial, *PMO*, *RCM ScoreCard*, centrada en objetivos, basada en riesgos, terotecnológica, etc., fundamentan su establecimiento a partir de los indicadores CMD, los cuales proveen los principios básicos estadísticos y proyectivos de las dos manifestaciones magnas de mantenimiento: fallas y reparaciones. La mejor forma de controlar el mantenimiento y sus implicaciones es a través del componente confiabilidad y parámetros asociados (Barringer@, 2005).

La confiabilidad se mide a partir del número y la duración de las fallas (tiempos útiles, reparaciones, tareas proactivas, etc.). La mantenibilidad se cuantifica a partir de la cantidad y de la duración de las reparaciones (o mantenimientos planeados) (tareas proactivas según J. Moubray - RCM II), mientras que la disponibilidad se mide (o se obtiene por cálculo y deducción matemática) a partir de la confiabilidad y de la mantenibilidad.

La evolución del mantenimiento permite determinar tres etapas: una inicial hacia la Segunda Guerra Mundial en la cual el mantenimiento actúa por avería en los equipos, y en la que no se requieren grandes habilidades; una segunda fase donde imperan el mantenimiento preventivo y la reducción de costos, al prolongar la vida útil; y el tercer período en el que predominan la confiabilidad (Bleazard y otros, 1998) y la disponibilidad del parque industrial, con mayores niveles de seguridad para alcanzar altos valores de eficiencia.

Los estudios de fiabilidad permiten llegar a niveles de óptima confiabilidad que producen mínimos costos del ciclo de vida para el usuario, y minimizan los costos para el fabricante, sin comprometer la confiabilidad y la calidad (Reliasoft@, 2008).

Una mayor comprensión de las fallas de dispositivos ayuda en la identificación de las mejoras que pueden introducirse en los diseños de los productos, para aumentar su vida o por lo menos para limitar las consecuencias adversas de las fallas.

La terminación o degeneración de la propiedad de un elemento para realizar su función se define como falla, e incluye:

- Falla completa, al perder disponibilidad y funcionalidad.
- Falla parcial, sin generar la pérdida total de disponibilidad.
- Falla que se encuentra durante la realización de reparaciones, mantenimientos planeados, inspecciones o pruebas, que implican realizar otra reparación.



La confiabilidad se mide a partir del número y duración de las fallas. La mantenibilidad se cuantifica a partir de la cantidad y de la duración de las reparaciones, mientras que la disponibilidad se mide a partir de la confiabilidad y de la mantenibilidad.

Los estudios de fiabilidad permiten llegar a niveles de óptima confiabilidad que producen mínimos costos del ciclo de vida para el usuario, y minimizan los costos para el fabricante, sin comprometer la confiabilidad y la calidad.



Una mayor comprensión de las fallas de dispositivos ayuda en la identificación de las mejoras que pueden introducirse en los diseños de los productos, para aumentar su vida o por lo menos para limitar las consecuencias adversas de las fallas.

En el ámbito internacional las fallas se clasifican como críticas, degradantes, incipientes y desconocidas, dependiendo del efecto que generan sobre el cuerpo o la función del equipo.

La confiabilidad es una propiedad de las máquinas, que sólo la leen o interpretan los seres humanos, así como la mantenibilidad es responsabilidad de los seres humanos, indiferente de que se use como una característica de las máquinas.

- Fallas en aparatos de seguridad o elementos de control y monitoreo.
- La degradación paulatina de la funcionalidad del elemento después de cierto límite establecido como referencia con antelación al hecho.

No se estiman como fallas la realización de tareas planeadas de mantenimiento¹⁵, ni la interrupción de la funcionalidad de un elemento o máquina causada por un factor externo y exógeno a la operación de dicho elemento o máquina.

En el ámbito internacional las fallas se clasifican como críticas, degradantes, incipientes y desconocidas¹⁶, dependiendo del efecto que generan sobre el cuerpo o la función del equipo (OREDA, 1997, 2002).

La confiabilidad se puede entender como una característica propia del diseño de máquinas, que permite estudiar mediante principios científicos y matemáticos las fallas de los elementos de los equipos, para el análisis de los procesos de un diseño, la determinación de los costos del ciclo vida y la seguridad de un producto (Nachlas, 1995). Además se utiliza en el análisis de datos operativos para el mantenimiento, lo que permite conocer el comportamiento de equipos en operación con el fin de aislar componentes con problemas, diseñar las políticas de mantenimiento, calcular instantes óptimos de sustitución económica de equipos y establecer frecuencias de ejecución del mantenimiento preventivo (Díaz, 1992).

En todo caso, la confiabilidad es una propiedad de las máquinas, que sólo la leen o interpretan los seres humanos, así como la mantenibilidad es responsabilidad de los seres humanos, indiferente de que se use como una característica de las máquinas. En síntesis, la confiabilidad se asocia a máquinas y la mantenibilidad a personas de mantenimiento.

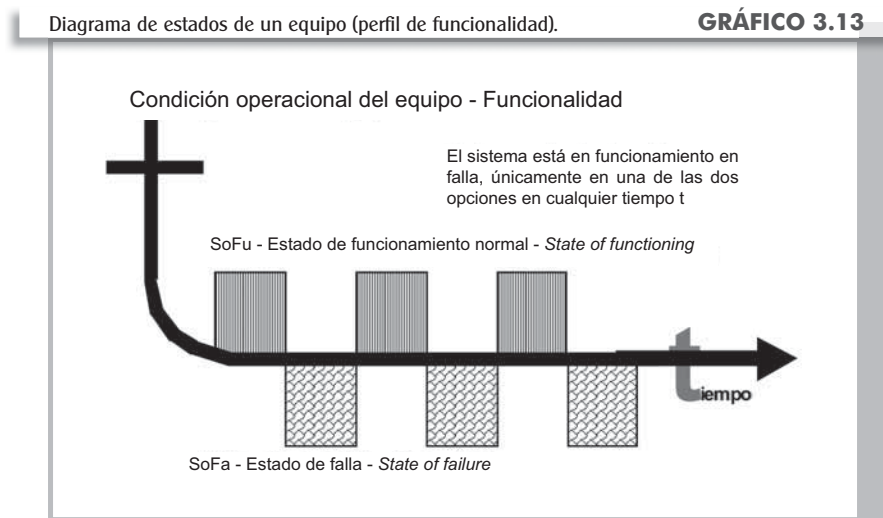
La falla de un sistema se define como un evento que provoca la pérdida total o parcial de la capacidad de un equipo para realizar las funciones para las cuales se diseña. Un aparato, una máquina o un dispositivo se pueden encontrar en uno de los dos posibles estados (mutuamente excluyentes): funciona o está en falla¹⁷. Durante la vida

15 Otra cosa es si durante un mantenimiento planeado aparece una falla, en cuyo caso se consideran eventos independientes, cada uno con su respectivo tiempo de prevención o predicción y de reparación.

16 Las críticas causan pérdida completa de funcionalidad y disponibilidad del equipo. Las degradantes no son críticas aún pero afectan las condiciones de la capacidad de producción. Las incipientes no afectan la disponibilidad, ni la funcionalidad, ni la capacidad de producción, pero pueden transformarse en degradantes si no se elimina la causa de la falla.

17 Existen otros casos de estados parciales de falla, que se analizan con otras ciencias o metodologías como NHPP o HPP.

útil el elemento se alterna entre *SoFa* y *SoFu*¹⁸. Los estados del equipo se denominan perfil de funcionalidad (Knezevic, 1996).



El desarrollo de las técnicas de confiabilidad comienza en la Segunda Guerra Mundial, como una respuesta a los rápidos desarrollos tecnológicos y a las intensas exigencias sobre los equipos. A Werner Von Braun se atribuye la realización de los primeros estudios sistemáticos de confiabilidad cuando, en un intento por mejorar la eficacia de los cohetes V-1 y V-2, analiza sistemáticamente la causa de las fallas e incorpora sus resultados en diseños mejorados. Al final de la guerra, los estudios de confiabilidad se desarrollan bastante debido a la denominada guerra fría, a la carrera espacial y al desarrollo de la industria nuclear.

Los estudios de confiabilidad se realizan sistemática y rutinariamente en el diseño de equipos y sistemas, con la idea de mejorar la calidad de los productos. Por ejemplo, antes de la construcción del metro de Caldas, las compañías francesas responsables emprenden intensos estudios de confiabilidad que les permiten garantizar que el producto terminado esté razonablemente libre de fallas mayores.

La mantenibilidad es una medida vital para la predicción, la evaluación, el control y la ejecución de las tareas correctivas o proactivas¹⁹ de mantenimiento; permite mejorar los tiempos y las frecuencias de ejecución de acciones de reparación o mantenimiento en las máquinas (Mora, 2003).



El desarrollo de las técnicas de confiabilidad comienza en la Segunda Guerra Mundial, como una respuesta a los rápidos desarrollos tecnológicos y a las intensas exigencias sobre los equipos.

¹⁸ *SoFa* - Estado de falla. *SoFu* - Estado de funcionamiento normal.

¹⁹ Tareas proactivas: mantenimientos planeados, preventivos o predictivos.



La mantenibilidad es una medida vital para la predicción, la evaluación, el control y la ejecución de las tareas correctivas o proactivas de mantenimiento; permite mejorar los tiempos y las frecuencias de ejecución de acciones de reparación o mantenimiento.

La confiabilidad se asocia a fallas, la mantenibilidad a reparaciones y la disponibilidad a la posibilidad de generar servicios o productos.

Lo importante en la metodología CMD consiste en la capacidad de predecir el comportamiento de los equipos, en cuanto a las fallas o las reparaciones, los tiempos útiles, los mantenimientos planeados.

La disponibilidad es una herramienta útil en situaciones en las que se tienen que tomar decisiones con respecto a la adquisición de un elemento, entre varias posibles alternativas (Knezevic, 1996).

Entre las ventajas del estudio científico y matemático del CMD, resalta que pretende buscar una metodología adecuada para medirlas y evaluarlas eficazmente, con el fin de brindar una herramienta fácil de usar para controlar la gestión y la operación integral del mantenimiento, a la vez que permite predecir el comportamiento futuro de corto plazo de los equipos, en cuanto a fallas, reparaciones, tiempos útiles, etc.

En resumen, la confiabilidad se asocia a fallas, la mantenibilidad a reparaciones y la disponibilidad a la posibilidad de generar servicios o productos.

3.4.2 Interacción - CMD

La forma como se realiza la estimación de cada uno de los indicadores relacionales del sistema de mantenimiento y producción, como son la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad, es amplia y diversa; la literatura universal sobre el tema provee diversas formas y métodos, en los cuales se encuentran también elementos y principios comunes; las diferentes estimaciones aportan metodologías disímiles, o afines en otros casos (González, 2004).

En síntesis, lo importante en la metodología CMD consiste en la capacidad de predecir el comportamiento de los equipos, en cuanto a las fallas o las reparaciones (tiempos y fechas de ocurrencia), los tiempos útiles (duración y días en que ocurrirán), los mantenimientos planeados (para su programación en tiempos y frecuencias) y demás actividades alusivas a la planeación de las máquinas, en aras de establecer planes concretos de operación y efectividad.

3.4.3 Métodos de predicción CMD

En el mundo de las predicciones CMD existen varias alternativas que difieren en su metodología y en su fundamentación técnica, aunque persiguen lo mismo; unas son más adecuadas que otras en función del entorno y de las características del grado posible o no de reparación de los elementos, como también del grado de madurez técnico y científico de las personas o de la empresa que los utiliza. Sobresalen, entre otros muchos modelos, los siguientes:

- **PUNTUAL** Métodos de cálculo puntuales (o promedios): se basa en el establecimiento de promedios de cada uno de los parámetros de fallas, reparaciones, tiempos útiles y demás variables por calcular; su utilización es muy simple y adecuada para personas o empresas que en su vida no han practicado con estas previsiones de parámetros CMD. Sus resultados no

son muy aceptables²⁰, pero es muy útil para aprender a dominar los algoritmos de cálculo de cada una de las diferentes opciones de disponibilidad.

- **DISTRIBUCIONES** Métodos de distribuciones: utiliza los mismos conceptos de disponibilidad, mantenibilidad y confiabilidad del modelo puntual anterior, pero en vez de utilizar el promedio de los valores de tiempos útiles, de fallas, de mantenimientos planeados, de demoras, utiliza diferentes distribuciones que modelan mucho mejor que uno simple el comportamiento de las variables CMD en el tiempo y de sus parámetros. En general, es un buen procedimiento aplicable tanto a elementos o máquinas reparables o no, aunque algunos autores no lo recomiendan para artefactos reparables. Pero, en general, tiene muy buena aceptación mundial, es de aplicación sencilla y el autor aporta programas en Excel, adjuntos, que facilitan su utilización en las diferentes distribuciones que usa para la diferentes disponibilidades que se presentan en el libro.
- **HPP y NHPP** Métodos de modelos HPP o NHPP: para predecir sistemas reparables (que se pueden restaurar al fallar, como motores, compresores, etc.). También se usan los modelos de: Proceso homogéneo de Poisson (*HPP*) y Proceso no homogéneo de Poisson (*NHPP*)²¹. Algunos autores sostienen que los modelos tradicionales de distribuciones como Weibull, Gamma, LogNormal, etc., que se usan en los sistemas no reparables²², no son tan adecuados para pronosticar el comportamiento de los sistemas reparables, por lo cual sugieren ampliar el espectro de metodología, como, por ejemplo, con el modelo de NHPP (O'Connor, 2002).
- **SERIES TEMPORALES** Método de previsión con el uso de técnicas de series temporales: esta metodología se basa en la utilización del modelo universal de pronósticos, con sus tres etapas del método científico: análisis previo, lanzamiento de hipótesis y verificación.



El método de cálculo puntual se basa en el establecimiento de promedios de cada uno de los parámetros de fallas, reparaciones, tiempos útiles y demás variables por calcular.

20 Está demostrado que utilizar los promedios o medias móviles para pronosticar es un adefesio intelectual. Normalmente estas herramientas sólo se utilizan para alisar en los modelos de pronósticos, y sus resultados infieren que todos los eventos o intervalos de tiempo son iguales, lo que en la realidad no es cierto; de ahí su poca credibilidad.

21 *HPP*-Proceso homogéneo de Poisson. *NHPP*-Proceso no homogéneo de Poisson.

22 Un sistema no reparable es aquel que al fallar es sustituido, descartado o reemplazado.

Entre las metodologías que trabaja están: modelos clásicos (tendencia lineal o no, *Brown, Holt, Holt's Winter*) y modelos estocásticos *AR.I.MA.* (*Auto-Regressive, Integrated, Moving Average*), que son muy efectivos y garantizan errores mínimos en los pronósticos frente a la realidad futura. Se pueden usar directamente sobre la predicción de las fallas, de las reparaciones, de los mantenimientos, de los tiempos útiles, etc., o sobre las predicciones de cada una de las variables de modelación CMD, tales como²³ *MTTR, MTBF, UT, DT, MTBM_C, MTBM_p, M_p*, etc. En general, sus resultados son bastante confiables y veraces. Se basan en la modelación de eventos en el tiempo, utilizan el medio científico para encontrar las diferentes funciones clásicas o modernas que simulen mejor el comportamiento pasado, presente y futuro de los datos históricos. Tienen la capacidad de generar predicciones basadas netamente en el pasado o pueden predecir hechos futuros que no estén relacionados directamente con los datos del pasado, y esto es su gran aporte, cuando se usan los Modelos *AR.I.MA.*, con la metodología Box-Jenkins.

- OTROS Combinaciones de los anteriores u otros: de hecho, se pueden combinar dos o más de los anteriores para lograr una modelación predictiva, como también se puede recurrir a otros modelos que tengan un buen grado de validez científica para predecir el comportamiento futuro de las máquinas (Mora, 2007c).

Del *HPP*, que describe el proceso homogéneo de Poisson, se dice que alcanza este grado de homogéneo cuando su comportamiento no está en función del tiempo; es decir, el número de eventos sólo depende del período de tiempo del intervalo que se evalúe. La probabilidad futura de ocurrencia de determinado evento próximo no obedece a la conducta de los eventos anteriores, ni está en función del tiempo. Su comportamiento se rige por la siguiente expresión:

► ECUACIÓN 3.1 - HPP

$$HPP \quad R(t_1, t_2) = \lambda^{-1} (t_2 - t_1)$$

Donde:

t_1, t_2 es el intervalo de tiempo que se analiza

λ , es la tasa de fallas, independiente del tiempo (Bajaria, 1983)

23 *MTTR: Mean Time To Repair, MTBF: Mean Time Between Failures, UT: Up Time, DT: Down Time, MTBM_C: Mean Time Between Corrective Maintenance, MTBM_p: Mean Time Between Planned Maintenance, etc.*

El *NHPP*, que se refiere al proceso no homogéneo de Poisson, es similar al *HPP*, sólo que la tasa de fallas - λ - está en función del tiempo. El proceso no es estacionario, ni en media ni en varianza, dado que la función de tasa de fallas tampoco es estacionaria, λ no es independiente y no se distribuye de manera uniforme a través del tiempo. Su modelación se realiza con el siguiente algoritmo.

► ECUACIÓN 3.2 - NHPP

$$NHPP \quad R(t_1, t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) * dt}$$

Donde:

t_1, t_2 es el intervalo de tiempo que se revisa

λ , es la tasa de fallas, dependiente del tiempo (Bajaria, 1983).

Existen diferentes métodos para analizar los datos de las fallas, algunos de los cuales son el estadístico, el probabilístico y el determinista. Lo primero que se hace en los procedimientos NHPP y HPP es definir si existe o no una tendencia. Esto se logra estadísticamente con diferentes pruebas como el *ACF* (prueba de autocorrelación) o con la prueba del *Centroide* o de *Laplace*.

La existencia o no de la tendencia define si los datos se correlacionan entre sí, o si son independientes o aleatorios, como también si los valores de intervalos en el tiempo se distribuyen de manera uniforme. Cuando hay tendencia, los valores de las fallas pasadas y futuras no son independientes, no son aleatorios y no se distribuyen de manera similar en los diferentes intervalos de tiempo (Palencia y otros, 2006).

Para los modelos puntual y de distribuciones, el autor propone un modelo universal para el manejo del CMD y aporta una metodología única y sintética que permite estimar los diferentes parámetros de una forma única y lógica, de tal manera que los sistemas de medición CMD que se implementen en las diferentes empresas permitan una comparación similar en el tiempo, ya sea con la propia industria o con otras en el plano internacional. El manejo de la obtención del CMD debe cumplir unos parámetros estadísticos y matemáticos a lo largo del cálculo.

El modelo propuesto en el *Gráfico 4.1* parte de la premisa de que los valores pueden ser pronosticados al inicio en cuanto a los tiempos de falla, tiempos útiles, períodos de mantenimientos planeados, tasas de fallas o de reparaciones, etc., o al final del proceso mediante el pronóstico de los parámetros CMD asociados calculados como el Beta, Eta η , *MTTF*, *MTBF*, *MTTR*, entre otros.



Existen diferentes métodos para analizar los datos de las fallas, algunos de los cuales son el estadístico, el probabilístico y el determinista. Lo primero que se hace en los procedimientos NHPP y HPP es definir si existe o no una tendencia.

Cuando hay tendencia, los valores de las fallas pasadas y futuras no son independientes, no son aleatorios y no se distribuyen de manera similar en los diferentes intervalos de tiempo.

También es importante resaltar que el cálculo se realiza inicialmente con la *distribución Weibull* que permite la utilización de las tres zonas de tasa de fallas, o sea para cualquier Beta; para luego acorde con el valor de este parámetro obtenido se realiza la validación de los cálculos, para posteriormente compararlos con otras distribuciones congruentes con el valor Beta que se calcule.

Por lo demás, se usan prácticamente las metodologías estadísticas y procedimientos universalmente aceptados en el cálculo y estimación integral CMD, en el modelo propuesto por el autor; pero en todo caso se pretende una sola ruta de cálculo que permita de una manera fácil la comparación dinámica de resultados, que es el objetivo del manejo estratégico y sistémico del mantenimiento y de la producción.

CAPÍTULO 4

DISPONIBILIDAD

Como disponibilidad se define la probabilidad de que el equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables, donde el tiempo total considerado incluye el tiempo de operación, el tiempo activo de reparación, el tiempo inactivo, el tiempo en mantenimiento preventivo (en algunos casos), el tiempo administrativo, el tiempo de funcionamiento sin producir y el tiempo logístico (Ramakumar, 1996; Blanchard, 1995; Nachlas, 1995; Smith, 1983; Leemis, 1995; Kececioglu, 1995; Díaz, 1992; Knezevic, 1996; Ebeling, 2005; Kelly, y otros, 1998; Kapur, y otros, 1977; Rey, 1996; Halpern, 1978; Navarro y otros, 1997 y Modarres, 1993).

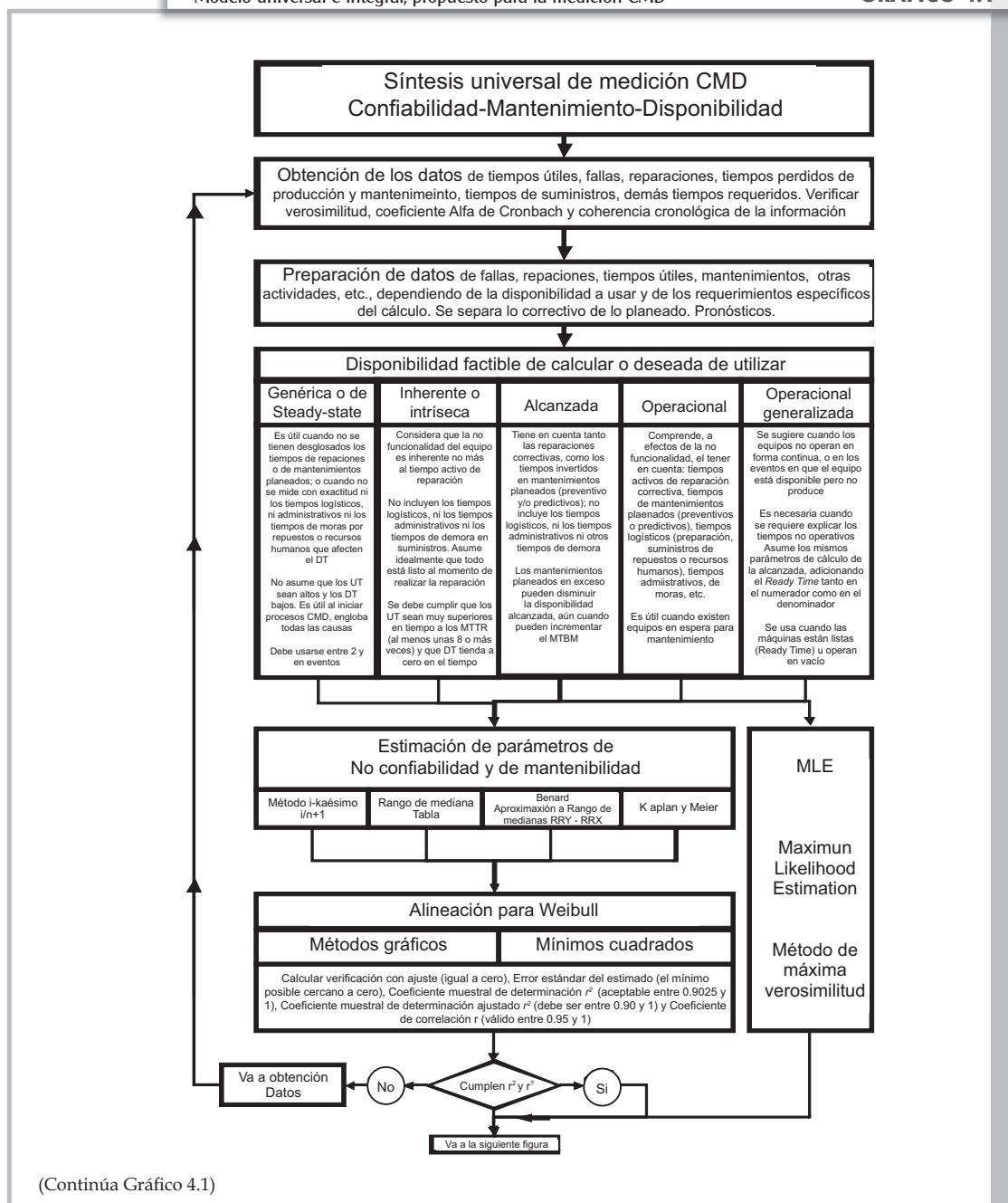
Es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un equipo. La mayoría de los usuarios aseguran que necesitan la disponibilidad de un equipo tanto como la seguridad. Hay varios métodos para lograrlo, y uno es construir un equipo que cuando falle sea fácil de recuperar, y el otro es que sean confiables y, por lo tanto, demasiado costosos (Knezevic, 1996).



Disponibilidad es la probabilidad de que el equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables.

Modelo universal e integral, propuesto para la medición CMD¹

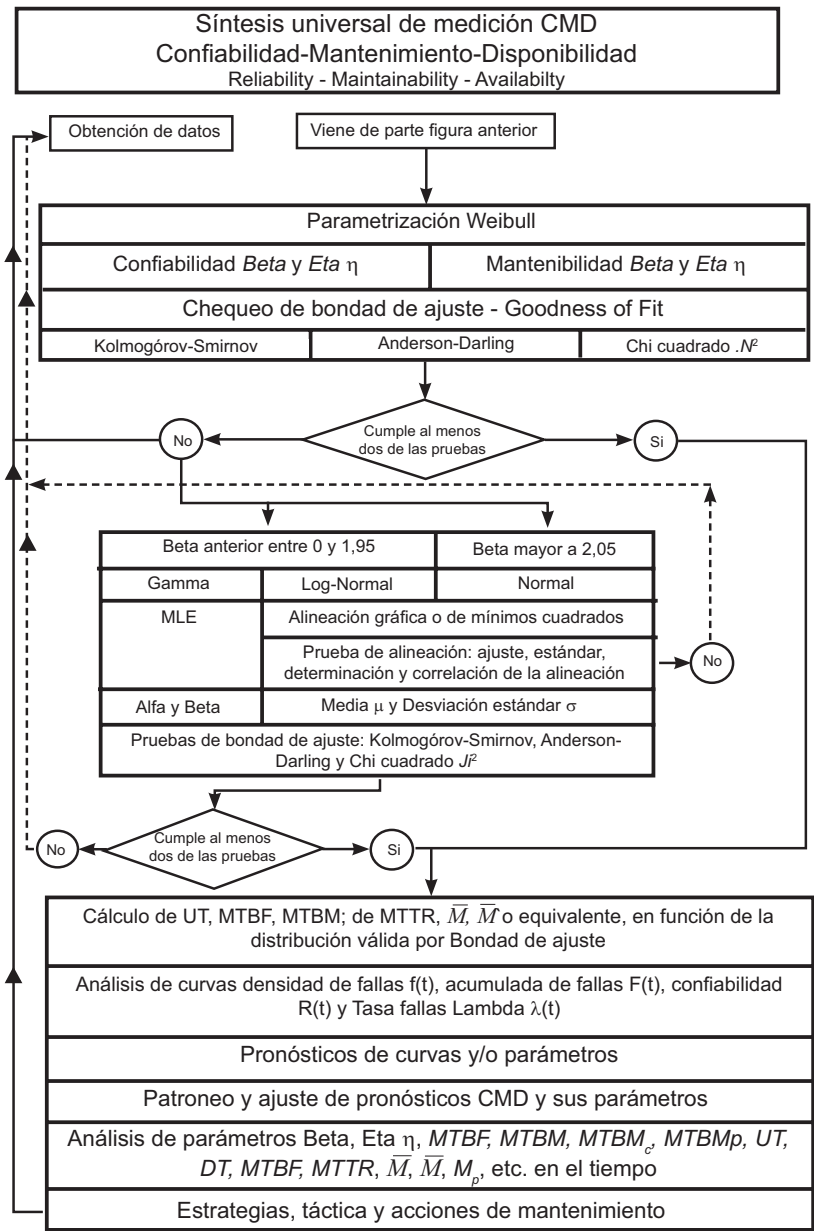
GRÁFICO 4.1



1 Válido para modelos puntual y de distribuciones.

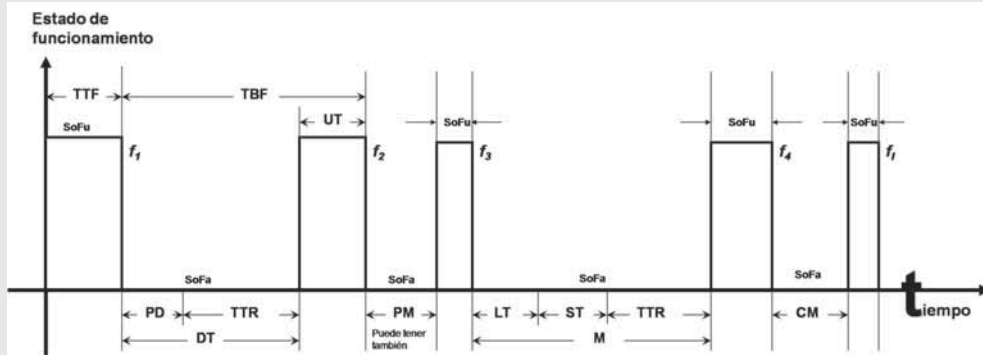
(Continuación)

GRÁFICO 4.1



Tiempos importantes, siglas y demás convenciones que se usan en la medición y predicción CMD.

GRÁFICO 4.2



Donde:

TTF = Time To Failure = Tiempo hasta Fallar (se usa en equipos que solo fallan una vez, no reparables).

TBF = Time Between Failures = Tiempo entre Fallas.

UT = Up Time = Tiempo Útil en el que equipo funciona correctamente.

DT = Down Time = Tiempo no operativo.

f_i = Falla i -ésima

TTR = Time To Repair = Tiempo que demora la reparación.

CM = Corrective Maintenance = Tiempo que demora la reparación correctiva o modificativa.

PM = Planned Maintenance = Mantenimientos Planeados (preventivo y/o predictivo), Moubray los denomina Tareas Proactivas.

LT = Logistical Times = Tiempos logísticos o administrativos (incluye MD (Maintenance Delays) demoras y retrasos de mantenimiento).

ST = Supplies Times = Tiempos de suministros de repuestos, insumos o de recursos humanos.

NTTR = Net Time To Repair = Tiempo Neto para la reparación, no incluye ni demoras, ni tiempos logísticos, ni tiempos de suministros, ni otros tiempos exógenos que impiden la reparación.

PD = Production Delays = Retrasos en producción para informar y notificar a mantenimiento de la no funcionalidad del equipo o sistema, o demoras en la producción por causas imputables a ella (falta de materias primas, falta de personal, etc.).



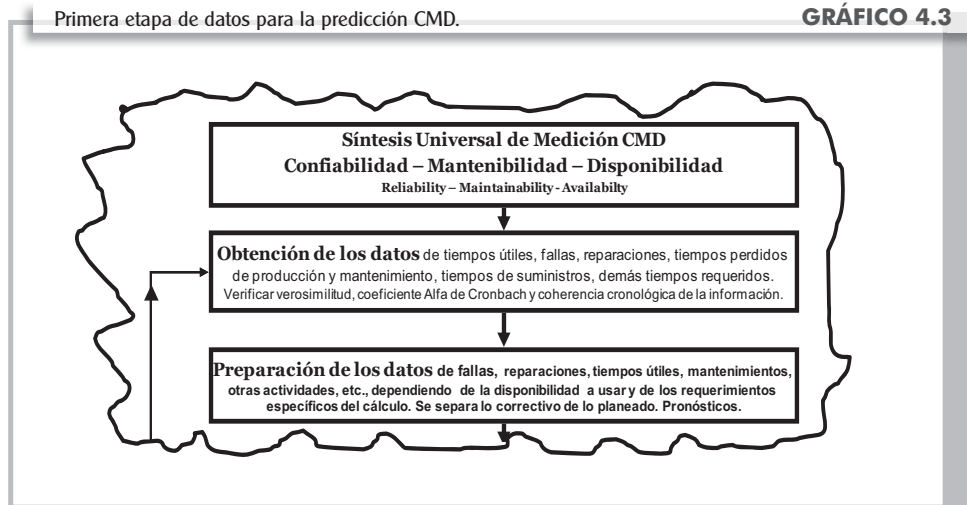
La disponibilidad es una consideración importante en sistemas relativamente complejos, como plantas de energía, satélites, plantas químicas y estaciones de radar.

La disponibilidad es una consideración importante en sistemas relativamente complejos, como plantas de energía, satélites, plantas químicas y estaciones de radar. En dichos sistemas, una confiabilidad alta no es suficiente, por sí misma, para asegurar que el sistema esté disponible para cuando se necesite (O'Connor, 2002).

También es una medida relevante y útil en los casos en que el usuario debe tomar decisiones para elegir un equipo entre varias alternativas. Para tomar una decisión objetiva con respecto a la adquisición del nuevo equipo, es necesario utilizar información que abarque todas las características relacionadas, entre ellas la disponibilidad, que es una medida que suministra una imagen completa sobre el perfil de funcionalidad (Nachlas, 1995; O'Connor, 2002 y Mora, 2007b).

4.1 MODELO UNIVERSAL PARA PRONOSTICAR CMD

El método internacional se conforma de varias etapas. En la primera de ellas se dedica a definir los pasos claves para la obtención, la tabulación, la manipulación y el tratamiento de los datos, con el fin de que sean compatibles en su forma, estilo y composición básicos para los cálculos en los métodos puntual y de distribuciones.



En la segunda fase se debe decidir la disponibilidad más adecuada de acuerdo con los datos que se posean y con las expectativas de la empresa, y acorde con los elementos que desea controlar; todas las disponibilidades difieren y prestan diferentes servicios, pero, en síntesis, sus ventajas son:

- **Disponibilidad genérica:** Sirve para organizaciones que no predicen ni manejan CMD; la información de que se dispone sólo contempla los tiempos útiles y los de no funcionalidad (sin especificar causa, ni razón, ni tipo). Es muy adecuada para inicializar pruebas piloto en las empresas. Utiliza parámetros *UT* y *DT*.
- **Disponibilidad inherente o intrínseca:** Es muy útil cuando se trata de controlar las actividades de mantenimientos no planeados (correctivos y/o modificativos). Sólo contempla su posible uso cuando los promedios de tiempos útiles son supremamente grandes frente a los *DT* y los tiempos de retraso o demora administrativos o físicos son mínimos o tienden a cero (al igual las otras tres disponibilidades que siguen: alcanzada, operacional y operacional generalizada). Sus parámetros son *MTBF* y *MTTR*. Sólo tiene en



La disponibilidad genérica sirve para organizaciones que no predicen ni manejan CMD; la información de que se dispone sólo contempla los tiempos útiles y los de no funcionalidad y es muy adecuada para inicializar pruebas piloto en las empresas.

cuenta daños o fallas o pérdidas de funcionalidad, por razones propias del equipo y no exógenas a él.

- **Disponibilidad alcanzada:** Es excelente cuando se busca controlar las tareas planeadas de mantenimiento (tareas proactivas: preventivas o predictivas) y las correctivas por separado; no le interesan los tiempos de espera (demora), ni los registra obligatoriamente. Es muy rigurosa en el manejo y la especificación de la información y de los datos, y requiere un manejo detallado y preciso. Usa como parámetros de cálculo, $MTBM$, $MTBM_C$, $MTBM_P$, $MTTR$, M_p , M , etc.



La disponibilidad alcanzada es excelente cuando se busca controlar las tareas planeadas de mantenimiento (tareas proactivas: preventivas o predictivas) y las correctivas por separado.

La disponibilidad operacional es adecuada cuando se requiere vigilar de cerca los tiempos de demoras administrativas o de recursos físicos o humanos; trabaja con las actividades planeadas y no planeadas de mantenimiento, en forma conjunta.

Disponibilidad operacional generalizada; básicamente se usa cuando se predice el CMD en equipos con mucho tiempo de operación en que funcionan mas no producen, algo así como trabajar en el vacío.

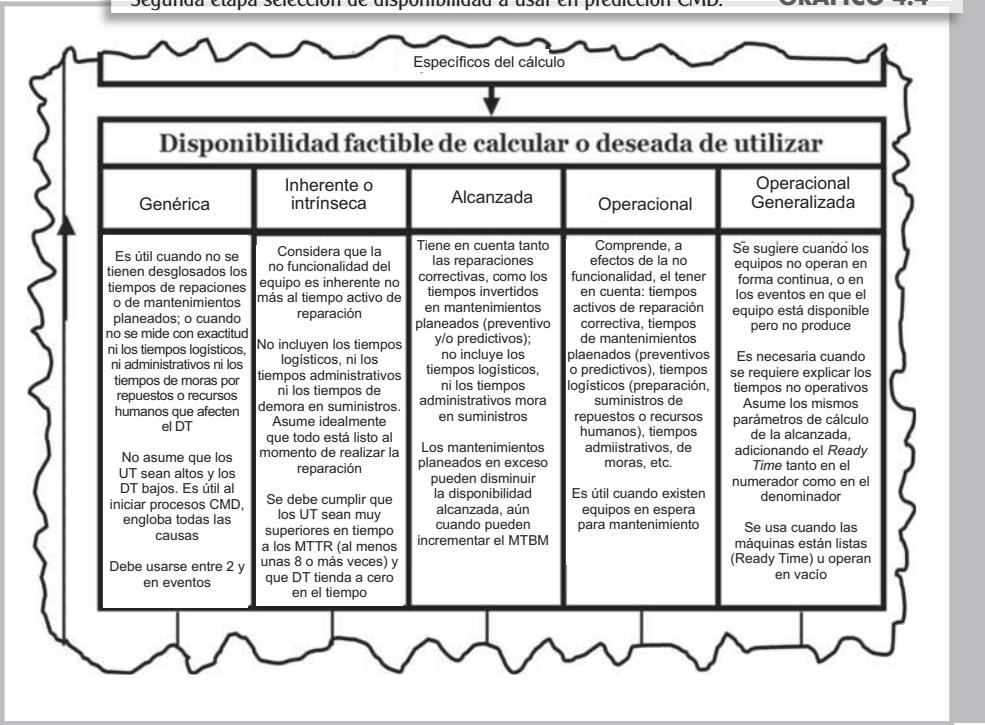
- **Disponibilidad operacional:** Es adecuada cuando se requiere vigilar de cerca los tiempos de demoras administrativas o de recursos físicos o humanos; trabaja con las actividades planeadas y no planeadas de mantenimiento, en forma conjunta. Es precisa, exigente y metódica para su predicción. Su implementación requiere mucho esfuerzo y exige bastantes recursos económicos. Utiliza los mismos parámetros de la anterior (alcanzada) más los correspondientes a demoras: ADT , LDT' y LDT .

- **Disponibilidad operacional generalizada:** Básicamente se usa cuando se predice el CMD en equipos con mucho tiempo de operación en que funcionan mas no producen, algo así como trabajar en el vacío; por ejemplo, una turbina de generación a carga mínima, un compresor de aire al mínimo, una bomba de agua en recirculación por no tener carga, un vehículo detenido y encendido pero en neutro en su caja de cambios. Trabaja con los mismos parámetros de la operacional, sólo que los tiempos en que la máquina funciona, pero que no produce se les agregan a los tiempos útiles más cercanos en fecha, para de esta manera aumentar los tiempos útiles que si no se registrasen los *Ready Time*. Es la más compleja y completa de las disponibilidades pero, así mismo, la más exigente y costosa de implementar, aparte de que la empresa debe tener ya mucha experiencia en el tema.

Para completar con la tercera fase, se debe tomar la decisión de si utiliza el método directo de máxima verosimilitud que no hace alineación, o si se resuelve usar el método de alineación con sus dos facetas: estimación de parámetros $F(t)^2$ (función de no confiabilidad) y de $M(t)$ de mantenibilidad), con las opciones que se muestran (*i*-kaésimo, Rango de medianas con tablas, de Benard (de aproximación de rango de mediana) o Kaplan y Meyer) y luego la alineación para la función de Weibull (en dos versiones: gráfica o numérica de mínimos cuadrados o de regresión) que permiten hallar todos los parámetros requeridos para estimar UT , DT , $MTBF$, $MTBM$, $MTBM_C$, $MTBM_P$, $MTTR$, M_p , etc., en función de la disponibilidad que se usa.

2 Del inglés *Failures*; su opuesto es confiabilidad y por eso se le llama de *no confiabilidad*, para un estado de *SoFa*.

Segunda etapa selección de disponibilidad a usar en predicción CMD. **GRÁFICO 4.4**



En ambas opciones de la tercera etapa (sea para el método de máxima verosimilitud o el de Weibull) se deben comprobar los valores de ajuste que se obtienen, mediante la valoración de los índices de bondad de ajuste: r (coeficiente de correlación múltiple) y r^2 (coeficiente de determinación muestral), que sirven para saber el grado de ajuste de los resultados que se obtienen en cualquiera de los casos.

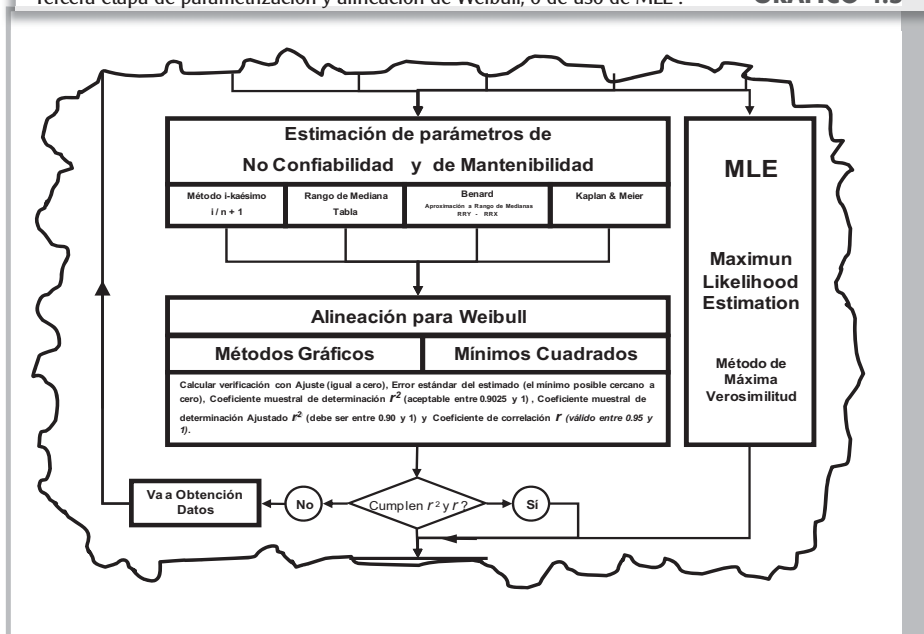
En la cuarta fase se trata de los cálculos en sí y de las pruebas de bondad de ajuste de Weibull, que se realiza con tres pruebas: Kolmogórov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi cuadrado Ji^2 .



El gran aporte de la metodología universal propuesta es que desde el inicio usa la metodología de Weibull que sirve para las tres etapas de la curva de Davies: infancia, rodaje y envejecimiento.

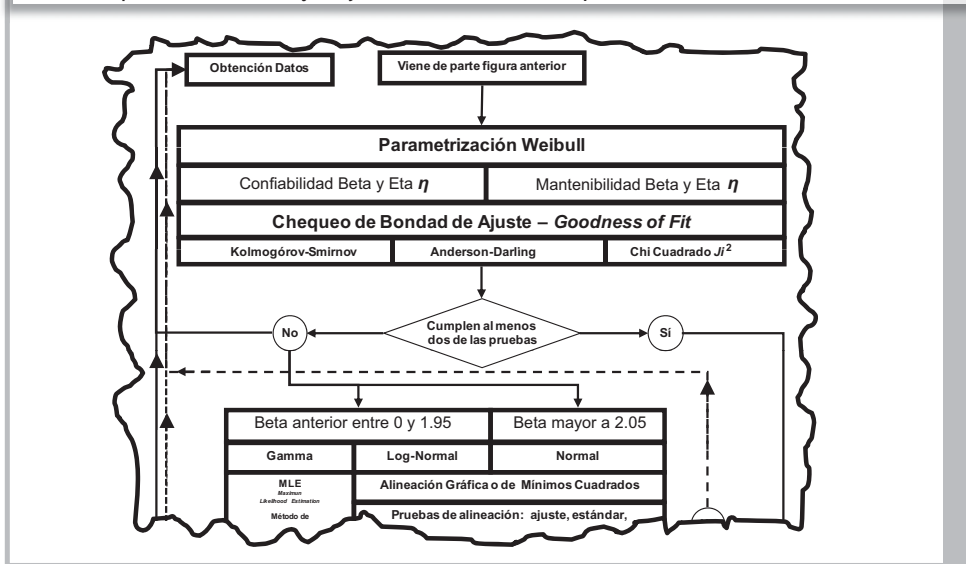
Tercera etapa de parametrización y alineación de Weibull, o de uso de MLE³.

GRÁFICO 4.5



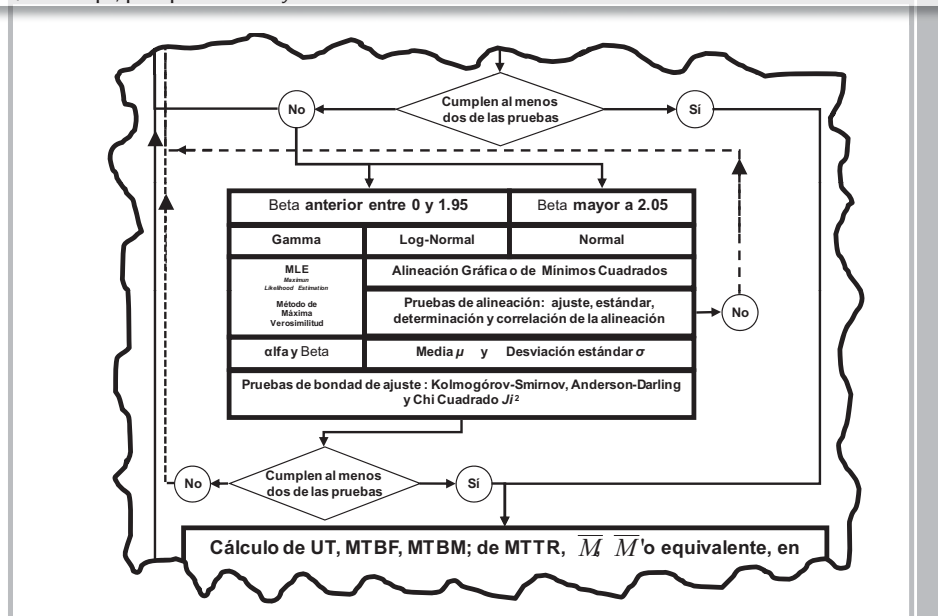
El gran aporte de esta metodología universal propuesta es que directamente desde el inicio usa la metodología de Weibull que sirve para las tres etapas de la curva de Davies: infancia, rodaje y envejecimiento y en el evento en que no sirve se va directamente a la función específica (Gamma, Normal, LogNormal, Rayleigh, etc.) que más se adecua con el valor del Beta que se obtiene en esa etapa de Weibull, lo cual garantiza mayor precisión y rapidez en la estimación futura del CMD.

3 MLE - Maximum Likelihood Estimation.

Cuarta etapa de validación de ajuste y bondad de Weibull o búsqueda de otra función. **GRÁFICO 4.6**

La quinta etapa sirve para parametrizar y realizar la alineación o MLE, que se requiere con otra función diferente a Weibull, como para estimar sus bondades de ajuste.

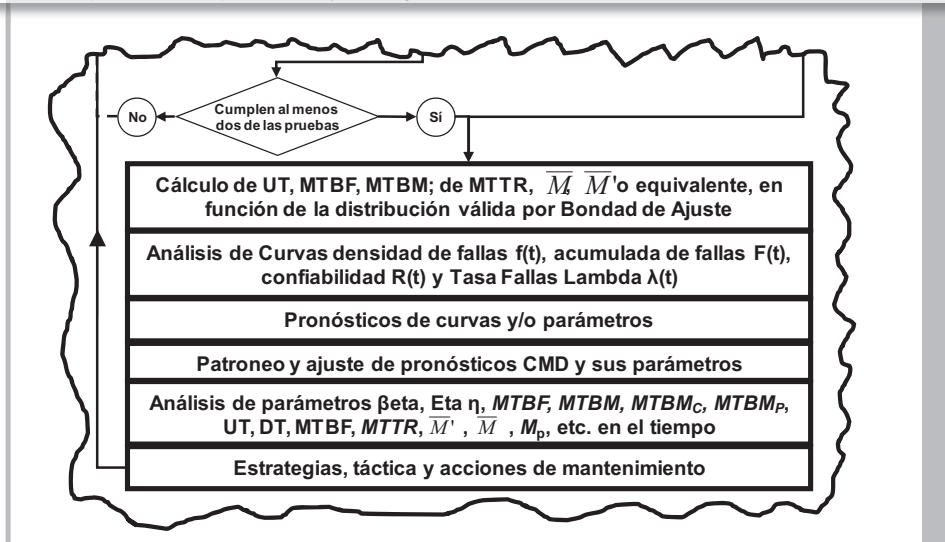
Quinta etapa, para parametrizar y alinear o MLE de otra función.

GRÁFICO 4.7

En la etapa seis, se realizan todos los cálculos CMD, con la función que se seleccione y cumpla bien todos los ajustes.

Sexta etapa de cálculos, predicciones y estrategias CMD.

GRÁFICO 4.8



Toda eficiencia, en el ámbito empresarial, se mide a partir de los siguientes conceptos: el total es lo bueno más lo no bueno para el fin que se persigue; lo bueno es la cifra que se adecua a la meta que se desea, y lo no bueno es la medida de los fines que no alcanzan a cumplir con el nivel de los parámetros que se plantean como requisitos para calificarlos como buenos.

► ECUACIÓN 4.1 - Eficiencia general de cualquier índole

$$Eficiencia = \frac{Metas\ que\ cumplen\ o\ sea\ lo\ bueno}{Metas\ que\ cumplen\ o\ sea\ lo\ bueno + Lo\ no\ bueno\ o\ sea\ lo\ que\ no\ se\ cumple}$$

Si se hace la analogía con los términos de la ecuación anterior y el CMD, se determina que lo bueno es la confiabilidad, lo no bueno es la mantenibilidad, de donde se deduce que se puede establecer una fórmula genérica de CMD, así:

► ECUACIÓN 4.2 - Relación de disponibilidad

$$Disponibilidad = \frac{Confiabilidad}{Confiabilidad + Mantenibilidad}$$

Donde interactúan los tiempos útiles UT y los tiempos de fallas debidas a reparaciones (imprevistas), DT , o a mantenimientos planeados, M_p , como de otros tiempos relevantes en la disponibilidad o no de las máquinas.

La medición de disponibilidad se puede aproximar a la relación entre:

► ECUACIÓN 4.3 - Relación de disponibilidad

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo en que el dispositivo opera correctamente y funciona bien}}{\text{Tiempo en que el elemento o máquina puede operar}}$$

4.1.1 Diferentes disponibilidades de mayor uso empresarial

La modelación y la predicción del CMD de la disponibilidad se puede realizar mediante diversas técnicas, desde unas muy simples que se basan en indicadores puntuales e instantáneos, que se calculan independientemente de la estimación de probabilidades, mediante medias móviles y de las leyes que modelan el CMD, hasta otras más complejas en las que sí se tienen en cuenta las distribuciones que simulan el comportamiento de la confiabilidad y de la mantenibilidad. Hasta llegar al uso de simulaciones tipo Montecarlo o de los procesos HPP y $NHPP$, como también con el uso de series temporales.

Existen diferentes disponibilidades de distintos autores y de diferentes instituciones mundiales que tratan el mantenimiento; en el caso particular se muestran y se usan las cinco descritas en el *Gráfico 4.1 - Modelo universal e integral*, propuesto para la medición CMD: genérica, inherente (o intrínseca), alcanzada, operacional y operacional generalizada.

► ECUACIÓN 4.4 - Disponibilidad Genérica sin mantenimientos preventivos- A_G

Donde:

$$A_G = \frac{\text{Media de los tiempos útiles con funcionamiento}}{\text{Media de tiempos útiles + Media de tiempos de no funcionalidad}} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^m UT_i}{m}}{\frac{\sum_{i=1}^m UT_i}{m} + \frac{\sum_{j=1}^n DT_j}{n}}$$

UT : tiempos útiles o *Up Time*

DT : tiempos en que la máquina ni funciona ni produce, o *Down Time*

m : número de eventos de UT

n : número de no funcionalidades DT

Además se asume que no hay acciones planeadas M_p dentro de los tiempos de DT .

La disponibilidad genérica en este caso se mide en porcentaje, mientras que UT , DT , MUT y MDT se miden en unidades de tiempo: horas, minutos, entre otros.

Disponibilidad generica - D_G ⁴

Es muy útil cuando se tienen los tiempos totales de funcionamiento y de no funcionalidad, los cuales se miden en forma global (no discrimina los tiempos correctivos, preventivos, predictivos, las demoras o los *Ready Time*), los DT se miden al bulto; en este caso no se poseen los tiempos exactos de demoras logísticas, suministros, retrasos, acciones correctivas ni modificativas, tiempos planeados, etc. Es muy útil para empresas principiantes en el tema de predicción del CMD.

Los MUT en la A_G sólo consideran los tiempos en que el equipo funciona correctamente; como a su vez los MDT contemplan todo lo que genere no disponibilidad o no funcionalidad; los tiempos de paradas previstas o planeadas por mantenimiento (u otra causa) deben descontarse del tiempo en que el equipo puede operar. Por ejemplo, en el evento en que se tuviera un equipo que tiene tiempo útil UT , otro tiempo DT por fallas que generan reparaciones y además de lo anterior se tiene tiempo invertido en PM mantenimiento preventivo, con un tiempo total TT , se calcula así la disponibilidad (Vallejo, y otros, 2004):

► ECUACIÓN 4.5 - Disponibilidad genérica con mantenimientos preventivos

$$A_G = \frac{\text{Tiempo funcionamiento}}{\text{Tiempo en que puede operar}} = \frac{TT - \sum PM - \sum DT}{TT - \sum PM}$$

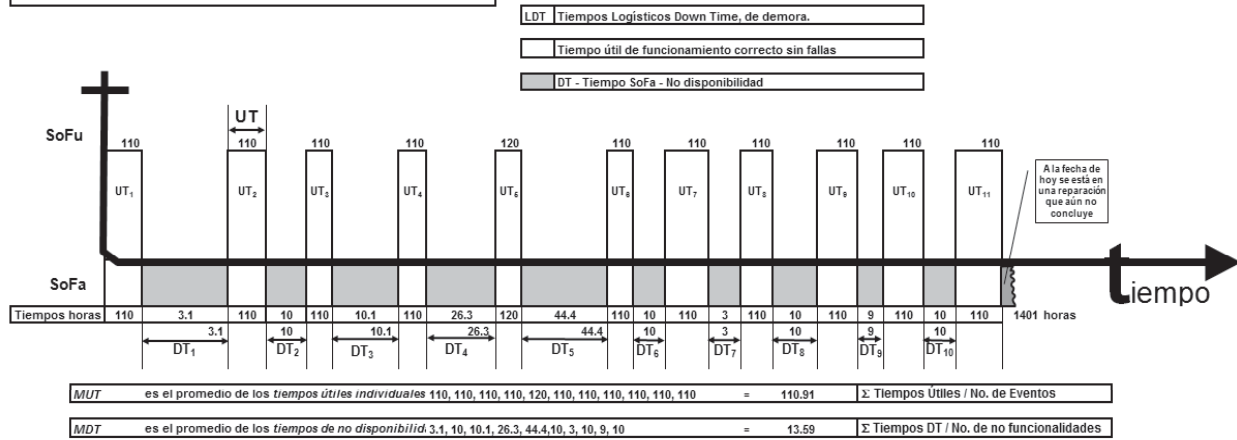
Si durante los tiempos de mantenimiento preventivo aparece una falla se consideran como hechos independientes el PM y la reparación, y se tratan como eventos diferentes.

⁴ Disponibilidad genérica.

Disponibilidad genérica (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_G

EJEMPLO 4.1

En la Disponibilidad Genérica no se tienen desglosados ninguno de los conceptos que generan indisponibilidad, el Ready Time se conoce y existe, pero no se toma en cuenta



Fuente: El autor.

$$Disponibilidad\ genérica = A_G = \frac{MUT}{MUT + MDT} = \frac{110,91}{110,91 + 13,59} = 89,08\%$$

Para utilizar cualquiera de las otras disponibilidades: intrínseca o inherente, alcanzada, operacional u operacional generalizada, se deben cumplir varias particularidades:

- El MUT debe ser infinitamente superior al MDT, al menos unas diez veces.
- Los tiempos logísticos ADT y LDT' deben tender a cero o no existen, con lo cual LDT tiende a ser mínimo, cero o no hay.

Ambas situaciones suceden en las empresas muy maduras u organizadas en mantenimiento y en el área de ingeniería de fábricas. En las siguientes ecuaciones se vislumbra la transformación de MTBF y de DT.

ECUACIÓN 4.6 - Transformaciones de MTBF, UT, MTTR, DT, etc.

En la disponibilidad genérica se cumple que:

$$MTBF = UT + DT, \text{ pero si } UT \gg \gg \gg DT, \text{ entonces queda que } MTBF \cong UT$$

$$DT = LDT + MTTR, \text{ con } LDT \text{ despreciable o igual a cero, de donde } DT \cong MTTR$$

Si ambos resultados se reemplazan en la disponibilidad genérica, ésta se transforma en:

$$A_G = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad \text{queda como} \quad D_{Inherente} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

De donde se deduce que los términos MUT y MDT son propios de la disponibilidad genérica, $MTBF$ de la disponibilidad inherente o intrínseca, y $MTTR$ de las disponibilidades intrínseca o inherente, alcanzada, operacional y operacional generalizada.

Al asumir varias consideraciones, como que el $MTTR$ tiende en el tiempo a ser igual al MDT , que el $MTBF$ es mucho mayor que $MTTR$ (al menos unas 10 veces), que el tiempo total de análisis de eventos es muy largo y superior al menos a 10 veces el $MTTR$, que el $MLDT$ ⁵ tiende a cero en el tiempo, se puede suponer como válido que:

► ECUACIÓN 4.7 - Equivalencias de UT con TBF y de DT con TTR

$$\frac{MUT}{MUT + MDT} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

De donde se puede asumir que $MUT \approx MTBF$, pese a ser usado por algunos autores, es válido sólo bajo las premisas enunciadas.

Las modelaciones markovianas simples y complejas de procesos estocásticos donde se representan los estados posibles de un sistema, y las probabilidades de transición entre estos estados, al asumir que las probabilidades de transición entre estados posibles (funcionamiento u ocurrencia de falla con reparación), son constantes (hipótesis cierta sólo en procesos de Poisson), al considerar que la tasa de fallas $\lambda(t)=1/MTBF$ y la tasa de reparaciones $\mu(t)=1/MTTR$ bajo hipótesis de comportamiento poissoniano⁶ y resolver el sistema mediante ecuaciones diferenciales, permiten demostrar la validez de la disponibilidad en función de $MTBF$ y $MTTR$ (Díaz, 1992), así:

► ECUACIÓN 4.8 - Disponibilidad inherente o intrínseca - A_i ⁷

$$\text{Disponibilidad inherente} = A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Disponibilidad inherente o intrínseca - D_i

A_i del sistema es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente cuando se requiere en cualquier tiempo, bajo las condiciones de operación especificadas y con un

⁵ $MLDT$, Tiempo medio de los tiempos logísticos, causados por demoras.

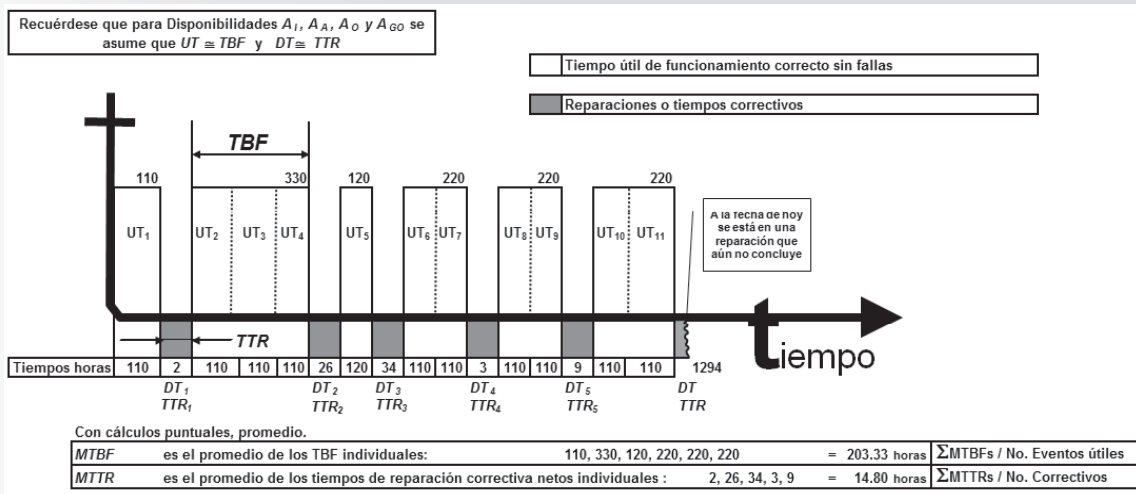
⁶ Autor Simeón Denis Poisson, de origen francés.

⁷ A_i , Disponibilidad inherente o intrínseca.

entorno ideal de soporte logístico, es decir, con la disponibilidad adecuada de personal, repuestos, herramientas, equipos de prueba y demás, sin considerar demora alguna, logística o administrativa (Blanchard, y otros, 1994 y Blanchard, 1995). El *MTTR* es el tiempo activo neto de reparación sin demoras y con todos los recursos disponibles al iniciarse la reparación. La A_i no contempla los mantenimientos planeados. La disponibilidad inherente está basada únicamente en la distribución de fallas y en la distribución de tiempo de reparación (Ebeling, 2005). A_i se usa como un parámetro para el diseño (Hecht y otros, 2001) y, como su palabra lo expresa, sólo reconoce actividades de reparaciones inherentes al sistema, no exógenas.

Disponibilidad inherente (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_i

EJEMPLO 4.2



$$\text{Disponibilidad inherente} = A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{110.91}{110.91 + 13.59} = 89.08\%$$

$$\text{Disponibilidad inherente} = A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{203.33}{203.23 + 14.80} = 93.21\%$$

Las empresas que invierten tiempos relevantes en actividades planeadas de mantenimiento (preventivo y/o predictivo), pueden utilizar la disponibilidad alcanzada, que sí tiene en cuenta las tareas proactivas de mantenimiento que generan no disponibilidad:

► ECUACIÓN 4.9 - Disponibilidad alcanzada - A_A^8

$$Disponibilidad\ alcanzada = A_A = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}}{\frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} + \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}}$$



Las empresas que invierten tiempos relevantes en actividades planeadas de mantenimiento pueden utilizar la disponibilidad alcanzada, que sí tiene en cuenta las tareas proactivas de mantenimiento que generan no disponibilidad.

Donde:

$MTBM$ = Mean Time Between Maintenance, o sea el tiempo medio entre mantenimientos y = Mean Time Active Maintenance = MTM = Mean Time Maintenance = tiempo medio de mantenimiento.

El tiempo medio entre mantenimientos, $MTBM$, más que un índice de confiabilidad es un indicador de la frecuencia de los mantenimientos; es función de la frecuencia de los mantenimientos planeados y no planeados, y en ausencia de mantenimiento preventivo el $MTBM$ se aproxima al $MTBF$ (Blanchard y otros, 1994).

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

Con $MTBM_c$, como el tiempo medio entre mantenimientos no planeados, se aproxima al $MTBF$ en ausencia de tareas proactivas y el $MTBM_p$ como el tiempo medio entre mantenimientos planeados.

Ahora, para el cálculo del $\overline{M}$ se usa la expresión:

$$\overline{M} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

Donde:

$MTTR$ = Mean Time To Repair = es el tiempo neto medio para realizar reparaciones o mantenimientos correctivos, sin incluir las demoras logísticas, ni los retrasos administrativos; es el mismo que se define anteriormente.

8 A_A , Disponibilidad alcanzada.

M_p = es el tiempo neto medio para ejecutar tareas proactivas de mantenimientos planeados.

El $\bar{M}$ (*Mean Time Active Maintenance*) es el tiempo medio de mantenimiento activo que se requiere para realizar una tarea de mantenimiento. Es función de los tiempos medios de mantenimiento correctivo y planeado y sus frecuencias relativas; sólo considera los tiempos activos de mantenimiento y no tiene en cuenta los tiempos administrativos y tampoco los logísticos (Blanchard, y otros, 1994 y Vallejo y otros, 2004) por demoras.

Disponibilidad alcanzada - D_A

A_A es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente cuando se requiere en cualquier tiempo bajo condiciones de operación normales y en un entorno ideal de soporte logístico, sin considerar retraso ni logístico ni administrativo, pero involucra en sus cálculos los tiempos imputables a las actividades planeadas de mantenimiento, aparte de las acciones correctivas que ya trae desde la inherente o intrínseca.

Cuando se presente el caso especial de que durante la realización de una tarea proactiva o planeada aparezca un daño que implique una reparación (o viceversa), se debe tomar la corrección como un evento independiente y considerarse los dos tiempos en forma aislada (Díaz, 1992), debido a que la reparación requiere horas-hombre adicionales a las del mantenimiento preventivo. Se puede manejar como un tiempo correctivo entre dos preventivos o simplemente tomar un preventivo por el tiempo invertido y otro correctivo o modificativo por la acción no planeada (o viceversa, si se presenta o superpone un planeado, durante la ejecución de un correctivo o modificativo). Pero en todo caso asumir los tiempos planeados y no planeados en forma separada, y se deben contabilizar por aparte si se presentan en el mismo instante.

Recuérdese que en confiabilidad los tiempos útiles son inherentes al equipo o sistema, mientras que en mantenibilidad los tiempos de reparaciones o de tareas proactivas son inherentes al recurso humano que las realiza.

A manera de ejemplo, se presenta el siguiente caso, donde los tiempos medios se valoran en forma puntual y no con simulaciones de distribuciones (que se desarrollan más adelante) que es lo que recomienda el autor. Recuérdese que en la disponibilidad alcanzada prepondera la importancia de los mantenimientos planeados y los no planeados que se tienen desde inherente.

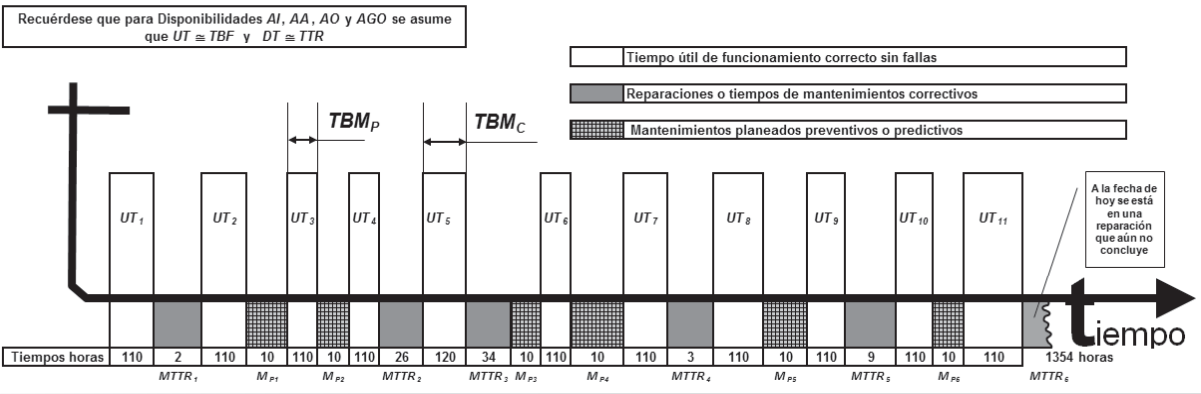


Cuando se presente el caso especial de que durante la realización de una tarea proactiva o planeada aparezca un daño que implique una reparación (o viceversa), se debe tomar la corrección como un evento independiente y considerarse los dos tiempos en forma aislada.

Recuérdese que en confiabilidad los tiempos útiles son inherentes al equipo o sistema, mientras que en mantenibilidad los tiempos de reparaciones o de tareas proactivas son inherentes al recurso humano que las realiza.

EJEMPLO 4.3

Disponibilidad alcanzada (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_A

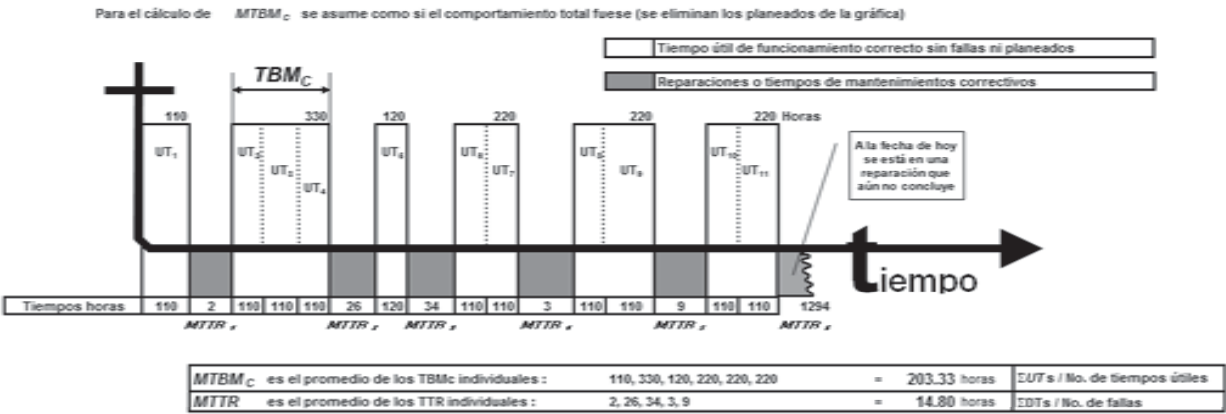


Fuente: El autor.

Una vez se configura la situación real de todos los parámetros de cálculo, como todos los UT , los $MTTR$ y los M_p , se procede a elaborar dos gráficos, uno para los cálculos con acciones de mantenimiento no planeado (correctivos y/o modificativos) y otro independiente con los mantenimientos planeados, cada uno sólo con sus valores planeados o no, donde se mantienen en ambos casos los UT o $MTBF$.

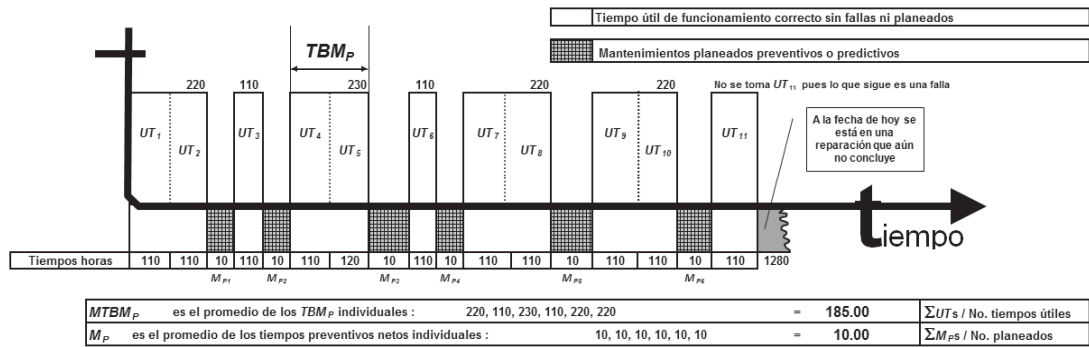
El siguiente paso es separar los dos mapas: no planeado y planeados.

Cálculos correctivos



Cálculos preventivos

Para el cálculo de $MTBM_P$ se asume como si el comportamiento total fuese (se eliminan los tiempos correctivos de la gráfica)



Fuente: El autor.

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{1}{\frac{1}{203,33} + \frac{1}{185,00}} = 96,86 \text{ horas}$$

$$\overline{M} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{\frac{14,80}{203,33} + \frac{10,00}{185,00}}{\frac{1}{203,33} + \frac{1}{185,00}} = 12,286 \text{ horas}$$

$$\text{Disponibilidad Alcanzada} = A_A = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}} = \frac{96,86}{96,86 + 12,28} = 88,74\%$$

Nótese que la disponibilidad D_A es menor que la disponibilidad inherente D_I .

Si se tienen en cuenta los tiempos logísticos y administrativos de demoras, en la gestión del mantenimiento y en la operación de equipos, antes o después de una intervención correctiva o planeada, se debe considerar la disponibilidad operacional, que se expresa mediante:

► ECUACIÓN 4.10 - Disponibilidad Operacional - D_O - A_O ⁹

Donde:

$$\text{Disponibilidad Operacional} = A_O = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}}$$

⁹ A_O , Disponibilidad operacional.

$MTBM = \text{Mean Time Between Maintenance}$ es el tiempo medio entre mantenimientos y se calcula igual que en la anterior D_A , disponibilidad alcanzada tanto para reparaciones correctivas como para mantenimientos planeados; en este elemento no inciden ADT , LDT' ni LDT . Ya que los cambios en la fracción no se dan en el numerador que es la confiabilidad, y sólo afecta el denominador en la mantenibilidad, pues incrementa los $MTTR$ y/o los M_p , en función de donde se presenten los ADT , los LDT' y los LDT , que aumentan los $MTTR$ y los M_p .

El $\bar{M}$ (que incluye los $LDT = ADT + LDT'$)¹⁰ se calcula exactamente igual que el, sólo que al momento de calcular el $MTTR$ no sólo se toman los correspondientes TTR_1 , $TTR_2, \dots, TTR_n$ netos, sino que se le suman respectivamente sus LDT pertinentes a cada una de las reparaciones. Del mismo modo, al momento de calcular el M_p se le debe sumar a cada tiempo de mantenimiento planeado su respectivo LDT , en caso de existir. Casi siempre las demoras ocurren antes del mantenimiento; debido a ello, por lo general, se le suma al evento que continúa de la acción de mantenimiento en el tiempo posterior o seguido. En algunas ocasiones ocurren demoras después de la acción de mantenimiento y antes de poner en marcha el equipo; en estos casos se le contabiliza a mantenimiento en sus respectivos $MTTR$ o M_p y se le imputa a producción (Mora, 2007a).



Si se tienen en cuenta los tiempos logísticos y administrativos de demoras, en la gestión del mantenimiento y en la operación de equipos, antes o después de una intervención correctiva o planeada, se debe considerar la disponibilidad operacional.

$$\bar{M}' = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} \quad MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

Ambos valores se calculan exactamente igual que en la disponibilidad alcanzada.

Disponibilidad operacional - D_o

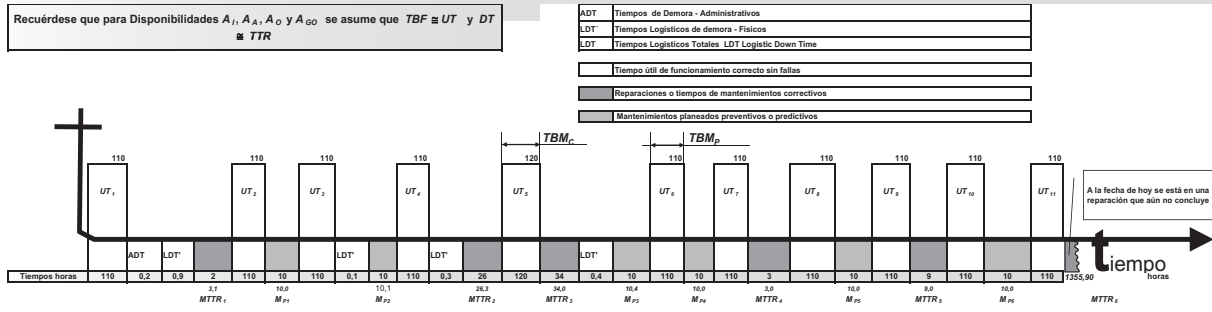
D_o es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente, cuando se requiere que funcione en cualquier tiempo bajo condiciones de operación normales, en un entorno real de soportes logísticos y abarca, por tanto, dentro de los tiempos de mantenimiento, los tiempos que se causan por los retrasos logísticos y administrativos; es decir, todos los tiempos concernientes al estado de reparación e incluye el mantenimiento programado y el no planeado. Le interesan todas las demoras, los mantenimientos planeados y los no planeados.

¹⁰ ADT son los tiempos de demora administrativa. LDT son los tiempos logísticos de demora para realizar el mantenimiento o la reparación.

Disponibilidad operacional (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_0

EJEMPLO 4.4

Recuérdese que para Disponibilidades A_1 , A_A , A_O y A_{GO} se asume que $TBF \approx UT$ y $DT \approx TTR$



$$\text{Disponibilidad Operacional} = A_O = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}}$$

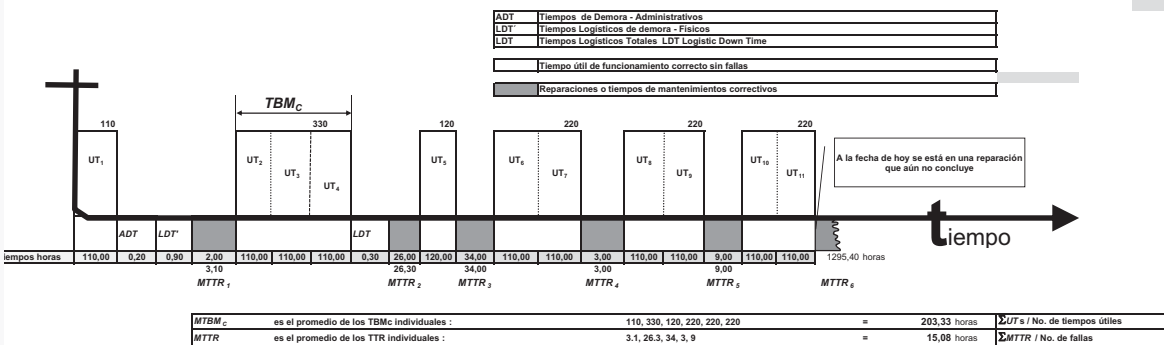
$$\text{Disponibilidad Operacional} = A_O = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}}$$

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

$$\bar{M} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

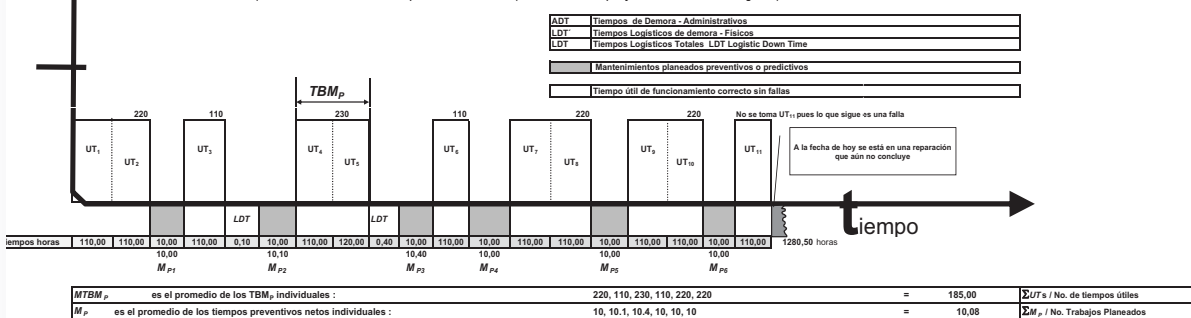
Cálculos correctivos

Para el cálculo de $MTBM_c$ se asume como si el comportamiento total fuese (se eliminan los mantenimientos y LDT's planeados de la gráfica)



Cálculos preventivos

Para el cálculo de $MTBM_p$ se asume como si el comportamiento total fuese (se eliminan los tiempos y los LDT correctivos de la gráfica)



$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{1}{\frac{1}{203.33} + \frac{1}{185.00}} = 96.86 \text{ horas}$$

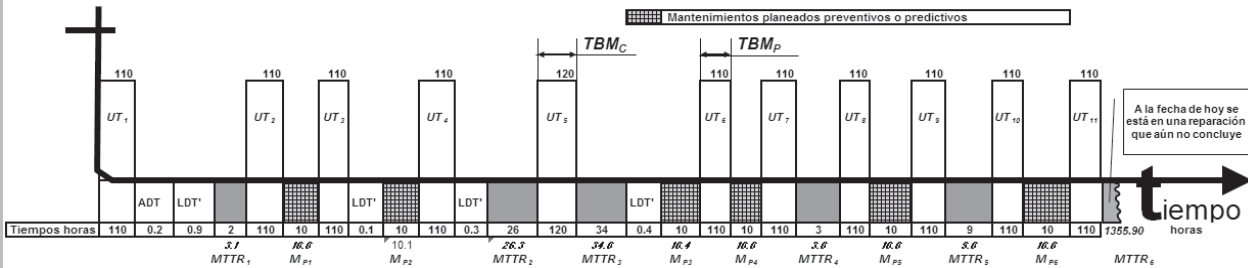
$$\bar{M} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{\frac{15.10}{203.33} + \frac{10.08}{185.00}}{\frac{1}{203.33} + \frac{1}{185.00}} = 12.46372 \text{ horas}$$

$$Disponibilidad\ Operacional = A_O = \frac{MTBM}{MTBM + M'} = \frac{96,86}{96,86 + 12,48} = 88,59\%$$

Recuérdese que para Disponibilidades A_i , A_A , A_O y A_{GO} se asume que $TBF \approx UT$ y $DT \approx TTR$

ADT	Tiempos de Demora - Administrativos
LDT'	Tiempos Logísticos de demora - Físicos
LDT	Tiempos Logísticos Totales LDT Logistic Down Time

	Tiempo útil de funcionamiento correcto sin fallas
	Reparaciones o tiempos de mantenimientos correctivos
	Mantenimientos planeados preventivos o predictivos



$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{1}{\frac{1}{203,33} + \frac{1}{185,00}} = 96,86 \text{ horas}$$

$$M' = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{\frac{15,10}{203,33} + \frac{10,08}{185,00}}{\frac{1}{203,33} + \frac{1}{185,00}} = 12,46372 \text{ horas}$$

$$Disponibilidad\ Operacional = A_O = \frac{MTBM}{MTBM + M'} = \frac{96,86}{96,86 + 12,48} = 88,59\%$$

Es menor que la $D_{A'}$, ya que en el denominador en la mantenibilidad entran los LDT y es por los tiempos logísticos la diferencia entre A_O y A_A ($89,59 - 88,74\%$), que es del 0,75%.

Los dispositivos, las máquinas, los sistemas y empresas que desean tener en cuenta en la disponibilidad el tiempo en que el equipo está disponible pero no produce pueden usar la disponibilidad operacional generalizada - D_{OG} .

► ECUACIÓN 4.12 - Disponibilidad operacional generalizada - A_{GO}^{11}

$$Disponibilidad\ Operacional\ Generalizada = A_{GO} = \frac{MTBM'}{MTBM' + M'}$$

11 A_{GO} , Disponibilidad operacional generalizada.

El cálculo de $MTBM'$ se realiza exactamente igual al de $MTBM$ de la $D_{O'}$ del caso anterior en la disponibilidad operacional, sólo que los *Ready Time* se les suman a los tiempos útiles que los anteceden o siguen (el que esté más cercano), de tal forma que los tiempos útiles correspondientes se aumentan en el valor del tiempo del *Ready Time* y, por ende, aumenta también el $MTBM_C$ o $MTBM_p$ en cada caso, tanto en reparaciones (correctivos) como en las tareas proactivas (mantenimientos planeados), con lo cual aumenta entonces el $MTBM_C$ y el $MTBM_p$; razón por la cual la $D_{O'}$ debe ser mayor que la D_O .

Los valores de $MTTR$ y M_p no varían con respecto a los valores, se calculan en D_O (disponibilidad operacional).

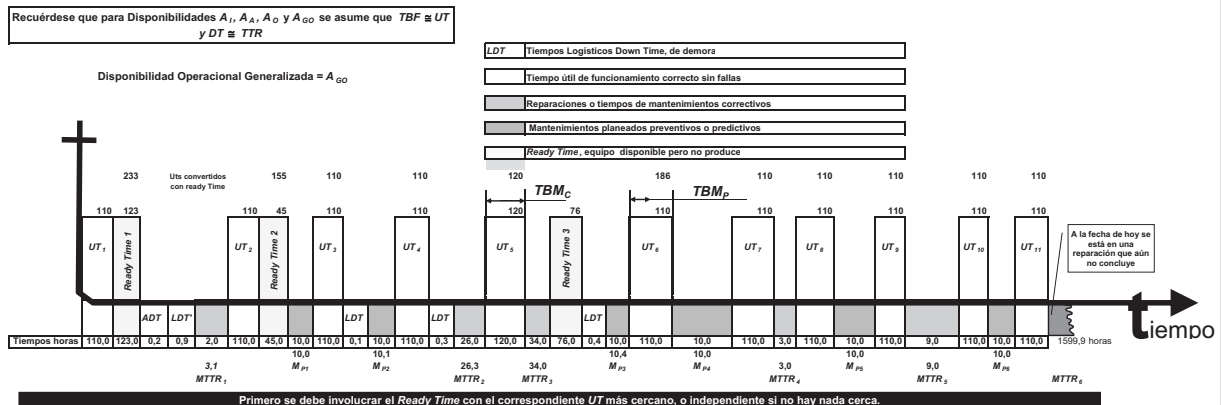
Para la estimación numérica de A_{GO} o $D_{GO'}$ se mantienen todas las premisas y paradigmas de la operacional.

Disponibilidad operacional generalizada - D_{GO}

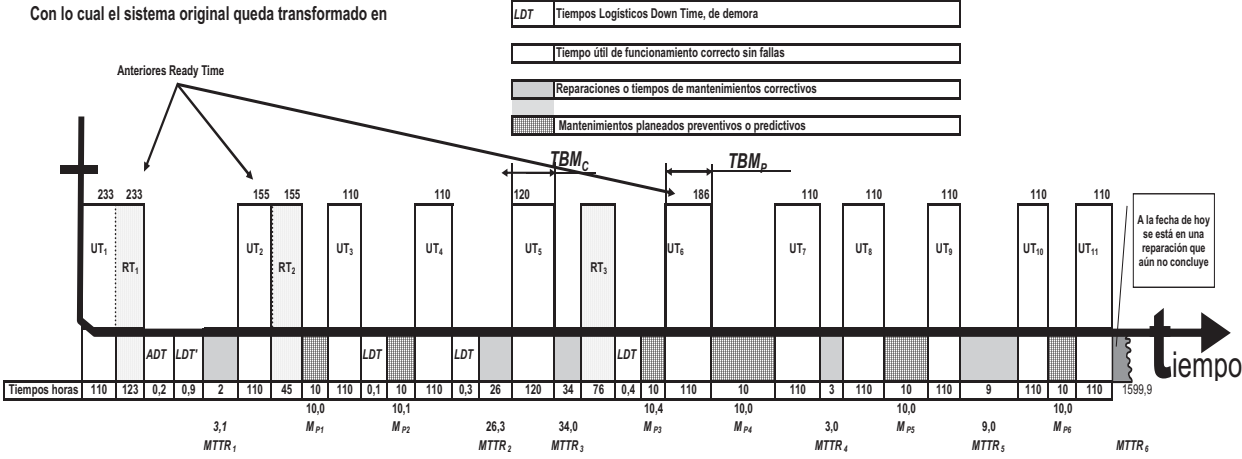
A_{GO} es útil cuando los tiempos en que los equipos están disponibles y no producen, para explicar estos lapsos de tiempo (Aven, 1999). La traducción de *Ready Time* no es exactamente literal en castellano como tiempo de alistamiento; se entiende mejor como listo en el tiempo, listo para producir; en general, significa que funciona adecuadamente mas no produce.

Disponibilidad operacional generalizada (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_{GO}

EJEMPLO 4.5

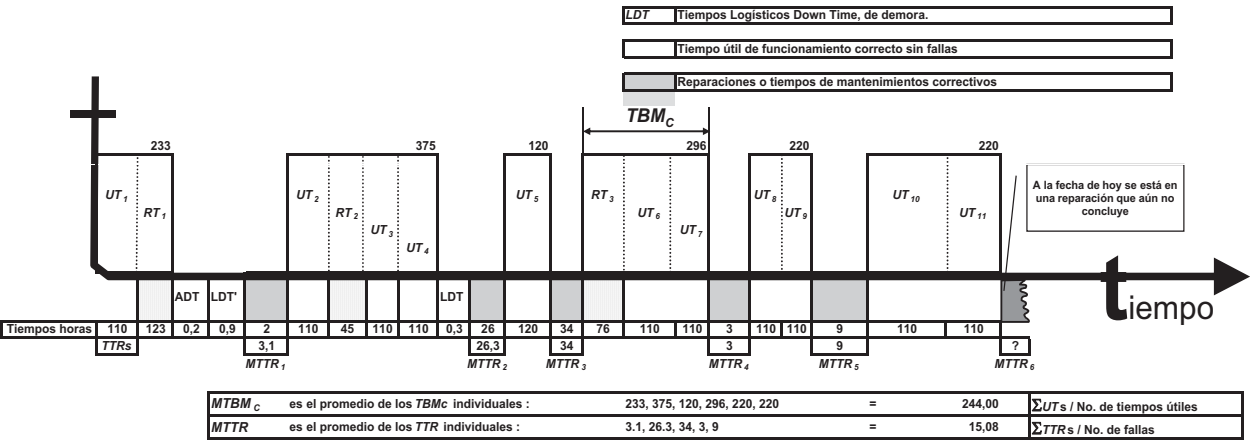


Con lo cual el sistema original queda transformado en



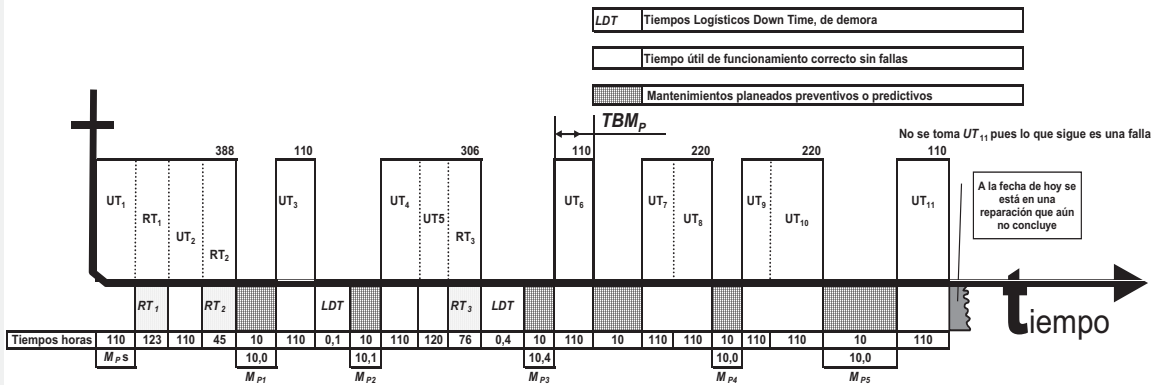
Cálculos correctivos

Para el cálculo de $MTBM_C$ se asume como si el comportamiento total fuese (se eliminan los mantenimientos y LDTs planeados de la gráfica)



Cálculos preventivos

Para el cálculo de $MTBM_p$ se asume como si el comportamiento total fuese (se eliminan los tiempos y los LDT correctivos de la gráfica)



$MTBM_p$ es el promedio de los TBM_p individuales :	388, 110, 306, 110, 220, 220	= 225,67	$\Sigma UTs / \text{No. de tiempos útiles}$
M_p es el promedio de los tiempos preventivos netos individuales :	10, 10,1, 10,4, 10, 10, 10	= 10,10	$\Sigma M_Ps / \text{No. de planeados}$

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{1}{\frac{1}{244,00} + \frac{1}{225,67}} = 117,24 \text{ horas}$$

$$\overline{M'} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{\frac{15,08}{244,00} + \frac{10,10}{225,67}}{\frac{1}{244,00} + \frac{1}{225,67}} = 12,4928 \text{ horas}$$

$$\text{Disponibilidad operacional generaliza} = A_{GO} = \frac{MTBM \text{ (incluido Ready Time)}}{MTBM \text{ (incluido Ready Time)} + \overline{M'}}$$

$$\text{Disponibilidad operacional generaliza} = A_{GO} = \frac{117,24}{117,24 + 12,4928} = 90,37\%$$

Al tener en cuenta los tiempos disponibles (MRT Ready Time) se mejora la disponibilidad operacional en un 1,78%, que resulta de restar A_{OG} menos A_O (90,37% - 88,59%).

La diferencia entre la disponibilidad inherente y la alcanzada permite determinar el porcentaje en que se disminuye la disponibilidad debido a las tareas proactivas; en el ejemplo se determina que la disminución es del 4,47%, que es la resta de A_i menos A_A (93,21% - 88,74%).

En síntesis, con el mismo ejemplo se logra visualizar los cambios en la estimación de la disponibilidad, así:

Ejemplos de diferentes disponibilidades

GRÁFICO 4.9

Disponibilidad	Símbolo		Valor %
	Inglés	Castellano	
Genérica	A_G	D_G	89,08)
Inherente o intrínseca	A_I	D_I	93,21
Alcanzada	A_A	D_A	88,74
Operacional	A_O	D_O	88,59
Operacional generalizada	A_{OG}	D_{OG}	90,37



Los diferentes factores que afectan la funcionalidad de los equipos son considerados por las distintas maneras de calcular la disponibilidad; la empresa asume la que más le conviene y adopta la que puede usar, de acuerdo con los datos que posee.

Se observa que en la medida en que se incorporan más conceptos de no disponibilidad cambia el valor de la disponibilidad (desde la A_A hacia A_O disminuye por los LDT y al llevarla a la A_{GO} mejora al aumentar los UT debidos al *Ready Time*). De igual manera, mejora el índice de disponibilidad al considerar sólo el tiempo activo de reparación neto en la A_I .

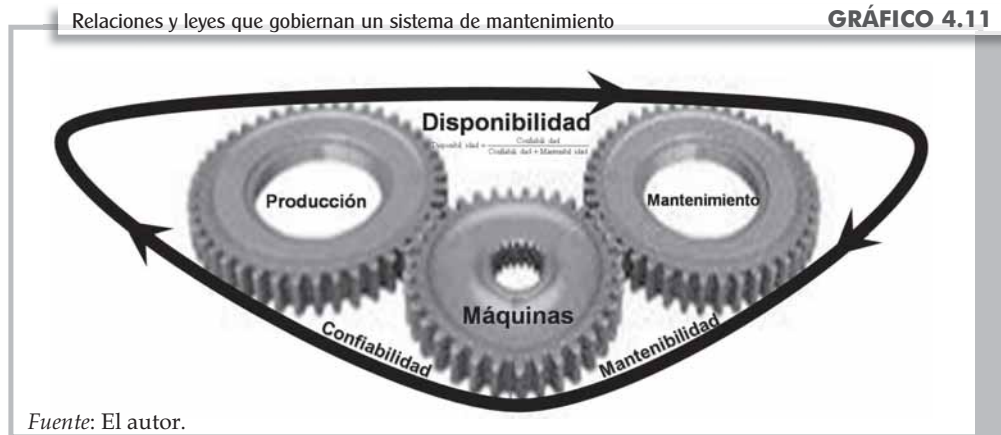
En síntesis, se puede concluir que los diferentes factores que afectan la funcionalidad de los equipos son considerados por las distintas maneras de calcular la disponibilidad; cada empresa asume la que más le conviene y, sobre todo, adopta la que puede usar de acuerdo con los datos que posee.

Factores que afectan la funcionalidad de los equipos y las disponibilidades que los consideran

GRÁFICO 4.10

		Factores que disminuyen la funcionalidad del dispositivo, equipo o sistema						
		Tiempo de no disponibilidad <i>Down Time</i> de cualquier índole	Fallas que implican reparación correctiva	Mantenimientos planeados preventivos o predictivos	Tiempos administrativos	Retrasos logísticos de insumos, repuestos o recursos humanos	Tiempos logísticos que generan indisponibilidad Pts suma de ADT + LDT'	Ready Time, tiempo en que el equipo está disponible pero no produce
Disponibilidad que considera el concepto	Término	DT	TTR	PM	ADT	LDT'	LDT	RT
	Genérico A_G	X						
	Inherente A_I		X					
	Alcanzada A_A		X	X				
	Operacional A_O		X	X	X	X	X	
	Operacional generalizada A_{GO}		X	X	X	X	X	X

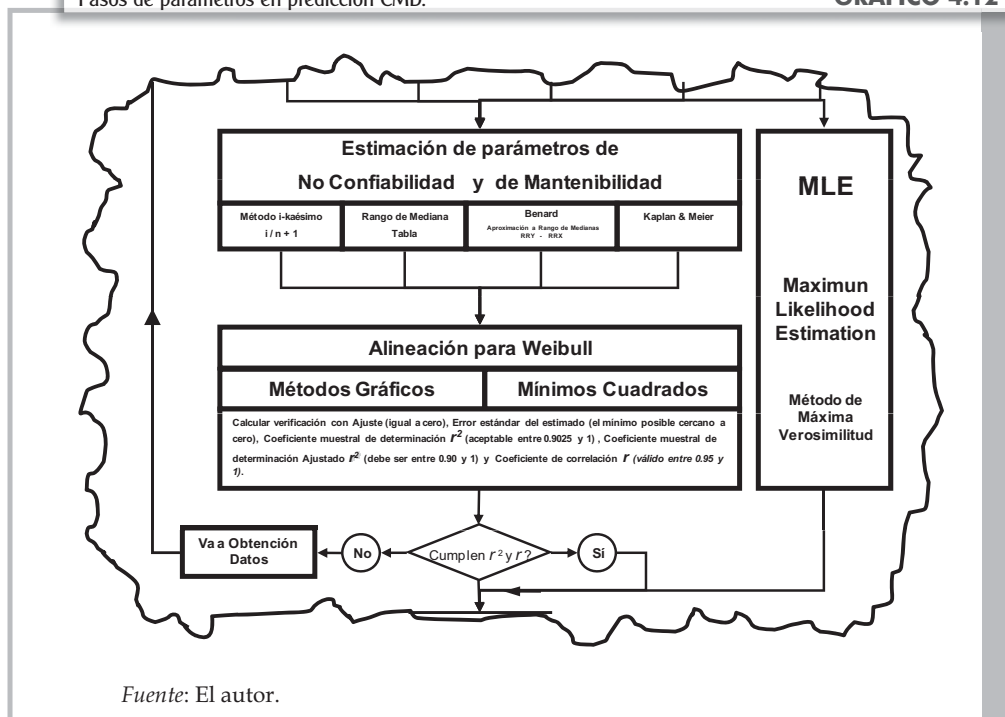
Los conceptos, aplicaciones, demostraciones y fundamentos que se esbozan hasta el momento dejan sentadas las bases para entender las relaciones y leyes existentes entre los elementos de un sistema de mantenimiento y las relaciones que los gobiernan, bajo un enfoque sistémico. Todo con el fin de predecir el comportamiento del CMD y de cada una de sus variables, al menos con el método puntual, que si bien no es muy exacto, es muy útil para las empresas que se inician en el tema, aparte de que otorga toda la rigurosidad y la metodología de cálculo, aplicables en los otros modelos de predicción CMD.



El siguiente paso, en el *Gráfico 4.12* es la estimación de parámetros de confiabilidad y mantenibilidad, para luego predecir el comportamiento del CMD y sus variables de cálculo y, en seguida, diseñar las estrategias, la táctica y las acciones pertinentes de mantenimiento que se realizan en el corto, en el mediano y en el largo plazos sobre el sistema o los equipos que se analizan, tanto en la gestión como en la operación de mantenimiento y producción.

Pasos de parámetros en predicción CMD.

GRÁFICO 4.12



CAPÍTULO 5

CONFIABILIDAD - MANTENIBILIDAD CMD - ESTIMACIÓN DE $F(T_j)$ Y $M(T_j)$

Los conceptos y desarrollos que se plantean en este capítulo corresponden a los pasos que se requieren para la estimación y predicción del CMD, lo que permite ejercer control total sobre el sistema de mantenimiento y producción en cuanto a operación y sostenimiento eficiente de los equipos, al tiempo que se logra el uso efectivo de los recursos y productos de que se dispone. Del mismo modo, se introducen las bases para los cálculos CMD con el modelo de *distribuciones*.

5.1 CONFIABILIDAD - FALLAS

La medida de la confiabilidad de un equipo es la frecuencia con la cual ocurren las fallas en el tiempo (ESReDa, 1998). Si no hay fallas, el equipo es 100% confiable; si la frecuencia de fallas es muy baja, la confiabilidad del equipo es aún aceptable, pero si es muy alta, el equipo es poco confiable. Un equipo con un muy buen diseño, con excelente montaje, con adecuadas pruebas de trabajo en campo y con un apropiado mantenimiento nunca debe fallar (en teoría); sin embargo, la experiencia demuestra que incluso los equipos con mejores diseños, montajes y mantenimientos fallan alguna vez (Bazovsky, 2004).

La confiabilidad está estrechamente relacionada con la calidad de un producto y es con frecuencia considerada un componente de ella. La calidad se define cualitativamente como la cantidad de satisfacción en cuanto a los requerimientos de los usuarios de un producto. La confiabilidad se interesa por cuánto tiempo el producto continúa en funcionamiento después de entrar en operación. Una baja calidad del producto implica disminución de su confiabilidad, de la misma manera que una calidad alta implica confiabilidad elevada.



La medida de la confiabilidad de un equipo es la frecuencia con la cual ocurren las fallas. Si no hay, el equipo es 100% confiable; si la frecuencia es muy baja, la confiabilidad del equipo es aún aceptable, pero si es muy alta, el equipo es poco confiable.

La confiabilidad se define como la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales se diseña durante un período de tiempo específico y bajo condiciones normales de operación, ambientales y del entorno.

La confiabilidad se define como la probabilidad de que un equipo¹ desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales se diseña, durante un período de tiempo específico y bajo condiciones normales de operación, ambientales y del entorno (Blanchard, 1995; Blanchard y otros, 1994; Ebeling, 2005; Nachlas, 1995; Ramakumar, 1996; Sotskov, 1972; Leemis, 1995; O'Connor, 2002; Kececioglu, 1995; Kelly, y otros, 1998; Dounce, 1998; Rey, 1996; Halpern, 1978; Forcadas, 1983; Modarres, 1993; Barlow, 1998; Barlow y otros, 1996; Bazovsky, 2004; Lewis, 1995; Nakajima y otros, 1991).

La definición de confiabilidad muestra que existen cuatro características que determinan su estructura: probabilidad, desempeño satisfactorio, período y condiciones específicas.

5.2 PROBABILIDAD

Las mediciones de CM^2 se hacen en términos de probabilidad, la cual se define en forma clásica, como el resultado de dividir el número de veces de los casos estudiados (intentos o eventos, favorables o no) entre el número total posible de casos (intentos o eventos); en la medida en que la cantidad³ de intentos o casos posibles sea mayor, la probabilidad se vuelve más exacta y cercana al valor real. Por ejemplo, la probabilidad de un desempeño eficaz durante 80 horas de 0,75 (o 75%), indica que el equipo funciona satisfactoriamente 75 veces de cada 100 ensayos, durante al menos 80 horas (Blanchard, y otros 1994).

5.3 DESEMPEÑO SATISFACTORIO

Este indica que se deben establecer criterios específicos para describir lo que se considera como una operación satisfactoria. Una combinación de factores cualitativos y cuantitativos definen las funciones que el sistema (equipo) debe lograr, y que usualmente son las especificaciones del sistema (Blanchard y otros, 1994). Implica, además, conocer cuándo el equipo falla y ya no se desempeña satisfactoriamente. Para un automóvil, por ejemplo, un adecuado nivel de satisfacción consiste en que se pueda desplazar; si es así, el auto se desempeña satisfactoriamente, aun si su radio se daña o ciertas luces no funcionan (Leemis, 1995).

5.4 PERÍODO

Es la variable aleatoria de la definición de confiabilidad y se refiere a la duración del funcionamiento o longitud de vida; no necesariamente tiene que ser dado en horas, días, meses o años; de acuerdo con el sistema, el tiempo se puede medir con un reloj,

1 Cuando se refiere a un equipo se abarcan sistemas, unidades, componentes y, en general, todo elemento que represente una unidad lógica de seguimiento.

2 CM, Confiabilidad, mantenibilidad.

3 Se recomiendan valores superiores a treinta y un experimentos; de acuerdo con el teorema del límite central, que menciona que cuando la muestra en poblaciones atípicas es igual o superior a treinta (o 31) elementos, la media muestral se asemeja a la media poblacional.

el tiempo exacto de operación, el número de ciclos⁴ de operación o incluso en otras medidas como kilómetros recorridos, como es el caso de las llantas de un automóvil (Ebeling, 2005; Ramakumar, 1996). El análisis de dicha variable aleatoria implica el uso de las distribuciones de probabilidad, que deben ser modelos razonables de la dispersión de los tiempos de vida⁵ (Nachlas, 1995).

5.5 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Son las circunstancias en las que se espera que el equipo funcione, y constituyen el cuarto elemento relevante de la definición básica de confiabilidad; incluyen factores como ubicación geográfica donde se espera que el equipo opere, el medio ambiente⁶, vibraciones, transporte, almacenamiento, empaque, cantidad de la carga⁷, etc. (Ramakumar, 1996).

5.6 CURVA DE CONFIABILIDAD

La forma gráfica como se expresa la confiabilidad depende de su formulación matemática. La probabilidad de ocurrencia de un evento se define mediante la expresión:



En punto a confiabilidad, existen cuatro características que determinan su estructura: probabilidad, desempeño satisfactorio, período y condiciones específicas.

La curva de confiabilidad es la representación gráfica del funcionamiento después de que transcurre un tiempo t en un período T total.

► ECUACIÓN 5.1 - Probabilidades de ocurrencia de un evento (de falla) y confiabilidad

$$P_f = \left(\frac{n}{N} \right)$$

Donde:

n es(son) el(los) evento(s) de falla (en confiabilidad) por estudiar; N es el número total de eventos posibles; P_f es la probabilidad de falla.

$$P_f = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{N} \right)$$

Donde:

P_f se define como la probabilidad de que ocurra el evento n ante una serie grande o infinita N , de eventos posibles.

4 Un ciclo puede ser el aterrizaje de un avión o el encendido de un motor eléctrico, o la cantidad de productos o servicios que genera, justo en un período.

5 Tiempos de vida entendidos como la variable aleatoria, sin olvidar que puede estar representada por otras medidas como el kilometraje recorrido, etc.

6 Por ejemplo, temperatura o ciclos de temperatura, humedad, etc.

7 Entendida en términos generales y no sólo de esfuerzos.

$R_a = 1 - P_f$ con R_a como la probabilidad de confiabilidad o de éxito o de supervivencia, en un tiempo a , siendo P_f la probabilidad de falla en ese mismo tiempo a (Ramakumar, 1996).

La curva de confiabilidad es la representación gráfica del funcionamiento después de que transcurre un tiempo t en un período T total. Se puede entender de dos maneras: la primera consiste en la representación de la probabilidad de confiabilidad o supervivencia que tiene un elemento, máquina o sistema después de que transcurre un determinado tiempo t ; la otra forma de interpretarla es cuando se analizan varios o múltiples elementos (no reparables, normalmente) similares que tienen la misma distribución de vida útil; en este caso expresa el porcentaje de ellos que aún funcionan después de un tiempo t .

■ ECUACIÓN 5.2 - Representación matemática de la función de confiabilidad

$$R(t) = P[t < T]$$

Donde:

$R(t)$ es la función de confiabilidad o supervivencia, la cual decrece en la medida en que se incrementa el tiempo, al igual $R(0)=1$ o sea que siempre la probabilidad de confiabilidad de cualquier elemento antes de iniciar su funcionamiento es máxima del ciento por ciento (100%); t es el tiempo determinado para evaluar el funcionamiento.

Límite $R(t) = 0$, expresa que todo elemento o máquina, siempre entra en estado de falla, así sea en un tiempo grande o infinito (Leemis, 1995).

5.7 EJEMPLO DE CÁLCULO Y OBTENCIÓN DE CURVA DE CONFIABILIDAD

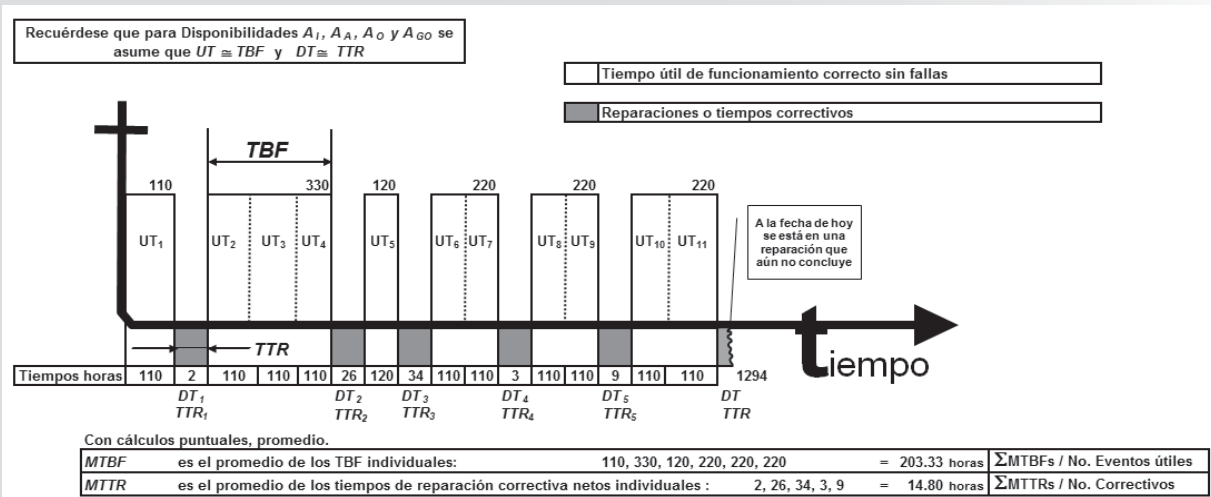
El comportamiento de una máquina en el tiempo se muestra en el siguiente ejemplo, a partir de los tiempos que tiene en el registro histórico de fallas, reparaciones, mantenimientos planeados, tiempos de demora, entre otros; se presentan los cálculos de rigor para estudiar la curva de confiabilidad y sus parámetros asociados. A efectos del ejemplo, se desea calcular la confiabilidad en un caso de disponibilidad inherente y para ello se utiliza la distribución de Weibull con rango de mediana con los parámetros de Beta = 2,00, Eta o Alfa = 577,86, $t_0^8 = 0$; todo con el fin de valorar la curva de confiabilidad $R(t)$ en forma gráfica; en la medida en que aumenta el tiempo t , menor es la probabilidad de supervivencia del elemento en estudio.

8 T_0 , Tiempo a partir del cual se empiezan a presentar las fallas de una forma típica; se asume que en el rango entre $0 < t < t_0$ la probabilidad de falla es muy baja o inexistente.

Curva de confiabilidad en A_p , registros históricos y cálculos de Beta y Eta, Weibull

EJEMPLO 5.1

Se toma el mismo ejemplo que se utiliza en el cálculo de disponibilidades del *Ejemplo 4.2* - Disponibilidad inherente (cálculos puntuales sin distribuciones) - d_p , donde:



Dato #	Fecha y Hora Inicio de Fallas	Hora Fin de Falla, Inicio de operación normal	TBF	TTR	Día y Hora Inicio UT	Día y Hora Final del UT
			Horas			
1		00 - enero Año inicia a 00:00 horas	110		01 - enero - año inicio a 00:00 horas	04 - enero - año inicio a 14:00 horas
2	04 - enero Año inicio a 14:00 horas	04 - enero Año inicia a 16:00 horas	330	2	04 - enero - año inicio a 16:00 horas	18 - enero - año inicio a 10:00 horas
3	18 - enero año inicio a 10:00 horas	19 - enero Año inicia a 12:00 horas	120	26	19 - enero - año inicio a 12:00 horas	24 - enero - año inicio a 12:00 horas
4	24 - enero año inicio a 12:00 horas	25 - enero Año inicia a 22:00 horas	220	34	25 - enero - año inicio a 22:00 horas	04 - febrero - año inicio a 02:00 horas
5	04 - febrero año inicio a 02:00 horas	04 - febrero Año inicia a 05:00 horas	220	3	04 - febrero - año inicio a 05:00 horas	13 - febrero - año inicio a 09:00 horas
6	13 - febrero año inicio a 09:00 horas	13 - febrero Año inicia a 18:00 horas	220	9	13 - febrero - año inicio a 18:00 horas	22 - febrero - año inicio a 22:00 horas
7	22 - febrero año inicio a 22:00 horas		Ahora			

Estimación de parámetros con aproximación de Rango de Medianas Benard RRY - Weibull					Alineación con regresión - Mínimos Cuadrados		
1	2	3	4	5	6	7	8
No. Datos	Datos de operación sin fallas (en horas)	Censura	Horas de operación sin fallas, organizados en forma ascendente	RM Rango de Mediana Benard denominada F(t)	Uno sobre (1 - R.M.)	$\ln(\ln(1/(1-R.M.)))$ es la Y de la regresión	$\ln$ de datos es la X de la regresión
1	110	1	110	0.1094	1.122807	-2.15562	4.70048
2	330	1	120	0.2656	1.3617021	-1.17527	4.78749
3	120	1	220	0.4219	1.7297297	-0.60154	5.39363
4	220	1	220	0.5781	2.3703704	-0.14729	5.39363
5	220	1	220	0.7344	3.7647059	0.28192	5.39363
6	220	1	330	0.8906	9.1428571	0.79434	5.79909

6 Elementos totales

Intercepto	-12.9167	
β - Beta	2.3674	
Alfa o Eta	234.1834	Horas
r	0	η
MTBF Tiempo promedio de funcionamiento sin fallas	207.5499	Horas
$MTBF = \eta * \text{Gamma } \Gamma' (1+1/\beta)$		

Resulta que en este ejemplo hay 3 UT que son iguales, por lo tanto el tratamiento de alineación es diferente al evento en que no repitieran, se toman los tres iguales y solo se deja uno, el que tenga el $F(t)$ más crítico a la luz de las fallas, para el caso particular se toma $F(t_e)$ que vale 0.7344 y los dos similares se eliminan, el caso para alineación se trabaja como si fuese de dos datos menos, o sea de solo 4 eventos y ahí sí se procede a la alineación. En el caso de que se trabaje con $MTTR$, los DT o TTR repetidos se manejan igual que lo que se acaba de explicar para TBF

Nuevos cálculos reales y correctos por repetición de UT

Estimación de parámetros con aproximación de Rango de Medianas Benard RRY - Weibull				
1	2	3	4	5
No. Dato	Datos de operación sin fallas Runs Hours = ? en horas	Censurado o No.	Horas de operación sin fallos, organizados con? ascendente	RM - Rango de Mediana Berard - F(t)
1	110	1	110	0,1094
2	330	1	120	0,2656
3	120	1	220	
4	220	1	220	
5	220	1	220	0,7344
6	220	1	330	0,8906

Alineación con regresión - Mínimos cuadrados		
6	7	8
1/(1-Rango Mediana)	$\text{Ln}(\text{Ln}(1/(1-\text{RM})))$ - Y de la regresión	Ln de datos -X de la regresión
1.122807018	-2.15562	4.7004804
1.361702128	-1.17527	4.7874917
3.764705882	0.28192	5.3936275
9.142857143	0.79434	5.7990927

4 Elementos totales

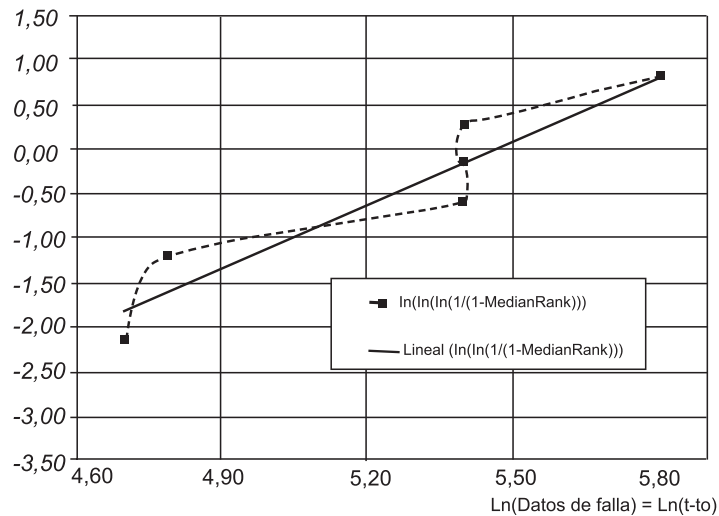
Intercepto	-13.4476	
β - Beta	2.49798	
Alfa o Eta	220.6024	η
r	0	R_o
MTBF Tiempo promedio de funcionamiento sin fallas	195.7173	Horas
$MTBF = \eta * \text{Gamma } \Gamma (1+1/\beta)$		

Fuente: El autor.

Con *TBF* como tiempo entre fallas y *TTR* como tiempo para reparar.

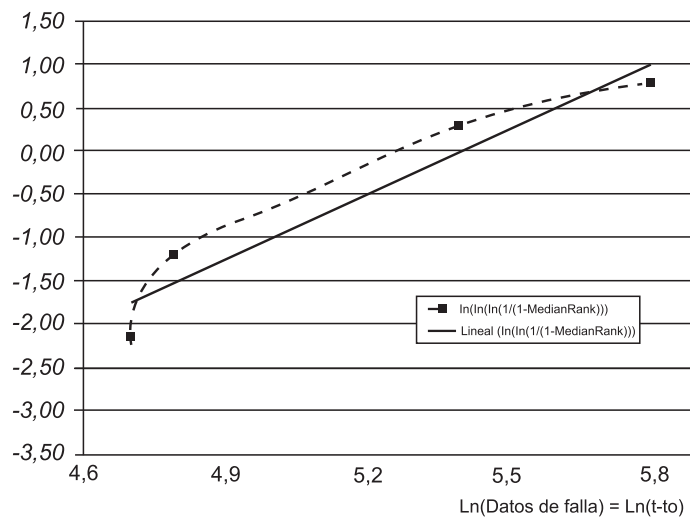
Alineación de TBF y aproximaciones rango de medianas RRY con seis datos

GRÁFICO 5.1



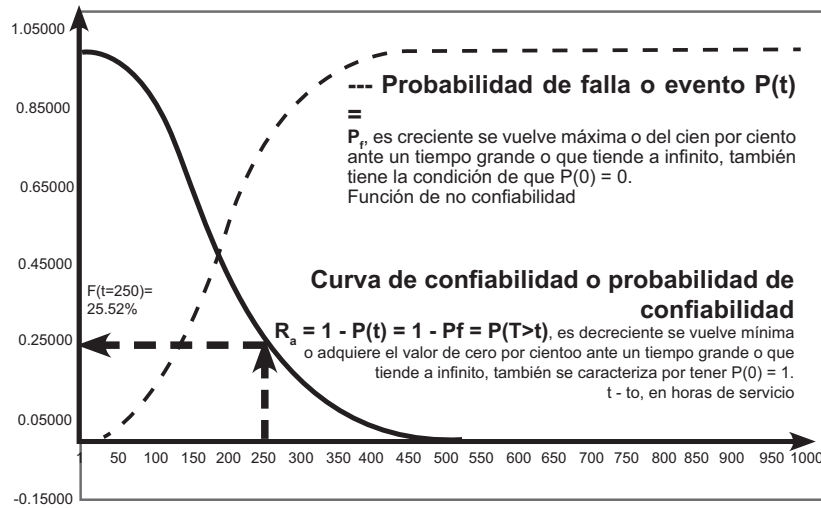
Alineación de TBF y aproximaciones rango de medianas RRY con cuatro datos

GRÁFICO 5.2



Curva de confiabilidad y de probabilidad de falla para distribución Weibull con aproximación de rango de mediana RRY Benard y alineación por regresión con Beta = 2,49198 y Eta (Alfa)=220,6024; con $t_0 = 0$ horas, con cuatro UT

GRÁFICO 5.3



La función de confiabilidad permite responder la pregunta: ¿Cuál es la probabilidad de que la máquina dure más de T horas sin fallas en la función $R(t) = P(T > t)$? Si se toma el punto del Gráfico 5.3 para $R(250) = P[T > 250]$, se lee del gráfico anterior y del cuadro adjunto en el Ejemplo 5.1. Ejemplo de la curva de confiabilidad en A_r , registros históricos y cálculos de Beta y Eta en Weibull, la cual expresa que la probabilidad de que un elemento dure más de 250 horas sin fallar es del 25,52%. Si se hace la lectura para múltiples elementos similares o equipos no reparables se expresa que después de 250 horas deben funcionar correctamente más del 25,52% de ellos; como también se visualiza que existe una probabilidad del 98,78% de que un elemento entre en falla antes de 400 horas.

Probabilidad de duración de la máquina.

CUADRO 5.1

Tiempo en horas -t	Función de probabilidad de fallas acumuladas -f.d.p.s. - Suma de fallas hasta el tiempo t $P(t) = 1 - R(t)$ $= F(t)$ %	Curva de confiabilidad $R(t) = 1 - F(t)$ %
1	0,00	100,00
50	2,44	97,56
100	13,00	87,00
150	31,78	68,22
200	54,31	45,69
250	74,48	25,52
300	88,37	11,63
350	95,75	4,25
400	98,78	1,22
450	99,73	0,28
500	99,95	0,05
550	99,99	0,01
600	100,00	0,00
650	100,00	0,00
700	100,00	0,00

Nótese que en este ejemplo explicativo sólo se tienen cuatro *TBF* y cinco *TTR*, pero en la realidad al simular comportamientos de fallas y/o reparaciones deben ser al menos 31 datos de cada uno (teorema del límite central) (Levin, 1996).

La capacidad de un equipo para funcionar correctamente sin interrupciones⁹ se puede conocer mediante la utilización de los indicadores de confiabilidad, los cuales deben ser fáciles de manejar y entendibles; su procedimiento de cálculo debe estar al alcance de los usuarios normales, y sus indicadores deben ser la menor cantidad posible (González, 2004). Para ello en la sección de disponibilidad se hace un tratamiento suficiente de dichos indicadores y en este libro el programa informático de la Web capaz de realizar el cálculo del CMD, con una fácil interpretación que proporciona su entendimiento y aplicación.

Los tiempos de operación sin fallas, y los períodos invertidos en reparaciones se pueden analizar de varias formas, una de las cuales es mediante el uso de distribuciones ya estandarizadas que emulen su comportamiento en el tiempo, y también por métodos puntuales. Otra manera es tratar de encontrar funciones matemáticas que reflejen el comportamiento en el tiempo de las fallas, de las operaciones sin falla o de las reparaciones

9 Debidas a fallas imprevistas, a falta de insumos, a falta de energía o información o por cualquiera otra razón.



Los tiempos de operación sin fallas, y los períodos invertidos en reparaciones se pueden analizar de varias formas, una de las cuales es mediante el uso de distribuciones ya estandarizadas que emulen su comportamiento en el tiempo.

Mantenibilidad es la probabilidad de que un elemento, máquina o dispositivo, puedan regresar nuevamente a su estado de funcionamiento normal después de una avería, falla o interrupción productiva.

de los elementos a través del análisis de sus materiales, componentes, comportamiento físico y funcional, variables de condición de estado (desgaste, temperaturas, viscosidad, entre otros), efectos, etc., con el fin de estimar su actuación en el tiempo.

5.8 MANTENIBILIDAD – REPARACIONES

Se denomina mantenibilidad a la probabilidad de que un elemento, máquina o dispositivo, puedan regresar nuevamente a su estado de funcionamiento normal¹⁰ después de una avería, falla o interrupción productiva (funcional o de servicio), mediante una reparación que implica realizar unas tareas de mantenimiento, para eliminar las causas inmediatas que generan la interrupción. La normalidad del sistema al restaurarse su funcionalidad se refiere a su cuerpo y a su función.

Se asume que para restaurar el nivel de confianza de funcionalidad al equipo, la reparación se hace con personal adecuado con las habilidades necesarias y las herramientas adecuadas, con los datos y la información técnica pertinente, con las características específicas de la función del equipo, con el conocimiento de los factores ambientales y de entorno que requiere el equipo para funcionar normalmente, con unos períodos de tiempo normales ya conocidos para realizar las tareas específicas de mantenimiento (Knezevic, 1996; Kececioglu, 1995; Rey, 1996; Blanchard y otros, 1994; Kelly y otros, 1998 y Blanchard, 1995).

La mantenibilidad se asocia a la facilidad con que un elemento o dispositivo se puede restaurar¹¹ a sus condiciones de funcionalidad establecidas, lo cual implica tener en cuenta todas las características y hechos previos ocurridos antes de alcanzar ese estado de normalidad, tales como: diseño, montaje, operación, habilidades de los operarios, las modificaciones realizadas, las reparaciones anteriores, la capacidad de operación, la confiabilidad, los mantenimientos realizados a lo largo y ancho de la vida útil del equipo, el entorno, la legislación pertinente, la calidad de los repuestos, la limpieza, el impacto ambiental que genera, etc., que influyen directamente en el grado de mantenibilidad de un equipo.

En general, la forma más clara de medir la mantenibilidad es en términos de los tiempos empleados en las diferentes restauraciones, reparaciones o realización de las tareas de mantenimiento requeridas para llevar nuevamente el elemento o equipo a su estado de funcionalidad y normalidad. La mantenibilidad expresa la capacidad con que

10 Su estado de referencia normal no necesariamente tiene que ser igual al diseño original, se refiere a la normalidad como las condiciones usuales en que el equipo genera servicios o productos, sin problema alguno.

11 Se parte de la base de que sólo es posible aplicarles mantenimiento a aquellos equipos susceptibles de ser reparados. A los elementos o aparatos desechables que no tienen reparación o que sale más costoso realizarla, no se les puede medir la mantenibilidad.

un equipo se deja mantener para regresarlo a su estado de referencia. El mantenimiento consiste en las acciones concretas que se realizan para mejorar la mantenibilidad, y es esta última la calificación de cómo se realiza el mantenimiento.

En síntesis, hasta el momento se puede afirmar que la confiabilidad permite establecer y medir cómo actúa el área de producción en la administración y explotación de los equipos para generar bienes y servicios y, por otro lado, la mantenibilidad evalúa la gestión y la operación del mantenimiento (Mora, 1999, 2007c) que se realiza a esos elementos o máquinas. La disponibilidad es el adjetivo calificativo integral de las dos áreas (producción y mantenimiento, actuando conjuntamente), como de otras divisiones de la empresa; mide la obtención de productos y bienes intangibles de la empresa en general. La confiabilidad es responsabilidad de producción, la mantenibilidad es compromiso de mantenimiento y la disponibilidad es encargo de la gerencia o dirección que está por encima de ambas y que abarca probablemente otras áreas de la compañía.

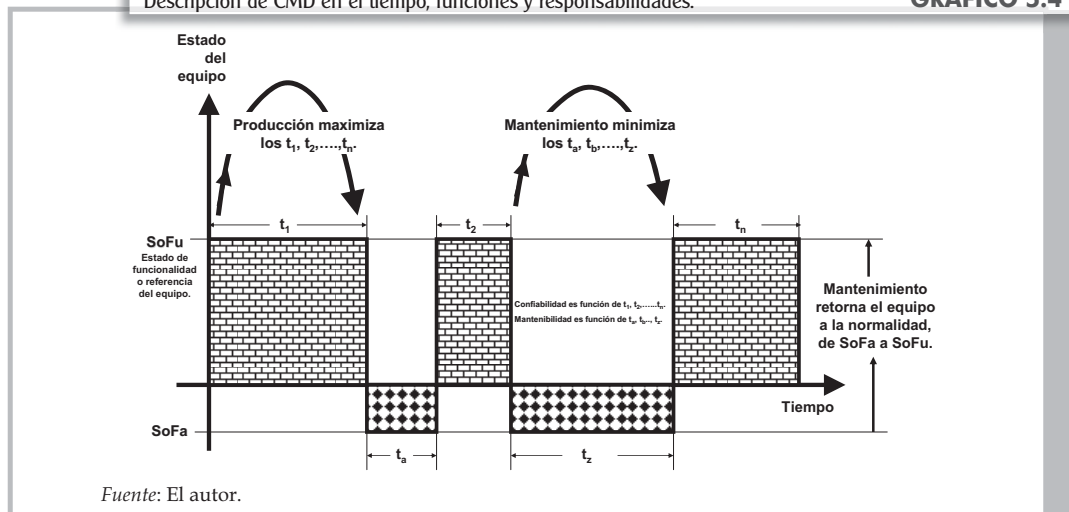
Es más usual que los diseñadores, fabricantes, usuarios e instaladores de máquinas se preocupen más por la funcionalidad del equipo que por su mantenibilidad. En la actualidad los industriales, empresarios de servicios, diseñadores, constructores, ingenieros, técnicos, tecnólogos, expertos, etc., dan mucha importancia a las medidas de CMD porque son indicadores científicos y prácticos que permiten controlar todas las actividades inherentes a mantenimiento, producción e ingeniería de fábricas. La industria militar utiliza con mucho énfasis estas metodologías para el control de sus equipos.

La mantenibilidad se asocia a la facilidad con que un dispositivo se puede restaurar a sus condiciones de funcionalidad establecidas, lo cual implica tener en cuenta todas las características y hechos previos ocurridos antes de alcanzar ese estado de normalidad.

En síntesis, se puede afirmar que la confiabilidad permite establecer y medir cómo actúa el área de producción en la administración y explotación de los equipos para generar bienes y servicios.

Descripción de CMD en el tiempo, funciones y responsabilidades.

GRÁFICO 5.4





Es más usual que los diseñadores, fabricantes, usuarios e instaladores de máquinas se preocupen más por la funcionalidad del equipo que por su mantenibilidad.

La ingeniería de mantenibilidad se crea cuando los diseñadores y fabricantes comprenden la carencia de medidas técnicas y disciplinas científicas en el mantenimiento.

Se pueden reducir los costos de mantenimiento en dos ambientes: en la confiabilidad, mediante el control de sus indicadores y en la mantenibilidad, que contribuye a disminuir los tiempos de reparaciones y servir de base para el análisis de fallas.

La ingeniería de mantenibilidad se crea cuando los diseñadores y fabricantes comprenden la carencia de medidas técnicas y disciplinas científicas en el mantenimiento. Por ello es una disciplina científica que estudia la complejidad, los factores y los recursos relacionados con las actividades que debe realizar el usuario para conservar la mantenibilidad de un producto y que elabora métodos para su cuantificación, evaluación y mejora (Mora, 2007b).

La forma como se pueden reducir los costos de mantenimiento se enfoca en dos ambientes: en la confiabilidad, mediante el control de sus indicadores (González, 2004), en especial el indicador Beta para garantizar el nivel de funcionalidad y fiabilidad del equipo, al ampliar los tiempos entre mantenimientos planeados; y en la mantenibilidad que contribuye a disminuir los tiempos de reparaciones y servir de base para el análisis de fallas *FMECA*¹², en la erradicación de las fuentes de paradas imprevistas y fallas.

La magnitud del tiempo necesario que se emplea para la recuperación de la función sólo se puede intervenir en una etapa muy al inicio del proceso de diseño, por medio de decisiones relacionadas con la complejidad de la tarea de mantenimiento, la accesibilidad de los elementos, la seguridad de recuperación, la facilidad de prueba y la localización física del elemento, así como con las decisiones relacionadas con los recursos de apoyo del mantenimiento, tales como instalaciones, repuestos, herramientas, personal calificado, entre otros (Knezevic, 1996).

5.9 CURVA DE LA BAÑERA O DE DAVIES

Las diferentes acciones que se deciden sobre las tareas que se deben realizar por parte de mantenimiento (y producción), dependen entre otros parámetros de la curva de la bañera o de Davies (Ebeling, 2005), donde se muestra la evolución en el tiempo frente a la tasa de fallas $\lambda(t)$ y el valor del parámetro de forma Beta del equipo que se evalúa. De acuerdo con el valor del equipo para ese momento, se selecciona si las tareas de mantenimiento deben ser correctivas, modificativas, preventivas o predictivas, al tener en cuenta la fase en que se encuentre el elemento o sistema. A partir de la curva de Davies se define el nivel II operacional de mantenimiento (*ver Gráfico 3.13 - Niveles y categorías del mantenimiento bajo enfoque sistémico*).

12 *FMECA*, Análisis de los modos, los efectos, las causas y las criticidades de las fallas.

El comportamiento de la tasa de fallas en la fase I¹³ es decreciente, pues en la medida en que pasa el tiempo, la probabilidad de que ocurra una falla disminuye. Las operaciones que se sugieren en esta fase son las de tipo correctivo y modificativo, en especial las primeras, dado que las fallas que aparecen habitualmente son diferentes. La eliminación de fallas sucesivas recurrentes normalmente se logra mediante la aplicación de la metodología análisis de fallas *FMECA*, ya sea por las correctivas o modificativas.

En la fase I sirven mucho las acciones correctivas dentro de un proceso *FMECA*, y las modificativas, aparte de que son útiles en la fase I, sirven en la fase dos siguiente, donde las causas de fallas son utilizaciones por debajo o por encima de lo nominal. Las acciones modificativas permiten corregir todo defecto de diseño o montaje, calidad de materiales, métodos inadecuados de mantenimiento o cualquier otra falla característica de esta fase I o de la fase II. La acción sistémica de eliminación de causas de fallas se denomina *debugging*¹⁴.

La fase II se tipifica por fallas enmarcadas en origen técnico, ya sea de procedimientos humanos o de equipos. Las acciones que más se adaptan a esta etapa son de las modificativas, ya que al generarse por utilizaciones fuera del estándar (de equipos o de personas), se requiere modificar esos equipos y/o procesos, dentro de nuevos estándares, mediante técnicas modificativas, cuando las fallas son esporádicas o recurrentes; en el caso de ser fallas crónicas se actúa con *FMECA* y acciones modificativas.

La probabilidad de falla en la fase II es constante, indiferente del tiempo que transcurra; por ejemplo, si se tienen dos elementos similares y a uno de ellos se le acaba de hacer un mantenimiento o reparación, mientras al otro desde hace algunos años no se le realizan tareas de mantenimiento, en el instante actual ambos tienen la misma probabilidad de sufrir una falla.

Durante la fase III se observa un incremento paulatino de la tasa de fallas en la medida en que aumenta el tiempo hacia la derecha. En esta sección se presentan varias etapas: en el ciclo I de la fase III, la tasa de fallas empieza a aumentar en forma suave; es decir, su incremento es bajo y crece hacia la derecha en forma leve. Las fallas que aparecen son conocidas y se empieza a tener experiencia y conocimiento sobre ellas, las cuales son debidas a los efectos del tiempo por causas de uso, abuso o desuso. En esta fase ya se pueden empezar a utilizar acciones planeadas preventivas ya que las fallas se conocen y se tiene algún control sobre ellas; es la etapa en que la ingeniería de confiabilidad comienza a ejercer dominio sobre el sistema; es decir, es la zona de ingeniería por excelencia.

En la etapa II de la fase III se incrementa la tasa de fallas en forma constante con pendiente positiva en forma rectilínea. En esta sección se inicia la transición de acciones preventivas hacia acciones predictivas y el comportamiento de las fallas empieza a ser predecible; es la franja donde se logra implementar de una forma sólida las acciones preventivas.

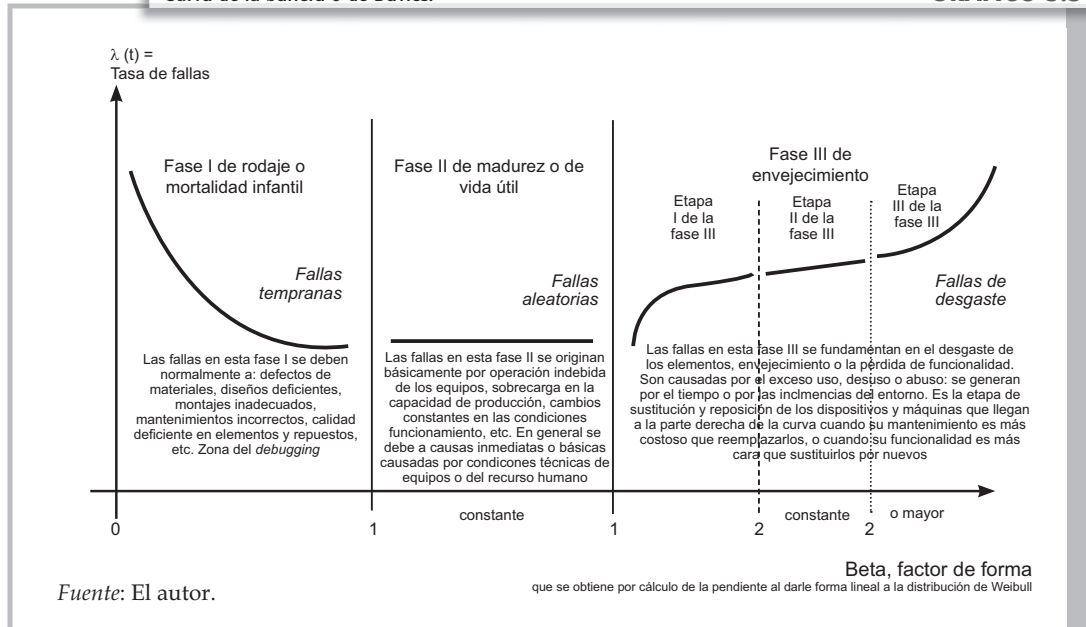
13 En la fase I de rodaje o de mortalidad infantil, normalmente existe un proceso conocido como asentamiento o de acondicionamiento inicial.

14 La anécdota de esta palabra, que significa literalmente “eliminación de insectos” y la cual es usada también en informática, se origina en una falla que ocurre en un computador primitivo y genera que un insecto se electrocute.

Por último, aparece la zona III de la fase III de envejecimiento puro, en que la vida útil del elemento se acelera y la tasa de fallas se incrementa aceleradamente. En esta etapa normalmente se estabiliza el uso de acciones predictivas, pero cuando éstas ya no mejoran la mantenibilidad de la máquina, se usa la reposición o la sustitución como única alternativa. En esta etapa III de la fase III aún se continúa con el uso de técnicas preventivas y eventualmente correctivas y modificativas, pues la mayoría de las fallas son causadas por acción del tiempo, y en consecuencia se usan las acciones predictivas para tipificar el comportamiento futuro de los elementos, con el fin de conocer su verdadera vida útil en tiempo presente.

Curva de la bañera o de Davies.

GRÁFICO 5.5

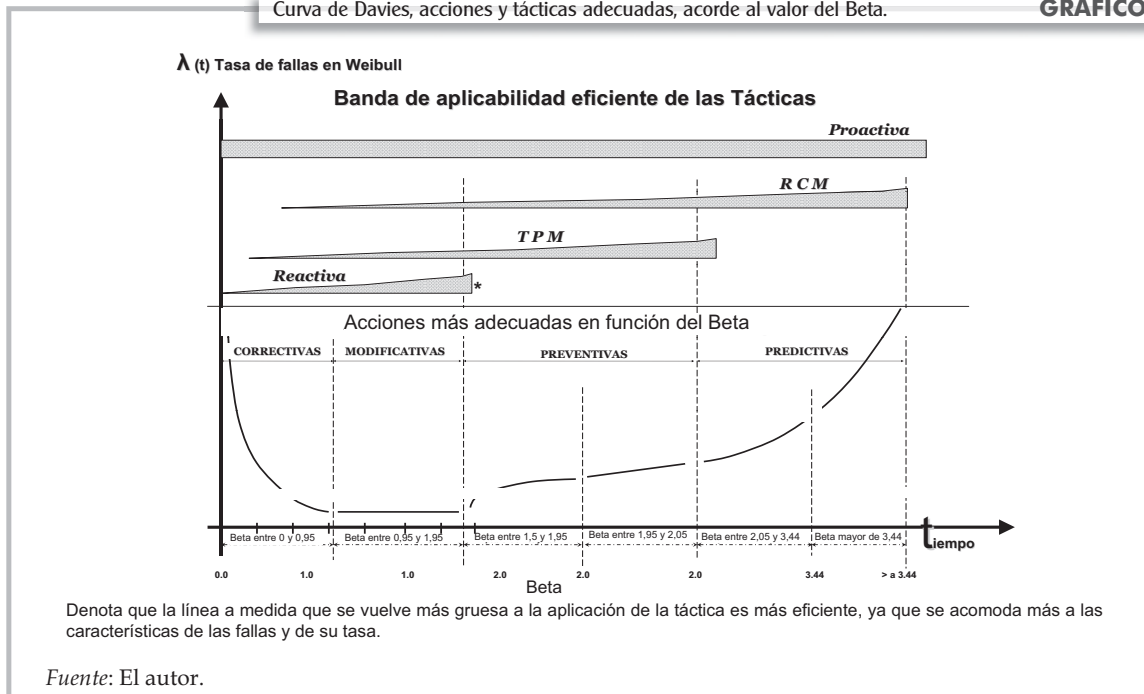


El indicador de confiabilidad Beta es una medida de dispersión del comportamiento de las fallas y es inverso a la duración promedio de ellas.

El indicador de confiabilidad Beta es una medida de dispersión del comportamiento de las fallas y es inverso a la duración promedio de ellas. En la fase I de la curva de Davies aparecen fallas minúsculas e intensas en tiempo, son impredecibles y de comportamiento atípico. En la fase II ya se empieza a tener cierto control sobre las fallas imprevistas y empiezan a estabilizarse en tiempo de duración. Normalmente, en la fase II las fallas intempestivas y desconocidas desaparecen. En la etapa I de la fase III ya las fallas se vuelven muy similares en tiempo y se conocen con antelación. En la zona II de la fase III la duración de las fallas tiende a estabilizarse. Y en la sección III de la fase III ocurren fallas totalmente predecibles y sus tiempos de duración se normalizan totalmente.

Curva de Davies, acciones y tácticas adecuadas, acorde al valor del Beta.

GRÁFICO 5.6



5.10 CURVA DE MANTENIBILIDAD

El tratamiento de la curva de mantenibilidad es similar al de la curva de confiabilidad; esta función se representa por $M(t)$ e indica la probabilidad de que la función del sistema se recupere y el equipo se repare dentro de un tiempo definido t antes de un tiempo especificado total T .

ECUACIÓN 5.3 - Representación matemática de la función de mantenibilidad

$$M(t) = P[T \leq t]$$

Donde:

$M(t)$ es la función de mantenibilidad o de reparación, la cual va aumentando en la medida que se incrementa el tiempo t . Al igual $\lim_{t \rightarrow 0} M(t) = 0$ o enunciado como $M(0) = 0$ denota que siempre la probabilidad de realizar un mantenimiento en un tiempo cero es cero. En la medida en que se amplía el tiempo de realización, la curva de mantenibilidad aumenta para volverse máxima en un tiempo mayor o infinito, lo cual revela que en la medida en que se asigne un tiempo más grande y máximo T para realizar un mantenimiento, la probabilidad exitosa de realizarlo en un tiempo t

crece. T es el tiempo máximo o límite superior total, t es el tiempo determinado para realizar la acción de mantenimiento; la expresión $T \leq t$ denota que siempre el tiempo total T es menor o igual que el tiempo de evaluación t de estudio de la reparación o, dicho de otra manera, la finalización de la reparación se logra siempre en un tiempo T menor a t , t siempre es mayor o igual a 0 y el *Límite* $M(t) = 1$, o expresado como $M(t) = 1$ que denota que cualquier elemento tiene una probabilidad tendiente al 100% de ser bien reparado, así sea en un tiempo infinito (Leemis, 1995).

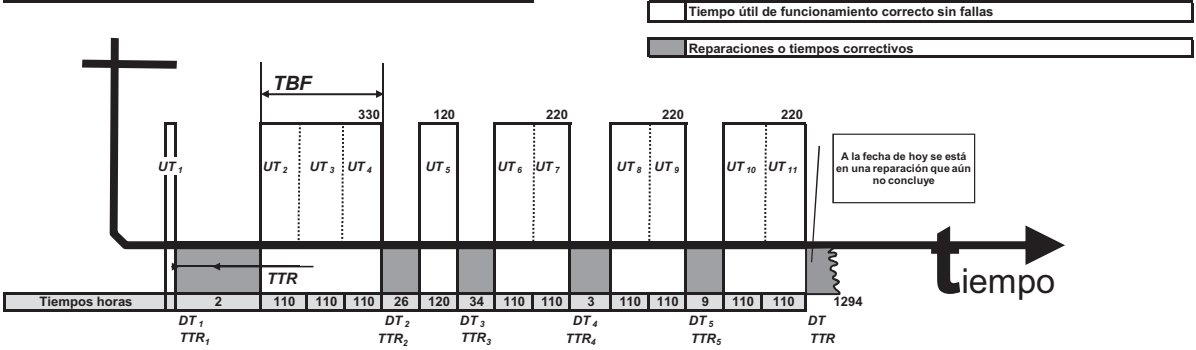
Ejemplo de Curva de mantenibilidad en A_i - Registros históricos y cálculos con Beta y Eta, Weibull

EJEMPLO 5.2

Se toma como base de cálculo del mismo ejemplo de disponibilidad inherente anterior, con los procesos de estimación de parámetros mediante Weibull.

Dato #	Fecha y Hora Inicio de Fallas	Hora Fin de Falla, Inicio de operación normal	TBF	TTR	Día y Hora Inicio UT	Día y Hora Final del UT
			Horas			
1		00 - enero Año inicia a 00:00 horas	110		01 - enero - año inicio a 00:00 horas	04 - enero - año inicio a 14:00 horas
2	04 - enero Año inicio a 14:00 horas	04 - enero Año inicia a 16:00 horas	330	2	04 - enero - año inicio a 16:00 horas	18 - enero - año inicio a 10:00 horas
3	18 - enero año inicio a 10:00 horas	19 - enero Año inicia a 12:00 horas	120	26	19 - enero - año inicio a 12:00 horas	24 - enero - año inicio a 12:00 horas
4	24 - enero año inicio a 12:00 horas	25 - enero Año inicia a 22:00 horas	220	34	25 - enero - año inicio a 22:00 horas	04 - febrero - año inicio a 02:00 horas
5	04 - febrero año inicio a 02:00 horas	04 - febrero Año inicia a 05:00 horas	220	3	04 - febrero - año inicio a 05:00 horas	13 - febrero - año inicio a 09:00 horas
6	13 - febrero año inicio a 09:00 horas	13 - febrero Año inicia a 18:00 horas	220	9	13 - febrero - año inicio a 18:00 horas	22 - febrero - año inicio a 22:00 horas
7	22 - febrero año inicio a 22:00 horas		Ahora			

Recuérdese que para Disponibilidades A_i , A_A , A_O y A_{GO} se asume que $UT \cong TBF$ y $DT \cong TTR$



Con cálculos puntuales, promedio.

MTBF	es el promedio de los TBF individuales:	110, 330, 120, 220, 220, 220	= 203,33 horas	$\Sigma MTBFs / \text{No. Eventos útiles}$
MTTR	es el promedio de los tiempos de reparación correctiva netos individuales :	2, 26, 34, 3, 9	= 14,80 horas	$\Sigma MTTRs / \text{No. Correctivos}$

$$\text{Disponibilidad Inherente} = A_A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{203.33}{203.23 + 14.80} = 93.21 \%$$

Estimación de parámetros con aproximación de Rango de Medianas Benard RRY - Weibull				
1	2	3	4	5
No. Datos	Datos de operación sin fallas Runs Hours = λ en horas	Censurado o No.	Horas de operación sin fallos, organizados con λ ascendente	RM - Rango de Mediana Benard - M(t)
1	2	1	2	0.1296
2	26	1	3	0.3148
3	34	1	9	0.5000
4	3	1	26	0.6852
5	9	1	34	0.8704

Alineación con regresión - Mínimos cuadrados		
6	7	8
Uno sobre (uno menos R.M)	Ln(Ln(1/(1-RM))) - Y de la regresión	Ln de datos -X de la regresión
1.148936	-1.9745	0.6931
1.459459	-0.9727	1.0986
2.000000	-0.3665	2.1972
3.176471	0.1448	3.2581
7.714286	0.7145	3.5264

5 Elementos totales

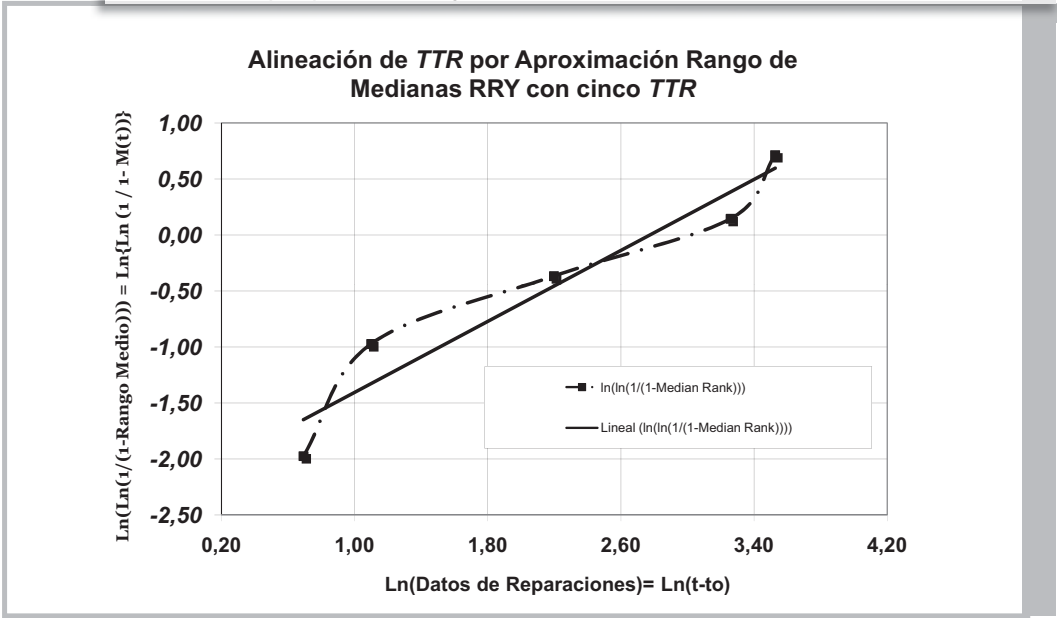
Intercepto	-2,1995	
β - Beta	0,7930	
Alfa o Eta	16,0183	η
r	0	Ro
MTTR Tiempo promedio de reparaciones	18.2649	Horas
MTBF = η* Gamma Γ (1+1/ β)		

Fuente: El autor.

En los resultados se observa que hay una variación significativa entre el MTTR puntual de 14,80 horas, y el estimado por rango de mediana y alineación por regresión de 18,2649 horas.

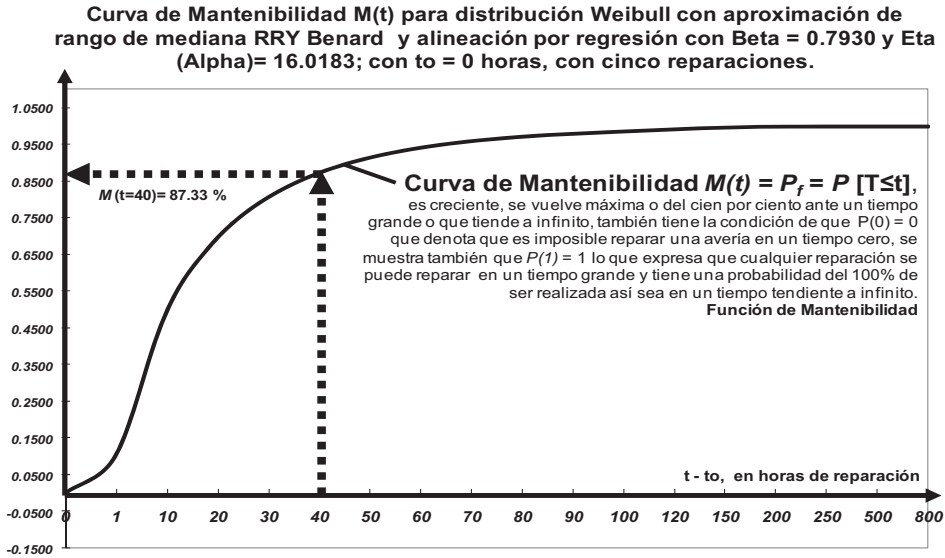
Alineación de TTR por aproximación rango de mediana RRY con cinco TTR

GRÁFICO 5.7



Curva de mantenibilidad $M(t)$ para distribución Weibull con aproximación de rango de mediana RRY Benard y alineación por regresión con $Beta = 0,7930$ y $Eta (Alfa) = 16,0183$; con $t_0 = 0$ horas, con cinco reparaciones

GRÁFICO 5.8



En el gráfico y en el cuadro se lee que existe una probabilidad del 87,33% de que una reparación que se haga en el equipo no dure más de 40 horas. También se puede leer que el 87,33% de las reparaciones deben realizarse en tiempos inferiores a 40 horas. Y por último, para múltiples equipos similares se puede describir que el 87,33% de las veces que se reparan estas máquinas las reparaciones no duran más de 40 horas.

La mantenibilidad se afecta por los tiempos de mantenimiento o las reparaciones, los cuales la influncian a través de los siguientes conceptos (*Cuadro 5.2*):

- En la disponibilidad genérica: TTR , PM , ADT , LDT , LDT y demás factores.
- En la disponibilidad inherente sólo el TTR .

Tiempo y mantenibilidad.

CUADRO 5.2

t	Mantenibilidad M(t) (%)
0	0,00
1	10,49
5	32,78
10	49,75
15	61,30
20	69,65
30	80,69
40	87,00
50	91,51
60	94,21
70	96,01
80	97,21
90	98,04
100	98,61
110	99,00
120	99,28
130	99,48
140	99,62
150	99,72
160	99,80
170	99,85
180	99,89
190	99,92
200	99,94
210	99,95
220	99,97
230	99,97
240	99,98
250	99,99
290	100,00
300	100,00
400	100,00
500	100,00
600	100,00

- En la disponibilidad alcanzada el TTR y el PM .
- En la disponibilidad operacional por TTR , PM , ADT , LDT' y LDT . A pesar de que son similares a la genérica, no dan igual que ella, pues el cálculo se realiza en forma diferente.
- En la disponibilidad operacional por TTR , PM , ADT , LDT' y LDT (el *Ready Time* no afecta la mantenibilidad).

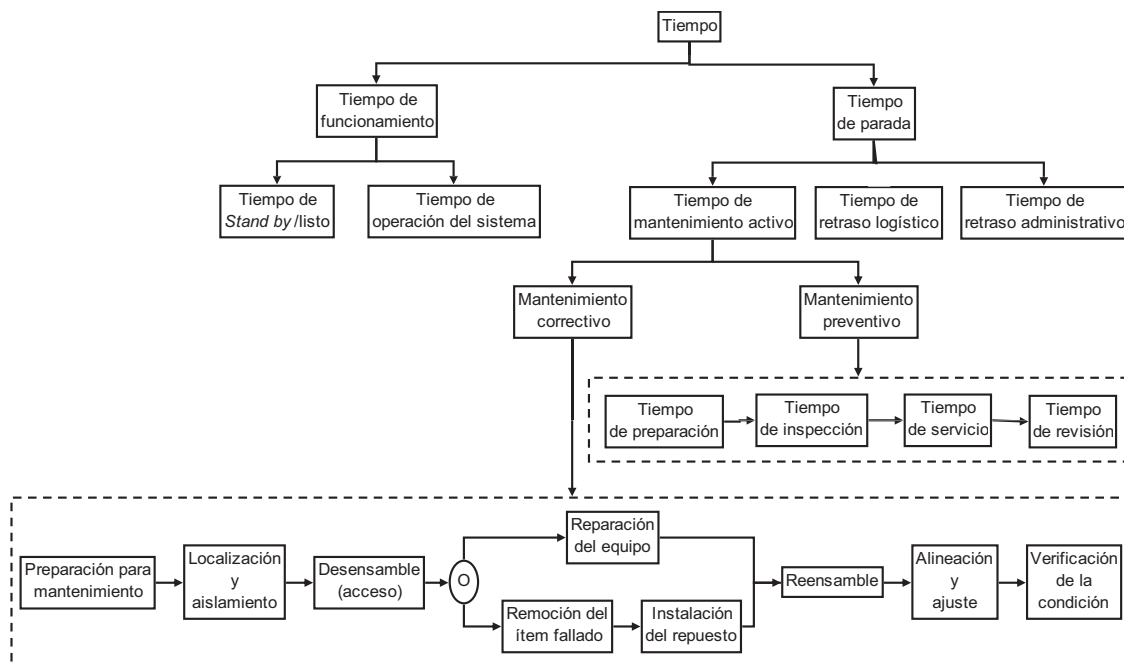
Los cálculos de la mantenibilidad se realizan en forma diferente y dependen de la disponibilidad que se use; los elementos que se deben estimar en cada caso son:

- Para disponibilidad genérica MDT .
- Para disponibilidad inherente $MTTR$.
- Para disponibilidad alcanzada $\bar{M}$, el cual se obtiene del correctivo con $MTTR$ y de lo planeado con M_p .

Para disponibilidad operacional y operacional generalizada $\bar{M}$ y $\bar{M}'$ respectivamente, el cual se obtiene del correctivo con $MTTR$ y de lo planeado con M_p , pero sus valores son diferentes a los de la A_A debido a que se tienen en cuenta los tiempos logísticos de *Down Time*, tanto en el caso de reparaciones como de mantenimientos planeados.

Ciclo general de actividades de reparaciones correctivas y/o mantenimientos planeados.

GRÁFICO 5.9



Fuente: El autor.

5.11 ESTIMACIÓN DE NO CONFIABILIDAD - $F(T)$ Y DE MANTENIBILIDAD - $M(T)$

La estimación de los respectivos parámetros, tanto en no confiabilidad como en mantenibilidad, se realiza inicialmente acorde con el *Gráfico 4.1* - Modelo universal e integral, propuesto para la medición CMD a partir de la función de Weibull, ya que ella tiene la ventaja de simular el comportamiento de la función de no confiabilidad o de mantenibilidad, indiferente de la fase en que se encuentre la tasa de fallas (decreciente, casi constante y creciente, ver *Gráfico 5.5* - Curva de la bañera o de Davies) o de reparaciones del equipo en estudio; en el evento de que la función Weibull cumpla y se ajuste adecuadamente, lo cual se verifica con la prueba de tres bondades de ajuste en el modelo propuesto (Kolgomórov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi cuadrado (χ^2) ,¹⁵ sólo se utiliza una función.

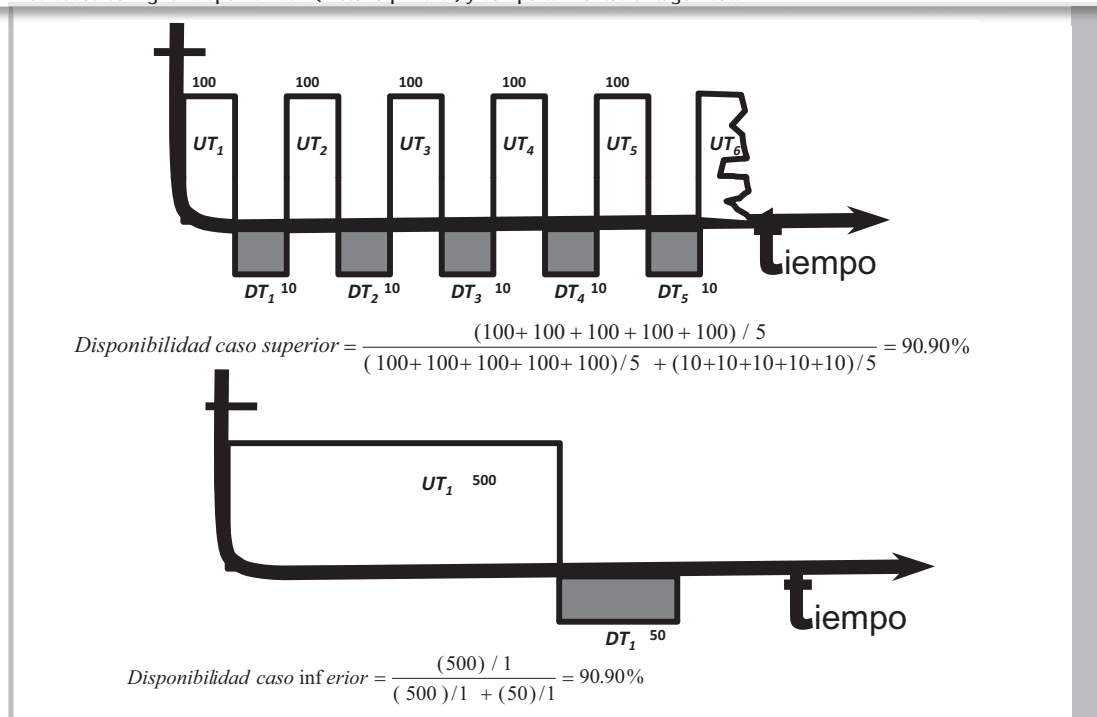
¹⁵ En el modelo propuesto se aceptan como buenas, si se cumplen dos de las bondades de ajuste, cualesquiera que sean.

En el evento de que la función Weibull no se ajuste bien, se utiliza y se selecciona una segunda opción de función¹⁶, la cual depende del valor de Beta que se halla en la primera función (para el caso particular del modelo propuesto se sugiere que si el valor de Beta está entre 0 y 1,95 se utilice Gamma o LogNormal. Si está entre 1,95 y 2,05 sólo Weibull. Si se encuentra por encima de 2,05 se usa Normal). Ya en el caso de que no cumpla con alguna de las opciones anteriores se recomienda revisar los datos actuales o esperar un tiempo prudencial hasta que se tengan un más eventos de fallas, reparaciones, mantenimientos, *LDT*, etc., de tal forma que se ajuste a alguna de las funciones descritas.

El cálculo mediante los modelos de confiabilidad y mantenibilidad al utilizar distribuciones, presenta una gran ventaja frente al modelo puntual (*ver* en párrafos anteriores en cada una de las disponibilidades presentadas). Cuando el cálculo del MTBF o del MTTR se realiza con el método puntual de promedios, se tiene la desventaja de que varias curvas de confiabilidad o de mantenibilidad pueden entregar los mismos valores de MTTF o MTTR, lo cual le resta credibilidad al método puntual. Es decir, se puede obtener el mismo tiempo promedio entre fallas o de reparaciones para casos totalmente diferentes o antagónicos.

Dos casos con igual disponibilidad (método puntual) y comportamientos antagónicos.

GRÁFICO 5.10



16 A la cual se le realizan también las tres pruebas de bondad de ajuste con los tres métodos descritos anteriormente, lo cual asegura la calidad del ajuste encontrado.

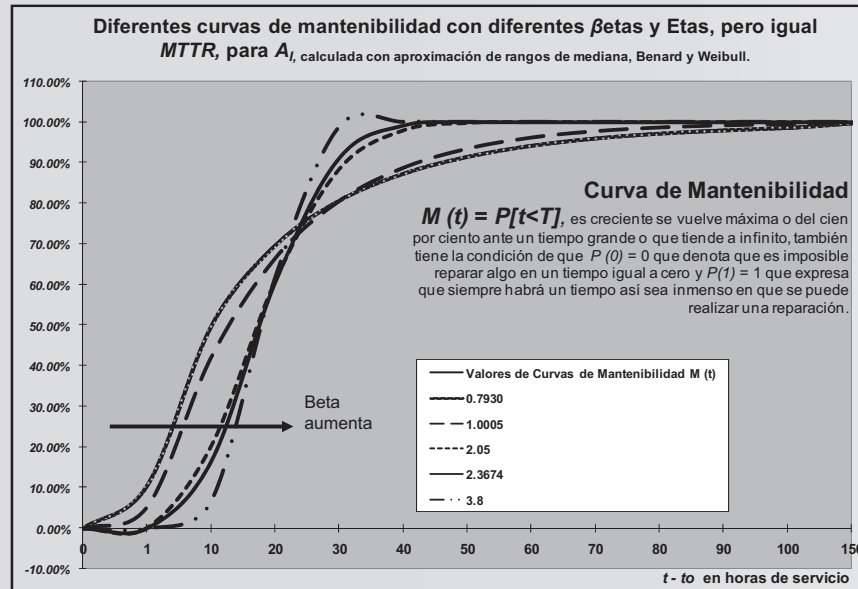
En el gráfico anterior se observa que las dos disponibilidades son iguales, pero indudablemente desde la óptica de ingeniería de fábricas es mejor el caso inferior. De aquí se concluye que el método puntual es incompleto y le falta algo que ayude a diferenciar o complementar casos como el anterior; esto se logra con los parámetros como Beta en el método de distribuciones.

Varias curvas de confiabilidad diferentes para el mismo MTBF

EJEMPLO 5.3

Beta (Parámetro de forma, influenciado por la tendencia)=	β	0.5000	1.0005	2.05	2.3674	3.8
Eta o Alfa (parámetro de escala o vida característica)=	η	103.775	207.595	234.28	234.1833827	229.65
$MTBF = \eta * \text{Gamma } \Gamma (1+ 1/\beta) =$	MTBF	207.55	207.55	207.55	207.55	207.55
	t-to Datos de falla en horas, con $t_0 = 0$	Valores de Curvas de Confiabilidad $R(t)$				
	0	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	1	90.65%	99.52%	100.00%	100.00%	100.00%
	100	37.47%	61.78%	83.98%	87.51%	95.84%
	200	24.95%	38.16%	48.53%	50.24%	55.36%
	300	18.26%	23.57%	19.01%	16.57%	6.33%
	400	14.04%	14.55%	5.01%	2.87%	0.03%
	500	11.14%	8.99%	0.88%	0.24%	0.00%
	600	9.03%	5.55%	0.10%	0.01%	0.00%
	700	7.45%	3.43%	0.01%	0.00%	0.00%
	800	6.23%	2.11%	0.00%	0.00%	0.00%
	900	5.26%	1.31%	0.00%	0.00%	0.00%
	1000	4.49%	0.81%	0.00%	0.00%	0.00%
	2000	1.24%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%
	3000	0.46%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	4000	0.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	5000	0.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	10000	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	20000	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Diferentes curvas de mantenibilidad con diferentes Betas y Etas, pero igual MTTR, para A_I , calculada con aproximación de rangos de mediana, Benard y Weibull



Fuente: El autor.

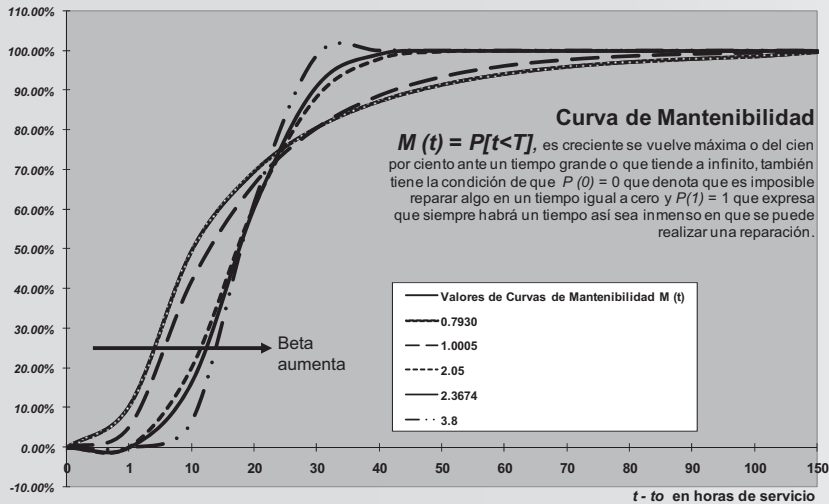
Ahora se hace lo mismo con MTTR, mediante la variación de los Betas y los Etas para obtener un resultado similar al anterior, donde aparecen varias curvas de mantenibilidad diferentes, con diversas formas, en función de los diferentes valores del Beta.

Varias curvas de mantenibilidad diferentes, para el mismo MTTR

EJEMPLO 5.4

Beta (Parámetro de forma, influenciado por la tendencia)=	β	0.7930	1.0005	2.05	2.3674	3.8
Eta o Alfa (parámetro de escala o vida característica)=	η	16.018	18.267	20.610	20.600	20.201
$MTTR = \eta * \text{Gamma } \Gamma(1 + 1/\beta) =$	$MTTR$	18.26	18.26	18.26	18.26	18.26
		t-to Datos de falla en horas, con $t_e = 0$	Valores de Curvas de Mantenibilidad $M(t)$			
		0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
		1	10.49%	5.32%	0.20%	0.08%
		10	49.75%	42.15%	20.31%	16.53%
		20	69.65%	66.54%	60.95%	60.64%
		30	80.69%	80.65%	88.46%	91.24%
		40	87.33%	88.82%	97.96%	99.19%
		50	91.51%	93.53%	99.79%	99.97%
		60	94.21%	96.26%	99.99%	100.00%
		70	96.01%	97.84%	100.00%	100.00%
		80	97.21%	98.75%	100.00%	100.00%
		90	98.04%	99.28%	100.00%	100.00%
		100	98.61%	99.58%	100.00%	100.00%
		150	99.72%	99.97%	100.00%	100.00%
		200	99.94%	100.00%	100.00%	100.00%
		250	99.99%	100.00%	100.00%	100.00%
		300	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
		400	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
		500	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Diferentes curvas de confiabilidad con diferentes Betas y Etas, pero igual $MTTR$, para A_p , calculadas con aproximación de rango de medianas Benard y Weibull



Fuente: El autor.

Con lo cual se descalifica mucho el método puntual. Cuando se requiere desarrollar estrategias y acciones concretas de mantenimiento y producción, definitivamente es mejor utilizar las distribuciones para el análisis de la confiabilidad y la mantenibilidad. Aparte de Weibull existen infinitas distribuciones, de las cuales muchas son útiles y simulan adecuadamente tanto la confiabilidad como la mantenibilidad y, por ende, la disponibilidad para condiciones particulares y específicas; entre las más relevantes están:

Distribuciones para estimación CM.

GRÁFICO 5.11

Distribución	Criterios
Normal	- Describe fenómenos de envejecimiento de equipos (Díaz, 1992). - Describe fenómenos de modelos de fatiga (Ebeling,2005) - Describe fenómenos naturales (Ramakumar, 1996). - Los componentes son afectados desde un comienzo por el desgaste (Rojas, 1975).
Exponencial	- Las reparaciones constituyen un intercambio de piezas estándar. - Fallas aleatorias y que no dependan del tiempo que lleve en funcionamiento. - Describe situaciones de función de tasa de falla constante (Rojas, 1975). - El componente usado que aún no ha fallado, es estadísticamente tan bueno como un componente nuevo. - Modelar componentes electrónicos (Díaz, 1992). Es un caso particular de la Gamma cuando $\beta = 1$.
Weibull	- Es la única función de probabilidad que puede utilizarse para representar cualquier tipo de distribución (Kelly y otro,1998,24). - Representar la vida de los componentes. - Vida de servicio de tubos y equipos electrónicos (Rojas, 1975).
Gamma	- Conveniente para caracterizar los tiempos de fallas de equipos durante periodos de rodaje (Rojas,197592). - Adecuada para representar sistemas con componentes <i>stand-by</i> (Díaz, 1992).
Log normal	- Describe bien cuando la mayor parte de las intervenciones son de corta duración (Díaz,1992). - Aplicada para equipos electrónicos y electromecánicos (Blanchard,1994). - Se aproxima a la distribución exponencial, y siendo ésta mucho más sencilla de manejar, es esta última la que más se utiliza.
Binomial	- Se aplica en eventos mutuamente excluyentes, falla o no falla (Lewis, 1995).
Poisson	- Frecuentemente usada en gestión de inventarios. - Se usa también en lugar de la distribución binomial cuando se manejan probabilidades de fallas bajas (Díaz,1992).
Beta	- Usada principalmente en procesos acotados en dos extremos (Díaz, 1992).
Erlang	- Es un caso especial de la distribución gamma, K entero (Díaz, 1992).
Rayleigh	- Es un caso especial de la distribución Weibull, $\beta=2$ (Ebeling, 2005).
Chi cuadrada	- Es un caso especial de la distribución gamma, $\lambda=0.5$, y $\nu = 2\alpha$ (Leemis, 1995).
Valores Extremos	- Es usada en modelos que limitan los valores máximos y mínimos (Díaz, 1992).

Fuente: El autor.

Una vez se elige el cálculo de la disponibilidad que se va a utilizar se procede a la estimación de los parámetros mediante una o dos distribuciones en función de la necesidad específica; la calidad de la selección depende de la prueba bondad de ajuste¹⁷ (*Goodness of Fit - Test*, diferencia entre la realidad y los valores obtenidos de la distribución asumida para los diferentes tiempos *t*), la cual califica el grado de acierto en la simulación lograda con la selección que se adopta.

17 Entre las más utilizadas figuran Anderson-Darling, Kolmogórov-Smirnov y Chi cuadrado.



Una vez se elige el cálculo de la disponibilidad que se va a utilizar se procede a la estimación de los parámetros mediante una o dos distribuciones en función de la necesidad específica.

Los métodos para realizar la estimación de los parámetros de una distribución son simples o complejos; entre los simples destaca el de mínimos cuadrados, en tanto que uno más complejo es el método de máxima verosimilitud *MLE*.

Es importante volver a resaltar la importancia de tener una gran cantidad de datos de fallas, tiempos útiles, reparaciones, etc., siquiera al menos en una cifra total de *MTBF* en tiempo mayor a 10 veces el *MTTR*, indudablemente cuanto mayor sea la cantidad de datos¹⁸, la estimación del parámetro es más cercana al valor real (Lewis, 1995).

Los métodos para realizar la estimación de los parámetros de una distribución pueden ser simples o complejos; entre los simples destacan el gráfico y el de mínimos cuadrados -regresión o alineación (*i*-kaésimo, rango de medianas por tabla o por aproximación de Benard, y el de Kaplan-Meier), en tanto que uno más complejo es el método de máxima verosimilitud *MLE* (Reliasoft®, 2008). Todos ellos, con excepción de *MLE*, requieren el cálculo previo de la alineación y de la estimación de la no confiabilidad y de la mantenibilidad.

5.12 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN Y CÁLCULO DE LA NO CONFIABILIDAD Y DE LA MANTENIBILIDAD

Para estimar ambos parámetros es necesario obtener los porcentajes acumulados para cada tiempo de falla $F(t)$ y para cada ítem de reparación $M(t)$; entre los métodos existentes que enuncia el modelo propuesto para el cálculo de la no confiabilidad y de la mantenibilidad, son: *i*-kaésimo, el rango de mediana (por tabla y el de Benard por aproximación) y el estimador de Kaplan-Meier.

Método *i*-kaésimo o estimador no sesgado

Para valorar la función de no confiabilidad se utiliza el estimador:

► ECUACIÓN 5.4 - Método de estimación *i*-kaésimo para A_i

$$F(t_i) = 1 - R(t_i) = \frac{j}{N+1}$$

Donde:

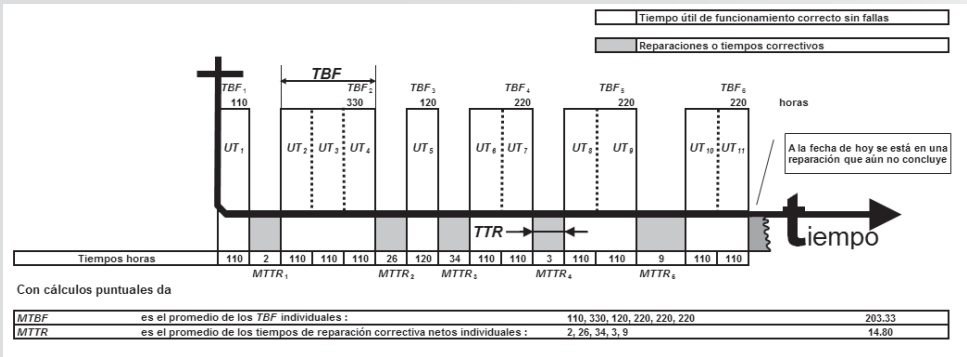
N es el número total de datos, j es el número consecutivo del dato que se evalúa; cuando la muestra es muy grande o tiende a infinito se puede usar $F(t) = \frac{j}{N}$ (Rojas, 1975).

Para el caso particular del ejemplo de disponibilidad inherente que se trae, se tiene:

¹⁸ Mayor de treinta y un elementos.

Método de estimación *i*-kaésimo para A_i

EJEMPLO 5.5



Método *i*-kaésimo

No Confiabilidad				
No. Dato <i>j</i>	Datos de operación sin fallas en horas	$F(t) = j / (N + 1)$	F(t) con aproximación Rango Medianas Benard	$R(t) = 1 - F(t)$ de <i>i</i> - kaésimo
1	110	14.29%	10.91%	85.71%
2	330	28.57%	26.46%	71.43%
3	120	42.86%	42.14%	57.14%
4	220	57.14%	57.86%	42.86%
5	220	71.43%	73.56%	28.57%
6	220	85.71%	89.09%	14.29%
Ordenar de menor a mayor				
Media		50.00%	50.00%	

Mantenibilidad		
No. Dato <i>j</i>	Datos de reparaciones en horas	$M(t) = j / (N + 1)$ de <i>i</i> - kaésimo
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
Ordenar de menor a mayor		
Media		50.00%

Fuente: El autor.

De esta forma se obtienen las curvas de no confiabilidad, confiabilidad y mantenibilidad por el método *i*-kaésimo de aproximación para conocer los valores porcentuales acumulados de $F(t)$, $R(t)$ y $M(t)$, respectivamente.

Método de rango de medianas - Tabla

Se usa para obtener una estimación de la no confiabilidad para cada falla o en mantenibilidad para cada reparación. Este valor es el que la probabilidad real de falla debe tener para la *enésima* falla o en una reparación para la *enésima* tarea correctiva, para una muestra de *N* datos con un nivel de confianza del 50%. Ello significa esencialmente que este estimativo es el mejor para la no confiabilidad, en una población de datos.

Tabla de valores de $F(t)$ y de $M(t)$ para rango de medianas – Tabla

CUADRO 5.3

$\begin{matrix} j \\ \backslash \\ i \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	$\begin{matrix} N \\ \backslash \\ i \end{matrix}$
1	0.5000	0.2929	0.2063	0.1591	0.1295	0.1091	0.0943	0.0830	0.0744	0.0670	0.0611	0.0561	0.0519	0.0483	0.0452	0.0424	0.0400	0.0378	0.0358	0.0341	0.0325	0.0310	0.0297	0.0285	0.0274	1
2		0.7071	0.5000	0.3857	0.3138	0.2645	0.2285	0.2011	0.1796	0.1623	0.1480	0.1360	0.1258	0.1170	0.1094	0.1027	0.0968	0.0915	0.0868	0.0825	0.0786	0.0751	0.0719	0.0690	0.0662	2
3			0.7937	0.6143	0.5000	0.4214	0.3641	0.3205	0.2862	0.2586	0.2358	0.2167	0.2005	0.1865	0.1743	0.1637	0.1542	0.1458	0.1383	0.1315	0.1253	0.1197	0.1146	0.1099	0.1055	3
4				0.8409	0.6862	0.5786	0.5000	0.4402	0.3931	0.3551	0.3238	0.2976	0.2753	0.2561	0.2394	0.2247	0.2118	0.2002	0.1899	0.1806	0.1721	0.1644	0.1573	0.1509	0.1449	4
5					0.8706	0.7356	0.6359	0.5598	0.5000	0.4517	0.4119	0.3785	0.3502	0.3258	0.3045	0.2859	0.2694	0.2547	0.2415	0.2297	0.2189	0.2091	0.2002	0.1919	0.1844	5
6						0.8909	0.7715	0.6795	0.6069	0.5483	0.5000	0.4595	0.4251	0.3954	0.3697	0.3471	0.3270	0.3092	0.2932	0.2788	0.2657	0.2538	0.2430	0.2330	0.2238	6
7							0.9057	0.7989	0.7138	0.6449	0.5881	0.5405	0.5000	0.4652	0.4348	0.4082	0.3847	0.3637	0.3449	0.3280	0.3126	0.2986	0.2858	0.2741	0.2632	7
8								0.9170	0.8204	0.7414	0.6762	0.6215	0.5749	0.5348	0.5000	0.4684	0.4423	0.4182	0.3966	0.3771	0.3594	0.3433	0.3286	0.3151	0.3027	8
9									0.9259	0.8377	0.7642	0.7024	0.6488	0.6046	0.5652	0.5306	0.5000	0.4727	0.4483	0.4263	0.4063	0.3881	0.3715	0.3562	0.3422	9
10										0.9330	0.8520	0.7833	0.7247	0.6743	0.6303	0.5918	0.5577	0.5273	0.5000	0.4754	0.4531	0.4329	0.4143	0.3973	0.3816	10
11											0.9389	0.8640	0.7996	0.7439	0.6955	0.6530	0.6153	0.5818	0.5517	0.5246	0.5000	0.4776	0.4572	0.4384	0.4211	11
12												0.9439	0.8742	0.8135	0.7606	0.7141	0.6730	0.6363	0.6034	0.5737	0.5469	0.5224	0.5000	0.4795	0.4605	12
13													0.9481	0.8830	0.8257	0.7753	0.7306	0.6908	0.6551	0.6229	0.5937	0.5671	0.5428	0.5205	0.5000	13
14														0.9517	0.8906	0.8364	0.7882	0.7453	0.7068	0.6721	0.6406	0.6119	0.5857	0.5616	0.5395	14
15															0.9548	0.8973	0.8458	0.7998	0.7585	0.7212	0.6874	0.6567	0.6285	0.6027	0.5789	15
16																0.9576	0.9032	0.8542	0.8101	0.7703	0.7343	0.7014	0.6714	0.6438	0.6184	16
17																	0.9601	0.9085	0.8617	0.8195	0.7811	0.7462	0.7142	0.6849	0.6579	17
18																		0.9622	0.9132	0.8685	0.8279	0.7909	0.7570	0.7259	0.6973	18
19																			0.9642	0.9175	0.8747	0.8356	0.7999	0.7670	0.7388	19
20																				0.9659	0.9214	0.8803	0.8427	0.8081	0.7762	20
21																					0.9675	0.9249	0.8854	0.8491	0.8157	21
22																						0.9690	0.9281	0.8901	0.8551	22
23																							0.9703	0.9311	0.8945	23
24																								0.9715	0.9338	24
25																									0.9727	25
$\begin{matrix} j \\ \backslash \\ i \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	$\begin{matrix} N \\ \backslash \\ i \end{matrix}$

(Continuación)

CUADRO 5.3

$\begin{matrix} j \\ \backslash \\ i \end{matrix}$	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	$\begin{matrix} N \\ \backslash \\ j \end{matrix}$
1	0.0263	0.0254	0.0245	0.0236	0.0228	0.0221	0.0214	0.0208	0.0202	0.0196	0.0191	0.0186	0.0181	0.0176	0.0172	0.0168	0.0164	0.0160	0.0156	0.0153	0.0150	0.0146	0.0143	0.0141	0.0138	1
2	0.0637	0.0614	0.0592	0.0572	0.0553	0.0536	0.0519	0.0503	0.0489	0.0475	0.0462	0.0450	0.0438	0.0427	0.0416	0.0406	0.0396	0.0387	0.0379	0.0370	0.0362	0.0355	0.0347	0.0340	0.0333	2
3	0.1015	0.0978	0.0944	0.0912	0.0881	0.0853	0.0827	0.0802	0.0779	0.0757	0.0736	0.0716	0.0698	0.0680	0.0663	0.0647	0.0632	0.0617	0.0603	0.0590	0.0577	0.0565	0.0553	0.0542	0.0531	3
4	0.1394	0.1343	0.1296	0.1252	0.1210	0.1172	0.1135	0.1101	0.1069	0.1039	0.1011	0.0984	0.0958	0.0934	0.0910	0.0888	0.0867	0.0847	0.0828	0.0810	0.0793	0.0776	0.0760	0.0744	0.0730	4
5	0.1774	0.1709	0.1648	0.1592	0.1540	0.1491	0.1445	0.1401	0.1360	0.1322	0.1286	0.1251	0.1218	0.1187	0.1158	0.1130	0.1103	0.1078	0.1054	0.1030	0.1008	0.0987	0.0966	0.0947	0.0928	5
6	0.2153	0.2074	0.2001	0.1933	0.1869	0.1809	0.1754	0.1701	0.1651	0.1605	0.1561	0.1519	0.1479	0.1442	0.1406	0.1372	0.1339	0.1308	0.1279	0.1251	0.1224	0.1198	0.1173	0.1149	0.1127	6
7	0.2533	0.2440	0.2354	0.2274	0.2199	0.2128	0.2063	0.2001	0.1943	0.1888	0.1836	0.1786	0.1740	0.1696	0.1654	0.1614	0.1575	0.1539	0.1504	0.1471	0.1439	0.1409	0.1380	0.1352	0.1325	7
8	0.2912	0.2806	0.2707	0.2614	0.2528	0.2447	0.2372	0.2301	0.2234	0.2170	0.2111	0.2054	0.2001	0.1950	0.1901	0.1855	0.1812	0.1770	0.1730	0.1692	0.1655	0.1620	0.1587	0.1555	0.1524	8
9	0.3292	0.3171	0.3059	0.2955	0.2858	0.2767	0.2681	0.2601	0.2525	0.2453	0.2386	0.2322	0.2261	0.2204	0.2149	0.2097	0.2048	0.2000	0.1955	0.1912	0.1871	0.1831	0.1794	0.1757	0.1722	9
10	0.3671	0.3537	0.3412	0.3296	0.3187	0.3086	0.2990	0.2900	0.2816	0.2736	0.2661	0.2590	0.2522	0.2458	0.2397	0.2339	0.2284	0.2231	0.2181	0.2133	0.2087	0.2043	0.2000	0.1960	0.1921	10
11	0.4051	0.3903	0.3765	0.3637	0.3517	0.3405	0.3299	0.3200	0.3107	0.3019	0.2936	0.2858	0.2783	0.2712	0.2645	0.2581	0.2520	0.2462	0.2406	0.2353	0.2303	0.2254	0.2207	0.2163	0.2120	11
12	0.4431	0.4269	0.4118	0.3978	0.3846	0.3724	0.3609	0.3500	0.3398	0.3302	0.3211	0.3125	0.3044	0.2966	0.2893	0.2823	0.2756	0.2693	0.2632	0.2574	0.2518	0.2465	0.2414	0.2365	0.2318	12
13	0.4810	0.4634	0.4471	0.4318	0.4176	0.4043	0.3918	0.3800	0.3690	0.3585	0.3487	0.3393	0.3305	0.3221	0.3141	0.3065	0.2992	0.2923	0.2857	0.2794	0.2734	0.2676	0.2621	0.2568	0.2517	13
14	0.5190	0.5000	0.4824	0.4659	0.4506	0.4362	0.4227	0.4100	0.3981	0.3868	0.3762	0.3661	0.3565	0.3475	0.3389	0.3307	0.3229	0.3154	0.3083	0.3015	0.2950	0.2888	0.2828	0.2771	0.2715	14
15	0.5570	0.5366	0.5176	0.5000	0.4835	0.4681	0.4536	0.4400	0.4272	0.4151	0.4037	0.3929	0.3826	0.3729	0.3637	0.3549	0.3465	0.3385	0.3308	0.3236	0.3166	0.3099	0.3035	0.2973	0.2914	15
16	0.5949	0.5732	0.5529	0.5341	0.5165	0.5000	0.4845	0.4700	0.4563	0.4434	0.4312	0.4197	0.4087	0.3983	0.3884	0.3791	0.3701	0.3616	0.3534	0.3456	0.3381	0.3310	0.3242	0.3176	0.3113	16
17	0.6329	0.6097	0.5882	0.5682	0.5494	0.5319	0.5155	0.5000	0.4854	0.4717	0.4587	0.4464	0.4348	0.4237	0.4132	0.4032	0.3937	0.3846	0.3760	0.3677	0.3597	0.3521	0.3448	0.3379	0.3311	17
18	0.6708	0.6463	0.6235	0.6023	0.5824	0.5638	0.5464	0.5300	0.5146	0.5000	0.4862	0.4732	0.4609	0.4492	0.4380	0.4274	0.4173	0.4077	0.3985	0.3897	0.3813	0.3733	0.3655	0.3581	0.3510	18
19	0.7088	0.6829	0.6588	0.6363	0.6154	0.5957	0.5773	0.5600	0.5437	0.5283	0.5138	0.5000	0.4870	0.4746	0.4628	0.4516	0.4410	0.4308	0.4211	0.4118	0.4029	0.3944	0.3862	0.3784	0.3709	19
20	0.7468	0.7195	0.6941	0.6704	0.6483	0.6276	0.6082	0.5900	0.5728	0.5566	0.5413	0.5268	0.5130	0.5000	0.4876	0.4758	0.4646	0.4539	0.4436	0.4338	0.4245	0.4155	0.4069	0.3987	0.3907	20
21	0.7847	0.7560	0.7294	0.7045	0.6813	0.6595	0.6392	0.6200	0.6019	0.5849	0.5688	0.5536	0.5391	0.5254	0.5124	0.5000	0.4882	0.4769	0.4662	0.4559	0.4461	0.4366	0.4276	0.4189	0.4106	21
22	0.8227	0.7926	0.7646	0.7386	0.7142	0.6915	0.6701	0.6500	0.6311	0.6132	0.5963	0.5804	0.5652	0.5508	0.5372	0.5242	0.5118	0.5000	0.4887	0.4779	0.4676	0.4578	0.4483	0.4392	0.4305	22
23	0.8606	0.8291	0.7999	0.7721	0.7472	0.7234	0.7010	0.6800	0.6602	0.6415	0.6238	0.6071	0.5913	0.5763	0.5620	0.5484	0.5354	0.5231	0.5113	0.5000	0.4892	0.4789	0.4690	0.4595	0.4505	23
24	0.8985	0.8657	0.8332	0.8067	0.7801	0.7553	0.7319	0.7100	0.6893	0.6698	0.6514	0.6339	0.6174	0.6017	0.5868	0.5726	0.5591	0.5462	0.5338	0.5221	0.5108	0.5000	0.4897	0.4797	0.4702	24
25	0.9363	0.9022	0.8704	0.8408	0.8131	0.7872	0.7628	0.7400	0.7184	0.6981	0.6789	0.6607	0.6435	0.6271	0.6116	0.5968	0.5827	0.5692	0.5564	0.5441	0.5324	0.5211	0.5103	0.5000	0.4901	25

(Continuación)

CUADRO 5.3

$\begin{matrix} j \\ \diagdown \\ N \end{matrix}$	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	$\begin{matrix} N \\ \diagup \\ j \end{matrix}$
26	0.9737	0.9386	0.9056	0.8748	0.8460	0.8191	0.7937	0.7699	0.7475	0.7264	0.7064	0.6875	0.6695	0.6525	0.6364	0.6210	0.6063	0.5923	0.5789	0.5662	0.5540	0.5423	0.5310	0.5203	0.5099	26
27		0.9747	0.9408	0.9089	0.8790	0.8510	0.8247	0.7999	0.7766	0.7547	0.7339	0.7143	0.6956	0.6779	0.6611	0.6451	0.6299	0.6154	0.6015	0.5882	0.5755	0.5634	0.5517	0.5405	0.5298	27
28			0.9756	0.9428	0.9119	0.8828	0.8556	0.8299	0.8058	0.7830	0.7614	0.7410	0.7217	0.7034	0.6859	0.6693	0.6535	0.6385	0.6241	0.6103	0.5971	0.5845	0.5724	0.5608	0.5497	28
29				0.9764	0.9447	0.9147	0.8865	0.8599	0.8349	0.8113	0.7889	0.7678	0.7478	0.7288	0.7107	0.6935	0.6772	0.6615	0.6466	0.6323	0.6187	0.6056	0.5931	0.5811	0.5695	29
30					0.9772	0.9465	0.9173	0.8899	0.8640	0.8395	0.8165	0.7946	0.7739	0.7542	0.7355	0.7177	0.7008	0.6846	0.6692	0.6544	0.6403	0.6268	0.6138	0.6013	0.5894	30
31						0.9779	0.9481	0.9198	0.8931	0.8678	0.8440	0.8214	0.8000	0.7796	0.7603	0.7419	0.7244	0.7077	0.6917	0.6765	0.6619	0.6479	0.6345	0.6216	0.6093	31
32							0.9786	0.9497	0.9221	0.8961	0.8715	0.8481	0.8260	0.8050	0.7851	0.7661	0.7480	0.7307	0.7143	0.6985	0.6834	0.6690	0.6552	0.6419	0.6291	32
33								0.9792	0.9511	0.9243	0.8989	0.8749	0.8521	0.8304	0.8099	0.7903	0.7716	0.7538	0.7368	0.7206	0.7050	0.6901	0.6759	0.6622	0.6490	33
34									0.9798	0.9525	0.9264	0.9017	0.8782	0.8559	0.8347	0.8145	0.7952	0.7769	0.7594	0.7426	0.7266	0.7113	0.6965	0.6824	0.6689	34
35										0.9804	0.9538	0.9284	0.9042	0.8813	0.8594	0.8387	0.8189	0.8000	0.7819	0.7647	0.7482	0.7324	0.7172	0.7027	0.6887	35
36											0.9809	0.9551	0.9303	0.9067	0.8842	0.8628	0.8425	0.8230	0.8045	0.7867	0.7698	0.7535	0.7379	0.7230	0.7086	36
37												0.9814	0.9562	0.9320	0.9090	0.8870	0.8661	0.8461	0.8270	0.8088	0.7913	0.7746	0.7586	0.7432	0.7285	37
38													0.9819	0.9573	0.9337	0.9112	0.8897	0.8692	0.8496	0.8308	0.8129	0.7957	0.7793	0.7635	0.7483	38
39														0.9824	0.9584	0.9353	0.9133	0.8922	0.8721	0.8529	0.8345	0.8169	0.8000	0.7838	0.7682	39
40															0.9828	0.9594	0.9368	0.9153	0.8947	0.8749	0.8561	0.8380	0.8207	0.8040	0.7881	40
41																0.9832	0.9604	0.9383	0.9172	0.8970	0.8776	0.8591	0.8413	0.8243	0.8079	41
42																	0.9836	0.9613	0.9397	0.9190	0.8992	0.8802	0.8620	0.8446	0.8278	42
43																		0.9840	0.9622	0.9410	0.9208	0.9013	0.8827	0.8648	0.8476	43
44																			0.9844	0.9630	0.9423	0.9224	0.9034	0.8851	0.8675	44
45																				0.9847	0.9638	0.9435	0.9240	0.9053	0.8874	45
46																					0.9850	0.9646	0.9447	0.9256	0.9072	46
47																						0.9854	0.9653	0.9458	0.9271	47
48																							0.9857	0.9660	0.9469	48
49																								0.9860	0.9667	49
50																									0.9862	50

Recuérdese que cuanto más alto sea el valor de $F(t)$ o de $M(t)$, más crítico es y, por lo tanto, más atractivo para el analista o el planeador de mantenimiento.

El rango se puede encontrar para cualquier punto de porcentaje P , mayor que cero y menor que uno, al resolver la distribución binomial acumulada para Z , cuyo resultado representa el rango, o estimado de la no confiabilidad, para la n -ésima falla, o del estimado de la mantenibilidad para la n -ésima reparación.

► ECUACIÓN 5.5 - Ecuación de la distribución binomial acumulada, para la estimación por rango de medianas puro por tabla

$$P = \sum_{j=1}^N \binom{N}{j} Z^j (1-Z)^{N-j}$$

$$0.5 = \sum_{j=1}^N \binom{N}{j} Z^j (1-Z)^{N-j}$$

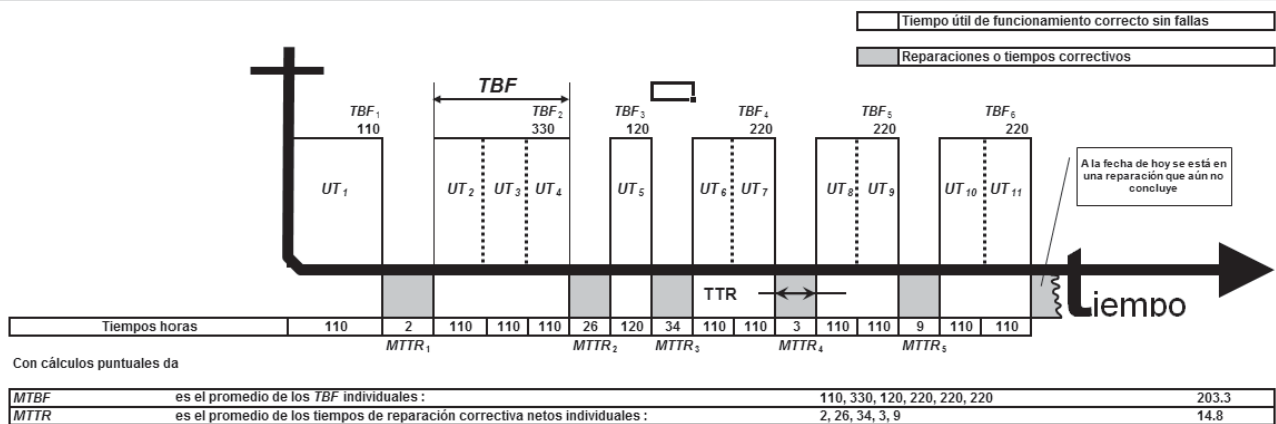
Donde:

N es el número de datos de la muestra, j posición de la falla en orden ascendente (Reliasoft®, 2008).

Método de estimación de rango de medianas. Tabla para A_1

EJEMPLO 5.6

Los cálculos con la tabla de rango de medianas se estiman en el mismo ejemplo que se desarrolla, mediante la lectura cruzada de los valores porcentuales en forma horizontal con el número total de datos N y con el evento j en forma vertical.



Método Rango de Medianas Tabla

No Confiabilidad

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas TBF	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	$F(t)$ con Rango Mediana Tabla	$R(t) = 1 - F(t)$ con Rango Mediana Tabla
1	110	110	10.91%	89.09%
2	330	120	26.45%	73.56%
3	120	220	42.14%	57.86%
4	220	220	57.86%	42.14%
5	220	220	73.56%	26.45%
6	220	330	89.09%	10.91%
		Ordenar de menor a mayor		
		Media	50.00%	50.00%

Fuente: El autor.

Mantenibilidad

No. Dato	Datos de reparaciones - μ - en horas TTR	O r g a n i z a d o s μ	$M(t)$ con Aproximación de Rango de Medianas Benard	$M(t) =$ Método Tabla Rango de Mediana
1	2	2	12.96%	12.95%
2	26	3	31.48%	31.38%
3	34	9	50.00%	50.00%
4	3	26	68.52%	68.62%
5	9	34	87.04%	87.06%
		Ordenar de menor a mayor		
		Media	50.00%	50.00%

Método de Benard de aproximación de rango de medianas

El rango de mediana también puede ser estimado de una manera más sencilla, pero un poco menos precisa mediante la aproximación de Benard (ReliaSoft®, 2000).

► ECUACIÓN 5.6 - Aproximación de Benard para el rango de mediana

$$R - M = \frac{j - 0,3}{N + 0,4} =$$

Donde:

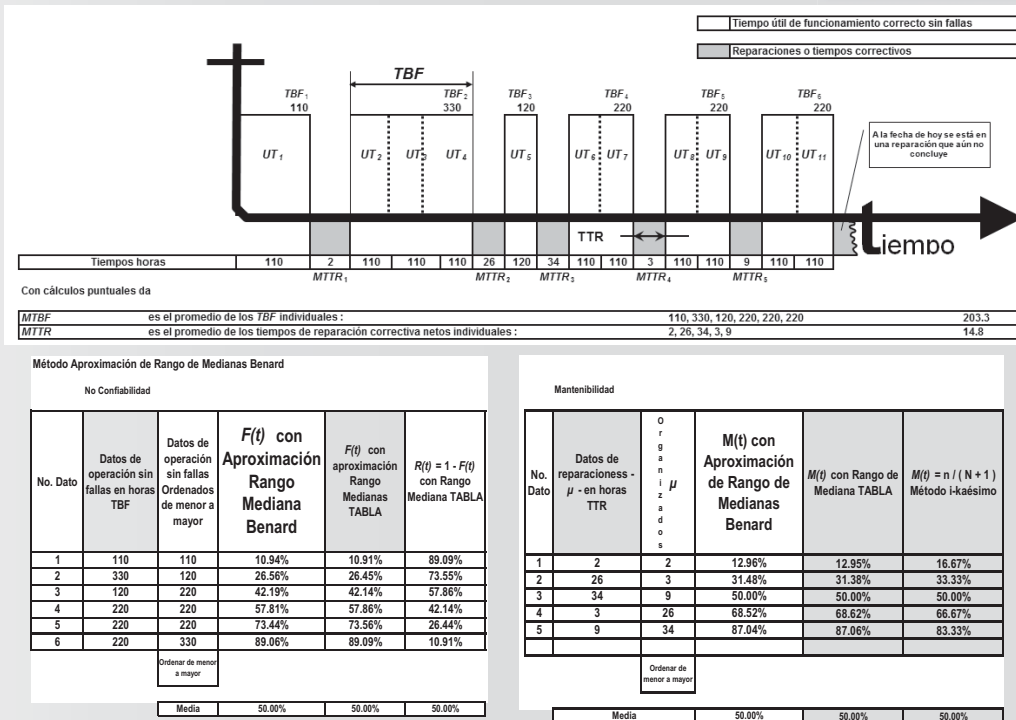
$R-M$: es el estimador de no confiabilidad o mantenibilidad de rango de mediana;

j : posición del dato ordenado de menor a mayor.

N : número total de datos.

Método de estimación de no confiabilidad o mantenibilidad por aproximación de rango de medianas Benard para A_1 .

EJEMPLO 5.7



Fuente: El autor.

Método de Kaplan-Meier o K-M

Es un método alternativo al estimador de rango de mediana, para calcular el valor de la no confiabilidad que también utiliza el número de datos de la muestra (Vallejo, y otros, 2004).

ECUACIÓN 5.7 - Método de estimación de Kaplan-Meier para A_1

$$K - M = 1 - \prod_{j=1}^N \frac{N - j}{N - j + 1}$$

Donde:

K-M: estimado de no confiabilidad o mantenibilidad de Kaplan-Meier;

j: posición del dato ordenada de menor a mayor;

N: número total de datos (Reliasoft®, 2008).

El estimador de Kaplan-Meier tiene la desventaja de dar en el último valor una no confiabilidad o mantenibilidad de cero, por lo cual su fórmula se ha modificado para que pueda usarse en los modelos de estimación gráfica y de mínimos cuadrados (NS®, 2005).

ECUACIÓN 5.8 - Método de estimación Kaplan-Meier modificado para A_i

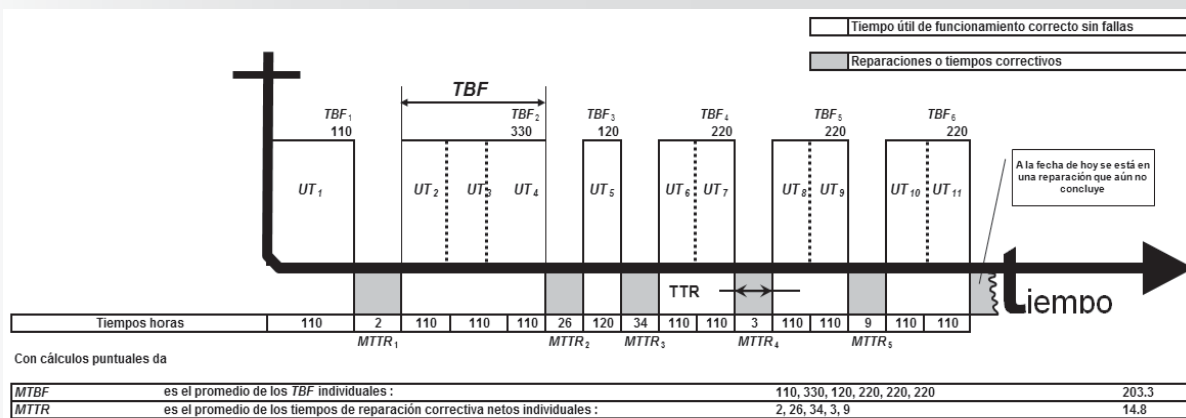
$$K - M M = 1 - \frac{N + 0.7}{N + 0.4} \prod_{j=1}^N \frac{N - j + 0.7}{N - j + 1.7}$$

Donde:

$K-M M$ es el estimado de no confiabilidad o mantenibilidad de Kaplan-Meier Modificado; j : posición del dato ordenado de menor a mayor y N : número total de datos (NS@, 2005).

EJEMPLO 5.8

Método de estimación de no confiabilidad o mantenibilidad de Kaplan-Meier Modificado para A_i .



Método Kaplan-Meier Modificado

$$K - M M = 1 - \frac{N + 0.7}{N + 0.4} \prod_{j=1}^N \frac{N - j + 0.7}{N - j + 1.7}$$

No Confiabilidad

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas TBF	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	$F(t)$ con Kaplan-Meier Modificado K-M	$F(t)$ con aproximación Rango Mediana Benard	$R(t) = 1 - F(t)$ con Kaplan-Meier Modificado
1	110	110	10.94%	10.94%	89.06%
2	330	120	23.12%	26.56%	76.88%
3	120	220	36.64%	42.19%	63.36%
4	220	220	51.60%	57.81%	48.40%
5	220	220	68.10%	73.44%	31.90%
6	220	330	86.25%	89.06%	13.75%
Ordenar de menor a mayor					
Media			46.11%	50.00%	53.89%

Mantenibilidad

No. Dato	Datos de reparaciones - μ - en horas TTR	$M(t)$ con Kaplan-Meier Modificado	$M(t) = n / (N + 1)$ Método i-kaésimo	$M(t)$ con Rango de Mediana TABLA	$M(t)$ con aproximación Rango Mediana Benard
1	2	12.96%	16.67%	12.95%	12.96%
2	26	27.67%	33.33%	31.38%	31.48%
3	34	44.29%	50.00%	50.00%	50.00%
4	3	62.97%	66.67%	68.62%	68.52%
5	9	83.91%	83.33%	87.06%	87.04%
Ordenar de menor a mayor					
Media		46.36%	50.00%	50.00%	50.00%

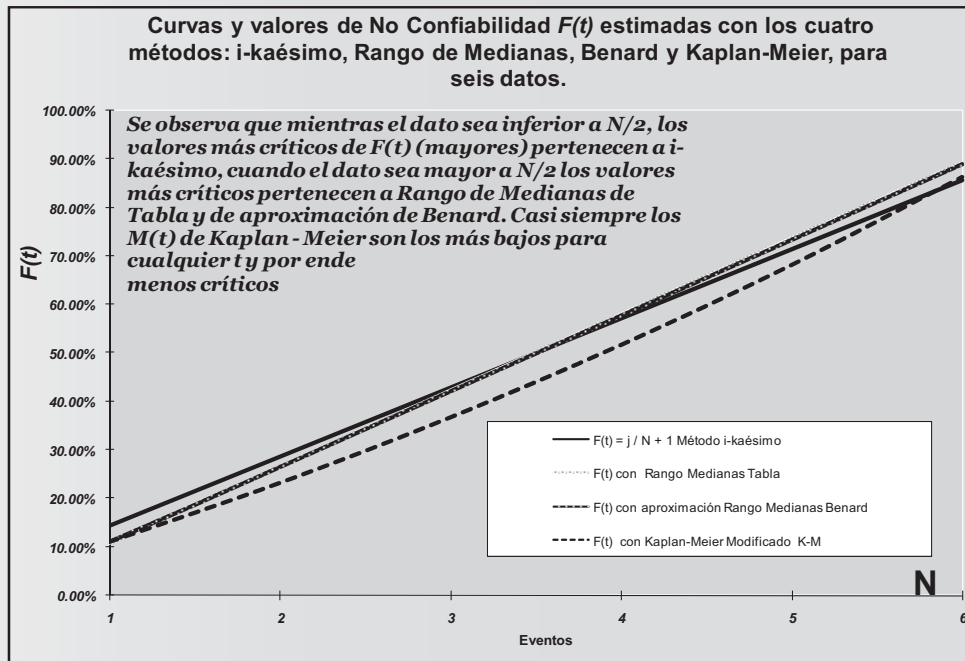
Cálculos en detalle

No confiabilidad	
$K - MM_1 = 1 - \frac{6 + 0.7}{6 + 0.4} * \frac{6 - 1 + 0.7}{6 - 1 + 1.7} = 10.94\%$	
$K - MM_2 = 1 - \frac{6 + 0.7}{6 + 0.4} * \frac{6 - 2 + 0.7}{6 - 2 + 1.7} * (1 - 10.94\%) = 23.12\%$	
$K - MM_3 = 1 - \frac{6 + 0.7}{6 + 0.4} * \frac{6 - 3 + 0.7}{6 - 3 + 1.7} * (1 - 23.12\%) = 36.64\%$	
$K - MM_4 = 1 - \frac{6 + 0.7}{6 + 0.4} * \frac{6 - 4 + 0.7}{6 - 4 + 1.7} * (1 - 36.64\%) = 51.60\%$	
$K - MM_5 = 1 - \frac{6 + 0.7}{6 + 0.4} * \frac{6 - 5 + 0.7}{6 - 5 + 1.7} * (1 - 51.60\%) = 68.10\%$	
$K - MM_6 = 1 - \frac{6 + 0.7}{6 + 0.4} * \frac{6 - 6 + 0.7}{6 - 6 + 1.7} * (1 - 68.10\%) = 86.25\%$	

Mantenibilidad	
$K - MM_1 = 1 - \frac{5 + 0.7}{5 + 0.4} * \frac{5 - 1 + 0.7}{5 - 1 + 1.7} = 12.96\%$	
$K - MM_2 = 1 - \frac{5 + 0.7}{5 + 0.4} * \frac{5 - 2 + 0.7}{5 - 2 + 1.7} * (1 - 12.96\%) = 27.67\%$	
$K - MM_3 = 1 - \frac{5 + 0.7}{5 + 0.4} * \frac{5 - 3 + 0.7}{5 - 3 + 1.7} * (1 - 27.67\%) = 44.29\%$	
$K - MM_4 = 1 - \frac{5 + 0.7}{5 + 0.4} * \frac{5 - 4 + 0.7}{5 - 4 + 1.7} * (1 - 44.29\%) = 62.97\%$	
$K - MM_5 = 1 - \frac{5 + 0.7}{5 + 0.4} * \frac{5 - 5 + 0.7}{5 - 5 + 1.7} * (1 - 62.97\%) = 83.91\%$	

Curvas y valores de no confiabilidad $F(t)$ estimadas por los cuatro métodos descritos

EJEMPLO 5.9



No. Dato j	Datos de operación sin fallas (en horas) TBF	Datos de operación sin fallas. Ordenados de menor a mayor	$F(t) = j / N + 1$ Método i- kaésimo	$F(t)$ con Rango Medianas Tabla	$F(t)$ con aproximación Rango Medianas Benard	$F(t)$ con Kaplan- Meier Modificado K-M
1	110	110	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
2	330	120	28.57%	26.45%	26.56%	23.12%
3	120	220	42.86%	42.14%	42.19%	36.64%
4	220	220	57.14%	57.86%	57.81%	51.60%
5	220	220	71.43%	73.56%	73.44%	68.10%
6	220	330	85.71%	89.09%	89.06%	86.25%
Media			50.00%	50.00%	50.00%	46.11%

Dado que existen tres UT iguales, por norma se asume el que tenga un $F(t)$ más crítico o sea el más alto y los dos menores se eliminan, como si no existiesen, por lo cual la Función de no Confiabilidad queda para los cuatro métodos, así

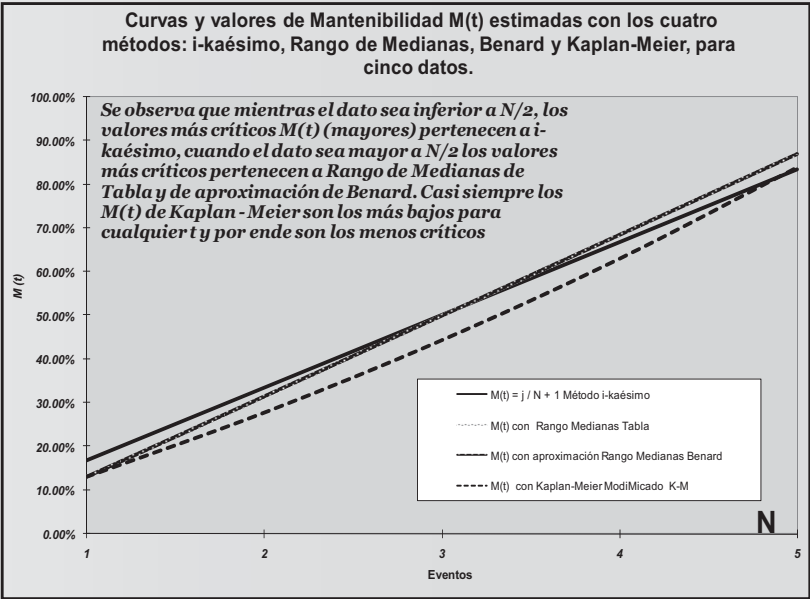
No. Dato j	Datos de operación sin fallas (en horas) TBF	Datos de operación sin fallas. Ordenados de menor a mayor	$F(t) = j / N + 1$ Método i- kaésimo	$F(t)$ con Rango Medianas Tabla	$F(t)$ con aproximación Rango Medianas Benard	$F(t)$ con Kaplan- Meier Modificado K-M
1	110	110	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
2	330	120	28.57%	26.45%	26.56%	23.12%
5	220	220	71.43%	73.56%	73.44%	68.10%
6	220	330	85.71%	89.09%	89.06%	86.25%

Método de estimación de no confiabilidad o mantenibilidad de Kaplan-Meier modificado para A_j .

Casi siempre, los valores por seleccionar (los más altos que son los más críticos), se dan en el método i -kaésimo hasta la primera mitad de los datos N y de ahí en adelante ocurren con el método Rango de Mediana Tabla.

EJEMPLO 5.10

Curvas y valores de mantenibilidad $M(t)$ estimadas por los cuatro métodos descritos



No. Dato <i>j</i>	Datos de operación sin Mallas (en horas) <i>TBM</i>	Datos de operación sin Mallas. Ordenados de menor a mayor	$M(t) = j / N + 1$ Método i- kaésimo	$M(t)$ con Rango Medianas Tabla	$M(t)$ con aproximación Rango Medianas Benard	$M(t)$ con Kaplan- Meier Modificado K-M
1	2	2	16.67%	12.95%	12.96%	12.96%
2	26	3	33.33%	31.38%	31.48%	27.67%
3	34	9	50.00%	50.00%	50.00%	44.29%
4	3	26	66.67%	68.62%	68.52%	62.97%
5	9	34	83.33%	87.06%	87.04%	83.91%
Media			50.00%	50.00%	50.00%	46.36%

Nótese que en ambos casos $F(t)$ y $M(t)$, la media de Kaplan-Meier no alcanza el 50%, lo que se ratifica en los cuadros de $F(t)$ (sin eliminar los UT iguales) y en $M(t)$, al ser el cuadro que siempre está por debajo con menores valores.

Estimación de no confiabilidad y mantenibilidad con datos censurados

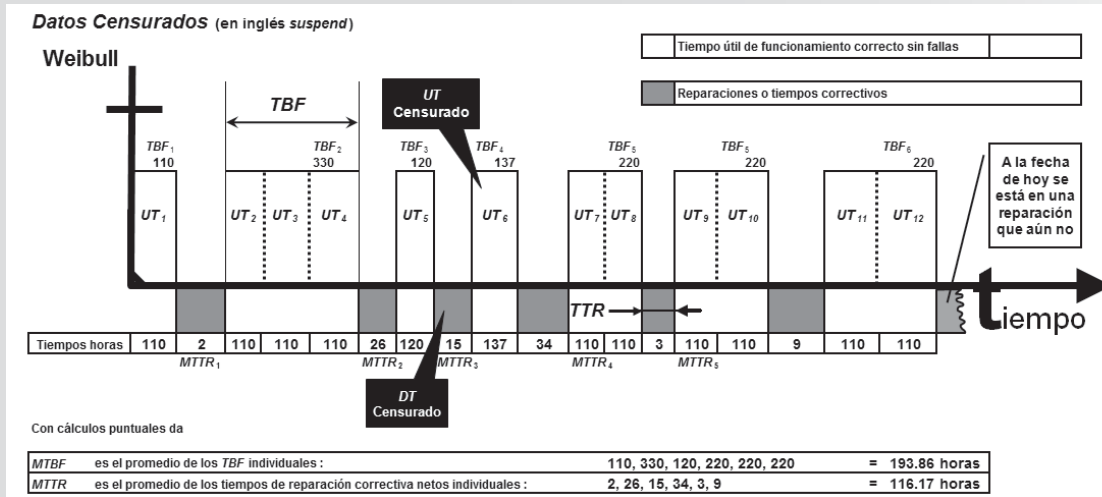
En ocasiones el manejo de datos implica una gran incertidumbre estadística, pero aun así los datos son útiles en el análisis de Weibull o de otras distribuciones. Esta incertidumbre puede provenir de varias fuentes: cuando se tiene gran cantidad de elementos para probar hasta la falla pero sólo se cuenta con recursos económicos para unos cuantos o no se dispone de mucho tiempo; cuando los elementos o dispositivos que se analizan no alcanzan el estado de falla o avería en el momento de hacer los cálculos de estimación y parametrización; cuando las pruebas (*test*) contra la falla se suspenden porque las condiciones de la prueba se alteran; cuando los datos obtenidos son de dudosa procedencia o no presentan la calidad de obtención adecuada. En general, es necesario hacer estimaciones aproximadas con el fin de completar el análisis CMD en Weibull. Para compensar la incertidumbre en tales datos es necesario realizar un censurado o ajuste en el nuevo cálculo del valor de posición j de los datos ordenados, con el fin de calcular $F(t)$ o $M(t)$ en el caso de reparaciones, necesario para estimar los parámetros.

Un método usado para tal fin es el método de los incrementos, que consiste en calcular nuevamente los valores de posición del número j de elementos fallados de acuerdo con un nuevo número de orden asignado; el proceso parte de la clasificación de los elementos como censurados o no censurados, luego genera un incremento

a partir de dicha clasificación y finalmente asigna un nuevo número de orden, de acuerdo con el incremento obtenido al valor de j el cual se denomina *número de orden* y es equivalente al N tratado hasta el momento en las cuatro estimaciones presentadas (Kelly, y otros, 1998).

EJEMPLO 5.11

Método de estimación de no confiabilidad con datos censurados para A_j .



Estimación de No Confiabilidad con datos censurados con los cuatro métodos

1	2	3	4	5	6	7	Método i-kaésimo	Método Tabla Rango de Medianas	Método Benard	Método Kaplan-Meier Modificado
Dato	Datos de operación sin fallas (en horas)	Censurado	Horas de operación sin fallas, organizados con Λ ascendente	CLASE Prueba O.K. (pone F) o test fallido (coloca S)	Incremento	Número de orden N	$F(t) = \frac{j}{N+1}$	$F(t) = \frac{j}{N+0.4}$	$F(t) = \frac{j-0.3}{N+0.4}$	$F(t) = K - MM = 1 - \frac{N+0.7}{N+0.4} \prod_{j=1}^N \frac{N-j+0.7}{N-j+1.7}$
1	110	F	110	F	1.000	1.000	14.29%	9.43%	9.46%	10.94%
2	330	F	120	F	1.000	2.000	28.57%	22.85%	22.97%	23.12%
3	120	F	137	S						
4	137	S	220	F	1.200	3.200	45.71%	39.13%	39.19%	34.55%
5	220	S	220	F	1.200	4.400	62.86%	55.44%	55.41%	47.73%
6	220	F	220	F	1.200	5.600	80.00%	71.73%	71.62%	63.16%
7	220	F	330	F	1.200	6.800	97.14%	87.89%	87.84%	81.84%
7	datos					Media	46.94%	47.74%	40.93%	32.67%

$$\text{Incremento} = \frac{N + 1 - (\text{Número de orden del elemento anterior que falló})}{N + 1 - (\text{Número de elementos anteriores})}$$

Dado que existen tres UT repetidos, la función de no confiabilidad $F(t)$ queda transformada para los datos censurados en:

1	4	5	6	7	Método i-kaésimo	Método Tabla Rango de Medianas	Método Benard	Método Kaplan-Meier Modificado
Dato	Horas de operación sin fallos, organizados con Λ ascendente	CLASE Prueba O.K. (pone F) o test fallido (coloca S)	Incremento	Número de orden N	$F(t) = \frac{j}{N + 1}$	$r = \sum_{j=1}^n \left(\frac{r_j}{n} \right) x^{(j)} (1 - x)^{n-j}$ $s = \sum_{j=1}^n \left(\frac{s_j}{n} \right) x^{(j)} (1 - x)^{n-j}$	$F(t) = \frac{j - 0.3}{N + 0.4}$	$F(t) = K - M M = 1 - \frac{N + 0.7}{N + 0.4} \prod_{j=1}^n \frac{N - j + 0.7}{N - j + 1.7}$
1	110	F	1.000	1.000	14.29%	9.43%	9.46%	10.94%
2	120	F	1.000	2.000	28.57%	22.85%	22.97%	23.12%
3	137	S						
6	220	F	1.200	5.600	80.00%	71.73%	71.62%	63.16%
7	330	F	1.200	6.800	97.14%	87.89%	87.84%	81.84%

Fuente: El autor.

El primer paso es ordenar los datos de tiempos útiles de menor a mayor, lo que se hace en la columna 4. En las columnas 3 y 5 (ordenada) se coloca si el dato es censurado (S) o no (F)¹⁹; el paso posterior consiste en definir el incremento con la fórmula:

► ECUACIÓN 5.9 - Cálculos del incremento y número de orden, en métodos de estimación de datos censurados

$$\text{Incremento} = \frac{N + 1 - (\text{Número de orden del elemento anterior que falló})}{N + 1 - (\text{Número de elementos anteriores})}$$

Por ejemplo, para el dato 1 es:

$$\text{Incremento del dato 1} = \frac{N + 1 - (\text{No. orden del elemento anterior que falló}_0)}{N + 1 - (\text{No. elementos anteriores})} = \frac{7 + 1 - 0}{7 + 1 - 0} = 1$$

lo que corresponde al valor vertical 1 de la columna 6; el valor del número de orden de la columna 6 se determina mediante la expresión:

$$\text{Número de orden} = \text{Incremento} + \text{Número de orden anterior}$$

Para el dato 1

$$\text{Número de orden}_1 = \text{Incremento}_1 + \text{Número de orden anterior}_0 = 1 + 0 = 1$$

19 Son datos de entrada del análisis.

Para los demás datos, los cálculos se trabajan así:

$$\text{Incremento del dato 2} = \frac{N+1 - (\text{No. orden del elemento anterior que falló}_1)}{N+1 - (\text{No. elementos anteriores})} = \frac{7+1-1}{7+1-1} = 1$$

$$\text{Número de Orden dato 2} = \text{Incremento}_2 + \text{Número de Orden anterior}_1 = 1+1 = 2$$

Para los datos censurados no se calcula ni el incremento ni el número de orden; en otras palabras, es como si no existiesen.

$$\text{Incremento del dato 4} = \frac{N+1 - (\text{No. orden del elemento anterior que falló}_2)}{N+1 - (\text{No. elementos anteriores})} = \frac{7+1-2}{7+1-3} = 1,20$$

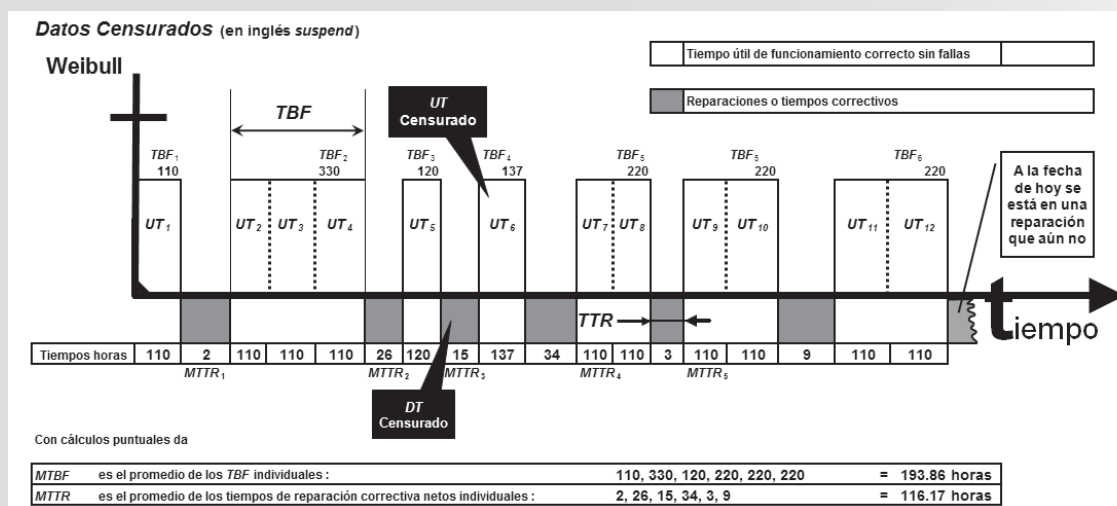
$$\text{Número de orden 4} = \text{Incremento}_4 + \text{Número de orden anterior}_2 = 1 + 2 = 3$$

Y así sucesivamente hasta llegar al dato donde $j = N$. Nótese que sólo hay cambios en incremento y número de orden después de que aparece un dato censurado, pero cuando no lo hay el incremento sigue constante (Kelly, y otros, 1998).

Para la estimación de mantenibilidad se realizan los mismos pasos que en no confiabilidad.

EJEMPLO 5.12

Método de estimación de mantenibilidad con datos censurados para A_1



Estimación de Mantenibilidad con datos censurados con los cuatro métodos

1	2	3	4	5	6	7				
N o t o	Datos de operación sin fallas (en horas)	C e n s u r a d o	Horas de operación sin fallos, organizados con λ ascendente	CLASE Prueba O.K. (pone F) o test fallido (coloca S)	Incremento	Número de orden N	$M(t) = \frac{j}{N+1}$	$M(t) = \frac{j-0.3}{N+0.4}$	$M(t) = \frac{j-0.3}{N+0.4}$	$M(t) = K - MM = 1 - \frac{N+0.7}{N+0.4} \prod_{j=1}^N \frac{N-j+0.7}{N-j+1.7}$
1	2	F	2	F	1.000	1.000	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
2	26	F	3	F	1.000	2.000	28.57%	26.45%	26.56%	23.12%
3	15	F	9	F	1.000	3.000	42.86%	42.14%	42.19%	36.64%
4	34	S	15	S						
5	9	F	26	F	1.333	4.333	61.90%	63.09%	63.02%	53.37%
6	9	F	34	F	1.333	5.667	80.95%	83.95%	83.85%	75.19%
6 datos						Media	38.0952%	45.3080%	37.7604%	28.4663%

5.13 RECOMENDACIONES Y MEJORES PRÁCTICAS CON LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE F(T) Y M(T)

Los análisis hasta ahora realizados permiten concluir aspectos relevantes, a la hora de seleccionar los métodos de estimación más convenientes de utilizar en la práctica.

El método de Kaplan-Meier no es recomendable en ningún caso, ya que sus valores tanto en la estimación de no confiabilidad como de mantenibilidad²⁰ siempre presentan las probabilidades más bajas, pero en la realidad se requieren los más altos como valores más críticos. Esto se valida al observar los resultados que se presentan en el *Ejemplo 5.9* - Curvas y valores de no confiabilidad f(t) estimadas por los cuatro métodos descritos y en el *Ejemplo 5.10* - Curvas y valores de mantenibilidad m(t) estimadas por los cuatro métodos descritos.

Allí se detecta que los valores más críticos son los pertenecientes al estimador no sesgado o *i*-kaésimo (de la mitad hacia el inicio de los tiempos *t*) y a los de rango de mediana (en sus versiones tabla binomial y Benard) (hacia la mitad más alta de tiempos *t*). Se realiza una estimación con los cuatro métodos con una muestra cualquiera de datos de fallas y reparaciones, que le permite calcular los parámetros de confiabilidad para varios tamaños muestrales y se obtiene:

20 Es mucho más conservador pensar y asumir que la reparación tarda más, que es lo que refleja un M(t) más alto; como también se puede pensar que si se tiene un factor de mantenibilidad más alto, menor es la disponibilidad calculada (al estar en el denominador), lo cual es mucho más prudente.

Comparación de los cuatro métodos de estimación con diferentes N y, parámetros en Weibull $F(t)$ – no confiabilidad **CUADRO 5.4**

N datos	Estimación	i-kaésimo	Rango de Mediana Tabla	Benard	Kaplan-Meier
10	MTBF	168.088	161.681	161.826	182.487
	Beta	1.294	1.444	1.440	1.416
	Eta η	181.815	178.218	178.301	200.574
	R	0.9820	0.9815	0.9813	0.9790
	R ²	0.9644	0.9634	0.9630	0.9584
50	MTBF	188.138	180.824	181.150	222.360
	Beta	0.840	0.878	0.876	0.898
	Eta η	171.648	169.451	169.533	211.090
	R	0.9933	0.9941	0.9941	0.9935
	R ²	0.9866	0.9882	0.9882	0.9870
100	MTBF	174.601	170.725	170.943	207.622
	Beta	0.902	0.927	0.926	0.958
	Eta η	166.139	164.839	164.907	203.647
	R	0.9950	0.9951	0.9951	0.9933
	R ²	0.9900	0.9902	0.9902	0.9867
150	MTBF	190.176	188.002	188.135	221.727
	Beta	1.064	1.085	1.084	1.131
	Eta η	194.852	193.970	194.019	231.799
	R	0.9971	0.9958	0.9958	0.9981
	R ²	0.9941	0.9916	0.9917	0.9962

M(t) - Mantenibilidad

N datos	Estimación	i-kaésimo	Benard	Kaplan-Meier	MLE
10	Beta	1.206	1.333	1.325	1.630
	Eta η	356.5	350.1	395.3	340.7
	MTTR	334.89	321.72	363.73	304.98
	R ²	0.9606	0.9532	0.9612	
50	Beta	1.266	1.321	1.346	1.726
	Eta η	425.3	421.8	489.4	401.1
	MTTR	395.00	388.30	449.03	357.55
	R ²	0.9718	0.9732	0.9667	
100	Beta	1.345	1.380	1.425	1.706
	Eta η	435.6	433.5	499.9	418.1
	MTTR	399.68	396.03	454.36	372.99
	R ²	0.9803	0.9799	0.9766	

De este experimento se sacan varias conclusiones; entre ellas: que siempre el $MTBF$, $MTTR$, el Beta y el Eta η obtenidos por Kaplan-Meier son muy desfasados en relación con los del estimador no sesgado i-kaésimo y los de rango de medianas; la prueba R^2 aporta valores adecuados en forma similar en todas las pruebas, y que casi siempre el Beta obtenido con Kaplan-Meier es muy diferente en todos los casos, en comparación con los otros tres estimadores.

Con ello se ratifica la posición de no recomendar el uso del método Kaplan-Meier.

Es importante también señalar que en los ejemplos que se muestran anteriormente, para los cálculos de $F(t)$ y para $M(t)$ con datos censurados o no, se nota una marcada diferencia entre ellos, y se aprecia que siempre los valores de $F(t)$ y $M(t)$ son mayores en cada uno de los estimadores obtenidos sin datos censurados. Todo esto plantea la posibilidad de preferir los estudios sin datos censurados; sin embargo, queda pendiente por evaluar el impacto de no tener en cuenta la incidencia de los UT y DT censurados, en la estimación de los parámetros $MTBF$, $MTBM$, $MTTR$, $\bar{M}$, $\bar{M}'$, entre otros, en las diferentes disponibilidades que se presentan como posibles, en los distintos procesos como $NHPP$, HPP o predicciones.

RESUMEN

Parámetros y distribuciones - CMD

Esta segunda parte aporta las diferentes metodologías, las explicaciones, los fundamentos, cálculos, fórmulas, criterios, etc., necesarios para realizar los pasos previos de CMD, hasta obtener la alineación del modelo propuesto como universal y sus parámetros, con diferentes alternativas mediante los modelos puntuales y de distribuciones.

PREGUNTAS, DESARROLLOS, FOROS Y EJERCICIOS

- Argumente y explique por lo menos tres elementos básicos, que hacen posible considerar al mantenimiento como una ciencia técnica.
- Describa en qué consiste el sistema kantiano aplicado a mantenimiento industrial, y describa sus elementos estructurales y los actores principales en ingeniería de fábricas, al tratarlo bajo este enfoque sistémico.
- Describa las funciones primarias de mantenimiento y producción, explicando en cada caso.
- Construya un triángulo de elementos estructurales de ingeniería de fábricas, estableciendo las reglas de juego que definen sus relaciones tanto abiertas como cerradas.

- Explique las cuatro categorías del mantenimiento bajo un enfoque estratégico sistémico, aclarando en cada nivel cuáles son sus principales metas, logros y alcances.
- Arguya al menos tres métodos de predicción de valores y parámetros CMD, detallando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones.
- Defina confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, como una síntesis de los conceptos de los autores internacionales.
- ¿Cuáles tipos de disponibilidades factibles conoce? ¿Cuáles de ellas dan mayores valores de disponibilidad que las otras y por qué? Explíquelas en detalle y haga un contraste de las ventajas y aplicaciones entre ellas.
- Enumere y explique los pasos principales del modelo universal para la medición y la predicción del CMD, detalle cada etapa y diga en qué consiste.
- ¿En qué casos el $MTBM_C$ de la disponibilidad operacional se hace igual al de la alcanzada y al de la operacional generalizada?
- ¿En cuáles ocasiones el $MTTR$ y el M_p de la disponibilidad alcanzada se hace igual al de la inherente, al de la operacional y al de la operacional generalizada? Explique y dé las razones del porqué.
- ¿Cuándo el $MTBM_p$ de la disponibilidad operacional generalizada se hace igual al de la alcanzada, intrínseca y operacional generalizada?
- ¿Por qué siempre el modelo de Kaplan-Meier es el más desfavorable en criticidad, a la hora de estimar los parámetros y funciones?
- Detalle gráficamente y dé las explicaciones estratégicas de todas las zonas de la curva de Davies o de la bañera, y enumere en cada caso las causas de fallas, los comportamientos de los equipos y las estrategias adecuadas.
- Describa los rangos de aplicabilidad en función del Beta que se recomienda para las tácticas reactiva, TPM, RCM y proactiva, en la curva de la bañera.
- Explique detalladamente las diferentes opciones de alineación, contrastando sus ventajas, limitaciones y usos adecuados, y establezca algunos casos.
- Explique gráfica y conceptualmente las curvas de no confiabilidad, de confiabilidad o supervivencia y la de mantenibilidad, y dé ejemplos numéricos de lectura puntual en cada gráfico.

PARÁMETROS Y DISTRIBUCIONES - CMD

TERCERA PARTE

OBJETIVOS

Manejar los diferentes modelos de parametrización, diferenciando las distintas opciones internacionales de distribuciones, susceptibles de utilizar, de tal forma que le permitan al lector hacer gala de los mejores sistemas de cálculo y predicción de las variables CMD futuras, mediante la selección de diferentes caminos y midiendo el grado de bondad de ajuste de los mismos, con el fin de lograr las mejores mediciones bajo modelos de fácil utilización y con las mejores prácticas internacionales en este campo –Nivel 3 – Aplicar – Escala de Bloom, Barret y Gagné (Gagné@ y otros, 2008).

INTRODUCCIÓN

La tercera parte de este libro expone los criterios de selección de las mejores distribuciones, con el fin de parametrizar y construir los modelos de predicción de los valores y funciones CMD, para pronosticar el comportamiento futuro del mantenimiento y de la operación de las máquinas, las líneas de producción o las fábricas donde aplique la medición, de tal forma que se puedan establecer las mejores estrategias, tácticas y operaciones de mantenimiento.

La utilización de la metodología universal de cálculo y predicción del CMD requiere el dominio completo en forma integral y detallada de cada uno de sus pasos, los cuales se abordan desde la parte anterior. Ahora se pretende el conocimiento preciso de los diferentes modelos de parametrización, de cada una de las opciones de distribución por aplicar, de tal manera que se pueda modelar lo más exactamente posible el comportamiento de los tiempos útiles, de fallas y de mantenimientos planeados.

CONOCIMIENTOS PREVIOS REQUERIDOS

Se debe ejercer un pleno dominio de los modelos de alineación con mínimos cuadrados o regresión, y del *MLE*, y conocer los pasos previos y fundamentales en la predicción del CMD. Es importante que el lector pueda diferenciar las ventajas y limitaciones de cada una de las aplicaciones en las diferentes disponibilidades estandarizadas mundialmente.

CAPÍTULO 6

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS - WEIBULL - LOGNORMAL Y NORMAL

Los datos analizadas mediante las distribuciones pueden responder a diferentes características, de acuerdo con el tipo y el evento de estudio, como, por ejemplo, el tiempo de funcionamiento del equipo (*MTTF*), el tiempo de operación del sistema (*MTBF*), o el tiempo que tarda en repararse un equipo después de fallar (*MTTR*). Estos tiempos de vida pueden medirse en horas, millas, ciclos de fracaso, ciclos de tensión, o cualquier otra medida con que se puedan evaluar la vida o la exposición del ítem (O'Connor, 2002).

En el análisis de los datos de vida y en la ingeniería de confiabilidad se deben estimar los valores de la probabilidad de falla, la probabilidad de éxito o la confiabilidad, la vida media, los parámetros de una distribución o cualquier otro parámetro aplicable, porque son los instrumentos que permiten desarrollar estrategias y acciones claras de mantenimiento e ingeniería de fábricas (Reliasoft®, 2008).

La estimación de los parámetros de la distribución se realiza luego de seleccionar el modelo de distribución para describir los datos, para lo cual existen dos tipos: estimación puntual, que busca el mejor cálculo del parámetro a partir de los datos disponibles; y la estimación del intervalo, que mide los límites superior e inferior del parámetro desconocido. Es evidente que a mayor cantidad de datos disponibles, la estimación del parámetro es más cercana al valor verdadero (Lewis, 1995).

Los métodos que permiten realizar la estimación de los parámetros de una distribución varían entre simples sofisticados; algunos de los más comunes para realizar esta tarea son el método gráfico, el método de mínimos cuadrados (o de regresión) y el método de la máxima verosimilitud MLE^1 (Reliasoft®, 2008).



Los datos analizados mediante las distribuciones pueden responder a diferentes características, de acuerdo con el tipo y evento de estudio, como, por ejemplo, *MTTF*, *MTBF*, *MTTR*.

En el análisis de los datos de vida y en la ingeniería de confiabilidad se deben estimar los valores de la probabilidad de falla, la probabilidad de éxito o confiabilidad, la vida media, y los parámetros de una distribución.

1 El cual no requiere alineación previa, como sí lo requieren los de regresión gráfico o numérico.



Tanto el método gráfico como el de mínimos cuadrados exigen la estimación previa de la función de no confiabilidad o de mantenibilidad.

Una de las ventajas significativas que ofrece la distribución Weibull es que es muy manejable y se acomoda a las tres zonas (infancia o rodaje, madurez o vida útil y envejecimiento) de la curva de la bañera o de Davies.

Tanto el método gráfico como el de mínimos cuadrados exigen la estimación previa de la función de no confiabilidad, o de mantenibilidad.

6.1 MÉTODO GRÁFICO DE PAPEL DE WEIBULL O ALLEN-PLAIT

El procedimiento consiste en graficar los valores de $F(t)$ o de $M(t)$ en el eje Y, con sus respectivos tiempos t en el eje X. La forma que posee el papel de Weibull permite conformar una línea recta, a partir de la cual se logra valorar tanto la pendiente como su intersección con el eje Y vertical; y a partir de estos dos valores se pueden obtener los parámetros propios de la función Weibull de Beta, Eta, etc.

6.2 FUNDAMENTOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

Una de las ventajas significativas que ofrece la distribución Weibull consiste en que es muy manejable y se acomoda a las tres zonas² (infancia o rodaje, madurez o vida útil y envejecimiento) de la curva de la bañera o de Davies. La distribución de Weibull posee en su forma general tres parámetros, lo que le da una gran flexibilidad y cuya selección y ajuste adecuado permiten obtener mejores ajustes, que con otras distribuciones (Rojas, 1975). Estos parámetros son:

- Gamma - parámetro de posición (γ): El más difícil de estimar y por este motivo se asume con demasiada frecuencia que vale cero. Indica el lapso en el cual la probabilidad de falla es nula (Forcadas, 1983).
- Eta - parámetro de escala o característica de vida útil (η): Su valor es determinante para fijar la vida útil del producto o del sistema. Cuanto más alto, las máquinas pueden ser más robustas o de trabajos de mayor duración.
- Beta - parámetro de forma (β): Refleja la dispersión de los datos y determina la forma que toma la distribución.

El parámetro Beta permite a la distribución de Weibull tomar diversas formas: cuando β es inferior a 1 se le denomina a esta fase como de mortalidad infantil (tasa

2 Igual que la distribución de Hjorth.

de falla decreciente); cuando toma valores cercanos a uno se describe la fase con el nombre de vida útil (tasa de falla constante y aleatoria), y en el evento del β tomar valores mayores de 1, se conoce la fase como de envejecimiento o de desgaste³ (tasa de falla creciente) (Díaz, 1992).

Parámetro de forma Beta de Weibull.

CUADRO 6.1

Valor (b)	Características
$0 < \beta < 1$	Tasa de falla decreciente
$\beta = 1$	Distribución exponencial
$1 < \beta < 2$	Tasa de falla creciente, cóncava
$\beta = 2$	Distribución Rayleigh
$\beta > 2$	Tasa de falla creciente, convexa
$3 \leq \beta \leq 4$	Tasa de falla creciente se aproxima a la distribución normal; simétrica

Fuente: El autor.

Para usar la parametrización con el papel de Weibull se debe tener en cuenta que es necesario alinear los valores; para ello se describen las siguientes consideraciones:

6.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE WEIBULL

La tasa de fallas expresa la cantidad de averías o de reparaciones por unidad de tiempo que ocurren en el tiempo en que se estudia un elemento; en el caso particular de la distribución de Weibull, se puede escribir de la siguiente manera:

► ECUACIÓN 6.1 - Análisis de tasa de fallas, función de confiabilidad, función de densidad y función acumulada en Weibull

$$\lambda(t) = -\frac{\frac{d[R(t)]}{dt}}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Donde:

La derivada de $R(t)$, con respecto a t en el numerador es $f(t)$ denominada función de densidad de probabilidad de fallas o de falla instantánea en el tiempo t ; a su vez $R(t)$ es la función de confiabilidad y $\lambda(t)$ es la función de tasa de fallas.

3 A mayor β , mayor desgaste. Esta característica puede ser usada para construir fórmulas de valorización de equipos; aplicando el valor del equipo (estimado según cualquier modelo), el factor $1/\beta$.



La tasa de fallas expresa la cantidad de averías o reparaciones por unidad de tiempo que ocurren en el periodo en que se estudia un elemento.

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) * d(t) \right]$$

Donde:

La curva $R(t)$ se puede describir en función de $\lambda(t)$ de fallas.

En 1951, Weibull escribe la función empírica más sencilla que puede representar mejor una gran variedad de datos reales (Tamborero@, 2005).

$$\int \lambda(t).dt = \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta$$

Donde:

t es el tiempo en cualquier momento y t_0 es un tiempo de referencia o parámetro inicial de localización, η (eta o alfa) es el parámetro de escala o vida característica, y Beta es el parámetro de forma, el cual se considera como una medida de dispersión de los datos evaluados en la distribución (en la medida en que el Beta sea mayor, hay menor dispersión, lo que ocurre en los equipos maduros, muy conocidos o viejos; cuando el Beta es bajo denota mucha desviación estándar entre los tiempos de fallas, y en general es inverso a la dispersión de los datos de falla). Con esta ecuación se pueden representar muchas formas de confiabilidades y a la vez es de fácil manejo.

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp \left[- \int \lambda(t) d(t) \right] = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta \right]$$

que representa normalmente la distribución de Weibull y se conoce a $F(t)$ como función acumulativa de fallas $F(t)$, también válida para $M(t)$.

Por otro lado, a

$$f(t) = \lambda(t).R(t) = \frac{dR(t)}{dt} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta \right]$$

se le denomina como la función de densidad de probabilidad de fallas o de falla instantánea en el tiempo t , donde se cumple que la tasa de fallas para esta distribución es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

Las expresiones enunciadas en este literal son válidas para rangos donde $(t - t_0) = 0$; cuando éste es menor que cero (0), la función de densidad de probabilidad de fallas o falla instantánea $f(t)$ y la tasa de fallas $\lambda(t)$ valen 0.

En el eje vertical Y o eje de las ordenadas se valora la función $\text{Ln} \{ \text{Ln} (1 / (1 - F(t))) \}$, que es igual a la fórmula $\text{Beta} * \text{Ln} (t) - \text{Beta} * \text{Ln} (\eta)$, y en el eje de las abscisas, o sea el eje de t , se tabula la expresión $\text{Ln} \{ t - t_0 \}$, donde t es el tiempo del evento y t_0 el tiempo mínimo en que empiezan a ocurrir fallas, y normalmente es igual a cero. Similarmente se hace con la función de mantenibilidad, es decir, simplemente se reemplaza $F(t)$ por $M(t)$ (O'Connor, 2002).

Las constantes que aparecen en las expresiones anteriores tienen una interpretación real y física: t_0 es el parámetro de posición (unidad de tiempo); en los ejemplos descritos vale 0, es considerado el tiempo de vida mínima y define el punto de partida u origen de la distribución.

El parámetro de escala Eta es la extensión de la distribución a lo largo del eje del tiempo. Cuando $t - t_0 = h$ y dado que la confiabilidad viene dada por la expresión

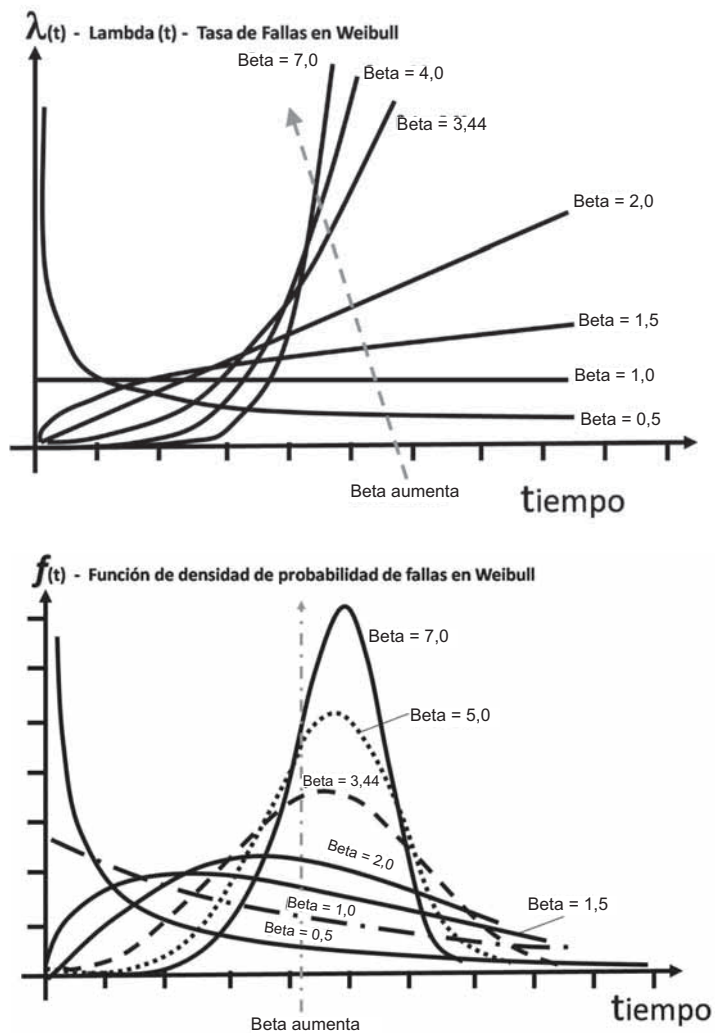
$$R(t=\eta) = \exp \left[- \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta \right] = \exp \left[- \left(\frac{\eta}{\eta} \right)^\beta \right] = \exp [-1]^\beta = \frac{1}{\exp [1]^\beta} = \frac{1}{2.718} = 0.368$$

o 36,8% y la función acumulativa de fallas es $F(t) = F(h) = 1 - R(t) = 1 - 0,368 = 0,632$; es decir, 63,8%.

Entonces, la constante representa también el tiempo, medido a partir de $t_0 = 0$, según lo cual dado que $F(t) = 0,632$, el 63,2% de la población que se espera que falle, cualquiera que sea el valor de β (ya que su valor no influye en los cálculos realizados). Por esta razón también se le llama usualmente vida característica. El parámetro de forma β representa la pendiente de la recta que describe el grado de variación de la tasa de fallas y Eta es la intersección con el eje vertical de probabilidades de falla acumuladas. Esta es la fundamentación para el manejo del papel de Weibull.

Gráficas para diferentes Betas de $f(t)$, $\lambda(t)$ y $F(t)$ en Weibull.

GRÁFICO 6.1



(Continuación)

GRÁFICO 6.1

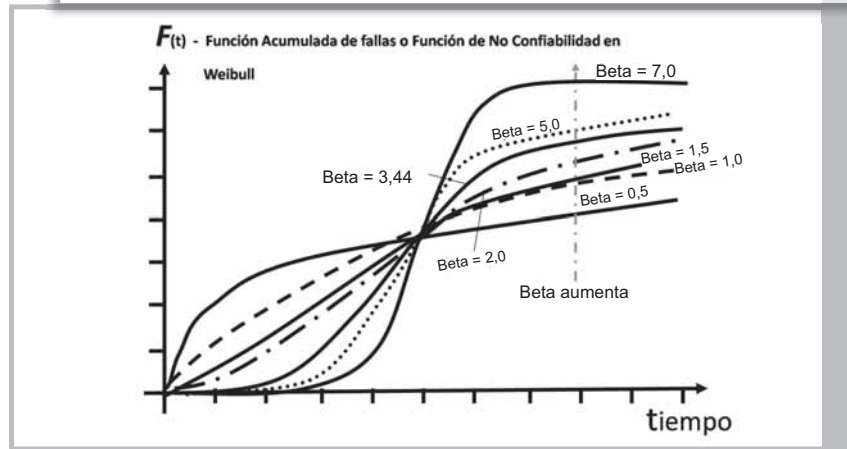
Comportamiento de $\lambda(t)$, $f(t)$ y $F(t)$ de algunas distribuciones

GRÁFICO 6.2

Distribución	Parámetros	$R(t) = 1 - F(t)$ Función de Confiabilidad	Función de Densidad de Probabilidad de Falla $f(t)$	$A(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$ Función de Tasa de Falla	Sus usos son relevantes en
Normal	Media, μ Desviación estándar, σ	$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt$	$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$	$A(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	Distribución de vida de elementos o sistemas sometidos a grandes cargas o esfuerzos
Exponencial	MTBF, θ $\theta = \lambda^{-1}$	$R(t) = \exp(-\lambda t)$	$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$	$A(t) = \lambda = \theta^{-1}$	Distribución de vida de elementos o sistemas complejos no reparables Distribución de vida de algunos elementos o sistemas en el periodo de rodaje, fase I o de mortalidad infantil
Weibull $f(t) = \frac{r}{\Gamma(r)} (t)^{r-1} \exp(-At)$	Posición, γ Escala, η Forma, β Las curvas de esta ilustración son con $\gamma = 0.0$	$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$	$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$	$A(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$	Elementos o sistemas con resistencia a la corrosión Distribución de vida de muchos elementos básicos: capacitores, relays, rodamientos, algunos motores, etc.
Gamma	$SD = \frac{1}{A}$ Cuando a es un número entero, se cumple que: $\Gamma(a) = (a-1)!$	$R(t) = \frac{\Gamma(a)}{\Gamma(a)} \int_0^\infty t^{a-1} \exp(-\lambda t) dt$	$f(t) = \frac{\lambda^a}{\Gamma(a)} t^{a-1} \exp(-\lambda t)$	$A(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	Distribución de tiempo de vida entre recalibración, ajuste o mantenimiento de equipos Distribución de tiempo de vida de elementos con sistemas paralelos o en stand-by

Fuente: El autor.

6.4 LECTURA DE LOS PARÁMETROS η Y β EN EL PAPEL DE WEIBULL

Un grupo de datos que siga la distribución de Weibull se puede representar mediante una línea recta en el papel que lleva su nombre, al utilizar las ecuaciones presentadas en la *Ecuación 6.1 - Análisis de tasa de fallas, función de confiabilidad, función de densidad y función acumulada en Weibull*, si se asume que $t_0 = 0$, que el origen es conocido y que coincide con los datos experimentales.

► ECUACIÓN 6.2 - Ecuaciones de Weibull para alinear los datos y usar el papel de esta distribución

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \int \lambda(t) \cdot d(t) \right] = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right] = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]$$

Expresión que relaciona la confiabilidad con la no confiabilidad; si se aplican logaritmos neperianos dos veces a ambos lados de la ecuación, ésta se transforma en:

$$\text{Ln} \left(\text{Ln} \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right) = \beta * \text{Ln}(t) - \beta * \text{Ln}(\eta)$$

Para proceder a alinear esta expresión se recuerda que para líneas rectas la ecuación que las gobierna es del tipo $Y = X + B$, donde A es la pendiente y B es la intersección con el eje Y. Al comparar con la expresión anterior de doble logaritmo, se tiene

$$Y = \text{Ln} \left(\text{Ln} \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right) = \beta * \text{Ln}(t) - \beta * \text{Ln}(\eta) = A * X + B$$

Como también se puede asociar a $A = \beta$ y $X = \text{Ln}(t)$ y se puede asimilar $B = -\beta * \text{Ln}(\eta)$, con lo cual se logra la alineación recta completa. Se cumple también que cuando $R(t) = 0,368$ y $F(t) = 0,6321$. Entonces la constante representa también el tiempo, medido a partir de $t_0 = 0$, según lo cual, dado que $F(t) = 0,6321$:

$$Y = \text{Ln} \left[\text{Ln} \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] = 0$$

O sea que si se quita la función Ln a ambos lados, queda:

$$\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) = 1 \quad y \quad \frac{1}{1-F(T)} = e$$

de tal modo que,

$$R(t) = F(t) = \frac{1}{e} = \frac{1}{2,783} = 1 - 0,3679 = 0,632 \text{ (63,21\%),}$$

según lo cual $F(t) = 0,632$ y se cumple que para $t_0=0$ se efectúa la alineación con $AX + B = 0$, y se verifica que $b^* X - \beta * \ln(\eta) = 0$, y también que $\beta^* X - \beta * \ln(\eta)$, de donde $X = \ln(\eta)$ y dado que se tiene que $X = \ln(t)$ se deduce que $t = \eta$ para cuando $F(t) = 0,6321$; con lo cual η se lee directamente en el papel de Weibull para la ordenada 63,21, ya que la escala de abscisas está en forma de $\ln(t)$ (Tamborero@, 2005).

Para determinar los parámetros β y η se utiliza el papel de Weibull, así:

Beta es el parámetro de forma β y representa la pendiente de la recta. Para obtener el valor de Beta se traza una recta paralela a la obtenida con la representación de t y $F(t)$ que pase por la coordenada, donde $F(t)$ acumulado de fallas valga 63,2 en la ordenada y $\ln(t)$ igual 1 en la abscisa; de allí se puede leer directamente el valor de β en una escala tabulada de 0 a 7.

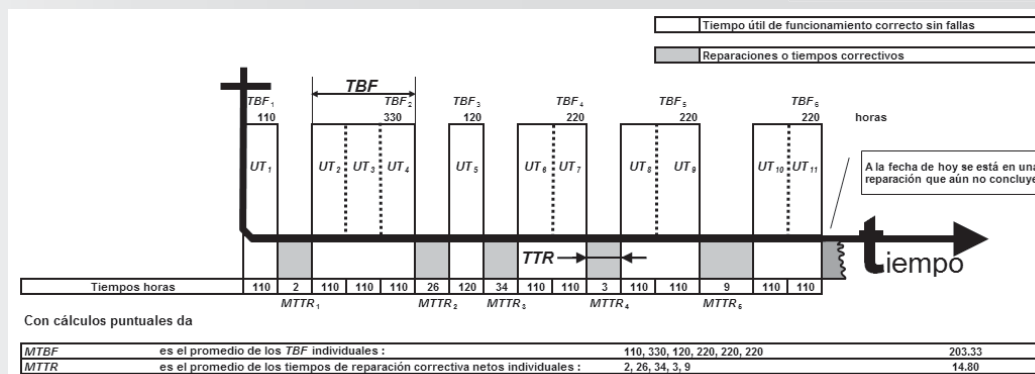
El valor de η es el parámetro de escala y su valor viene dado por la intersección de la recta trazada con la línea paralela al eje de abscisas, correspondiente al 63,2% de fallas acumuladas.

En efecto, se demuestra que para la ordenada $t_0 = 0$ se tiene un $F(t) = 63,2\%$.

Para efectos de utilizar el método gráfico se toman los datos del ejemplo de la disponibilidad inherente que se trae en desarrollo, con los $F(t)$ y $M(t)$ calculados por medio del *Ejemplo 5.5* - Método de estimación *i*-kaésimo para A_r , pero convertido con los UT no repetidos, así:

Ejemplo A_r para uso de papel de Weibull

EJEMPLO 6.1



Método i-kaésimo

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	F(t) = j / N + 1
1	110	14.29%
2	120	28.57%
3	220	42.86%
4	220	57.14%
5	220	71.43%
6	330	85.71%
Media		50.00%

No. Dato j	Datos de reparación en horas	M(t) = j / N + 1
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
Media		50.00%

Método i-kaésimo con no repetición de UT

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	F(t) = j / N + 1
1	110	14.29%
2	120	28.57%
5	220	71.43%
6	330	85.71%
Media		50.00%

No. Dato j	Datos de reparación en horas	M(t) = j / N + 1
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
Media		50.00%

No Confiabilidad

Ln(Ln(1/(1-F(t)))) - Y de la regresion	Ln de datos - X de la regresion
-1.86982	4.700
-1.08924	4.787
0.22535	5.394
0.66573	5.799

Mantenibilidad

Ln(Ln(1/(1-M(t)))) - Y de la regresion	Ln de datos - X de la regresion
-1.70198	0.693
-0.90272	1.099
-0.36651	2.197
0.09405	3.258
0.58320	3.526

Cálculos con método de regresión en Excel

Intersección	-11.742
Beta	2.171
Eta η	223.25
MTBF	197.711

$MTBF = \eta * \text{Gamma } \Gamma (1+ 1/\beta)$

MTBF puntual	203.300

Intersección	-1.8708
Beta	0.6355
Eta η	18.98
MTTR	26.61

$MTTR = \eta * \text{Gamma } \Gamma (1+ 1/\beta)$

MTTR puntual	14.800

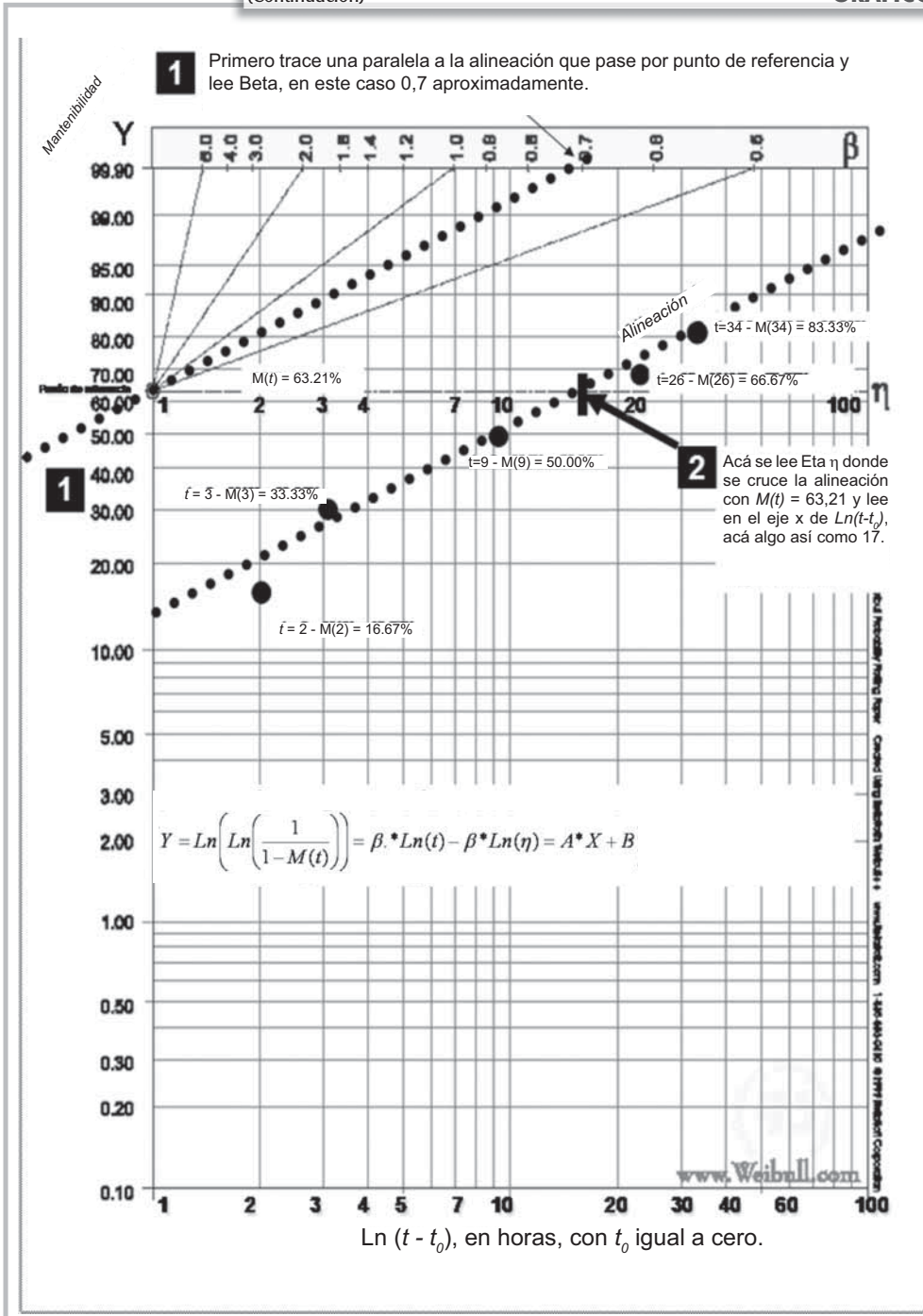
Lectura de Allen - Plait o Papel Weibull

Beta	2.070
Eta η	230.00
MTBF	203.734

Beta	0.7000
Eta η	17.00
MTTR	21.52

(Continuación)

GRÁFICO 6.3

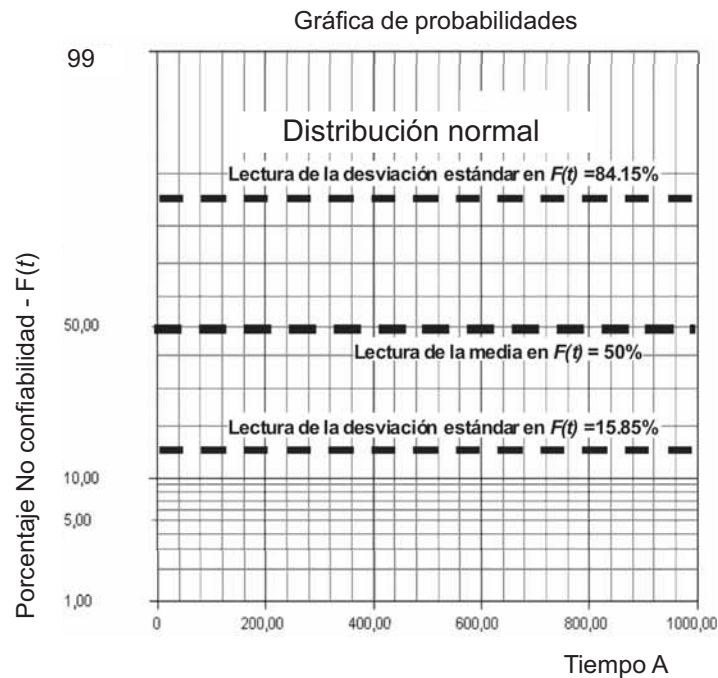


A pesar de que los resultados son similares, siempre queda en evidencia que el método de alineación con el método gráfico, en este caso de Weibull, es muy subjetivo, lo que puede conducir a errores importantes en el análisis y en la selección de estrategias y acciones de mantenimiento.

Existen distintos métodos gráficos para otras funciones, como LogNormal y Normal; la metodología es muy similar a la utilizada en el *Gráfico 6.3* - Gráfico de Allen-Plait (Papel de Weibull).

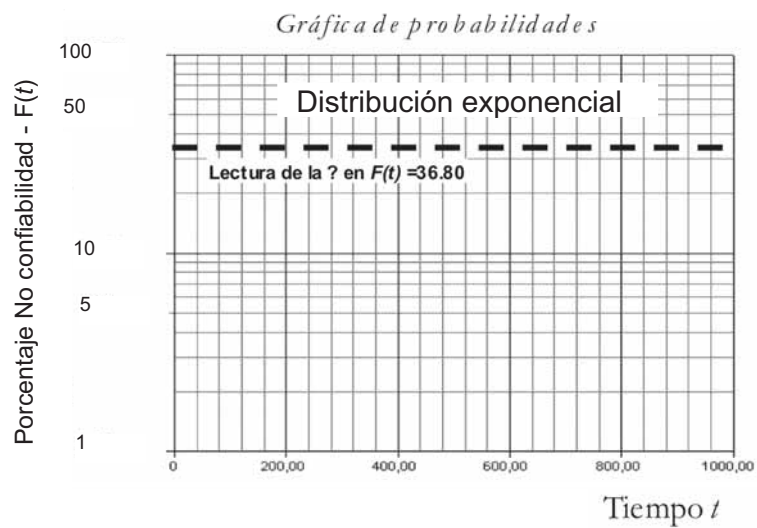
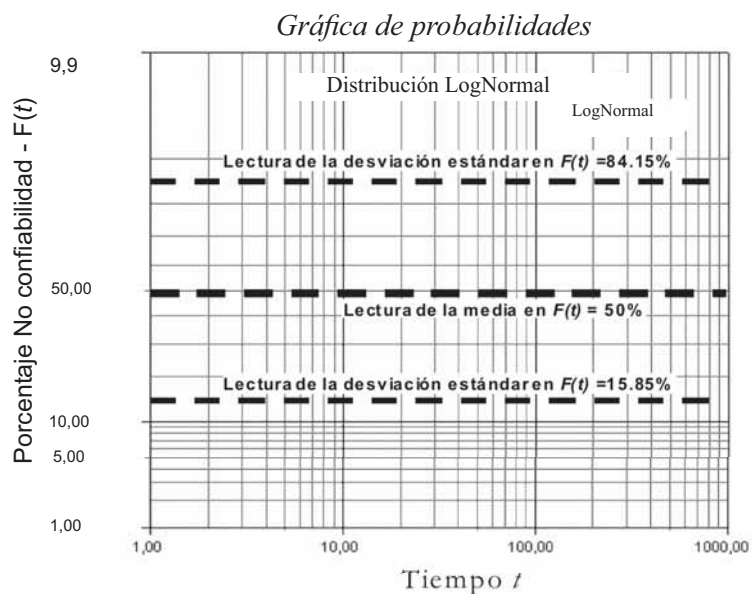
Este método adopta la función de probabilidades de fallas acumuladas $F(t)$ la cual trata de alinearla en forma recta, y se vale de la construcción de los ejes de coordenadas Y y X con transformaciones especiales, utilizadas en los papeles de cada función. Este diseño de los ejes se basa en la alineación de la función de tiempo de falla en la abscisa (X, en este caso eje t) y en el eje vertical (Y) la función de no confiabilidad o de probabilidad de falla acumulada, o la de mantenibilidad, cuando de ésta se trate el análisis.

Papeles de alineación para distribuciones Normal, LogNormal y Exponencial.

GRÁFICO 6.4

(Continuación)

GRÁFICO 6.4



Los puntos se grafican y a partir de la mejor recta que se pueda dibujar se obtiene la pendiente, y los parámetros necesarios se logran a partir de lecturas específicas dentro del papel.

La estimación de los parámetros de las distribuciones en este método implica el corte de la línea de ajuste en puntos específicos del eje Y y su lectura en el eje X, en los valores descritos en las figuras para cada una de las tres distribuciones.

En general, el problema que se presenta en la lectura de parámetros, en los diferentes papeles de las distribuciones, es que pueden brindar poca exactitud.

El análisis anterior es para cuando $t - t_0 \geq 0$; es de anotar que cabe la posibilidad de que $t - t_0 < 0$, lo que expresa que t es menor que t_0 ; cuando esto sucede la función de tasa de fallas en Weibull es cero,

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

al igual que la función de densidad de probabilidades o de fallas instantáneas

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^{\beta-1} * \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^{\beta} \right]$$

también adquiere el valor de cero. Por otro lado, $R(t)$ o confiabilidad vale 1, ya que el elemento o máquina para el período entre $0 < t \leq t_0$ es intrínsecamente confiable con una muy baja probabilidad de que entre en falla, una vez t alcanza y supera el valor de t_0 el elemento empieza a tener un comportamiento natural en cuanto a fallas, basado en alguna de las distribuciones enunciadas, acorde con sus características específicas.

CAPÍTULO 7

USO DEL MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL CON MÍNIMOS CUADRADOS PARA ALINEAR LA FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE FALLAS (DE NO CONFIABILIDAD), O DE MANTENIBILIDAD, PARA OBTENER PARÁMETRO

El uso del método gráfico permite realizar, para un conjunto de datos, un ajuste por medio del análisis matemático de regresión lineal con mínimos cuadrados a una línea recta, donde se trata de estimar los parámetros de la pendiente y el intercepto, que minimicen el componente aleatorio de error.

El método requiere que una línea recta se ajuste a un conjunto de datos, de tal manera que la suma de los cuadrados de las distancias de los puntos a la línea de ajuste sea minimizada, tanto en el eje de las abscisas como de las ordenadas.

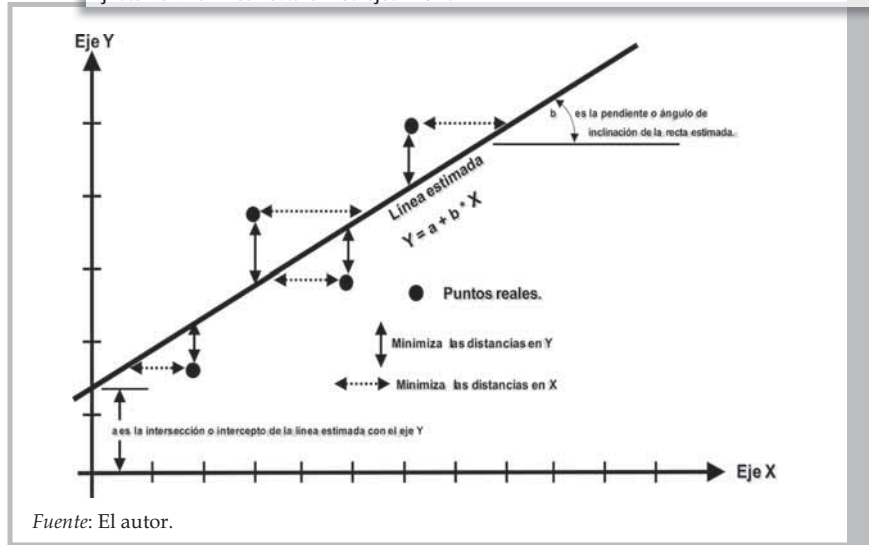
Esta minimización se desarrolla tanto en el eje vertical como en el eje horizontal (Reliasoft®, 2008).



El método gráfico permite realizar un ajuste por medio del análisis de regresión lineal con mínimos cuadrados a una línea recta, donde se trata de estimar los parámetros de la pendiente y el intercepto, que minimicen el componente aleatorio de error.

Ajuste de una línea recta en los ejes X o Y.

GRÁFICO 7.1



ECUACIÓN 7.1 - Análisis de mínimos cuadrados

$$\sum_{j=1}^N (\hat{a} + \hat{b} \cdot x_i - y_i)^2 \quad \min(a,b) \sum_{j=1}^N (a + b \cdot x_i - y_i)^2$$

Donde:

$\hat{a}$ es el intercepto con el eje Y y $\hat{b}$ es la pendiente de la recta estimada, el símbolo $\wedge$ denota valor estimado o calculado,

Y es la variable dependiente y

X es la independiente.

Con j como los diferentes valores de los puntos hasta N número total de puntos por alinear (Reliasoft®, 2008).

ECUACIÓN 7.2 - Definición matemática de la pendiente y del intercepto de la recta alineada estimada

$$b = \frac{\sum_{j=1}^N X_j * Y_j - N * \bar{X} * \bar{Y}}{\sum_{j=1}^N X_j^2 - N * \bar{X}^2}$$

Donde:

b es el valor de la pendiente estimada, con X como los diferentes valores independientes reales, y los valores dependientes reales como Y, j es cada uno de los puntos.

N el número total de puntos.

$\bar{Y}$ es la media o promedio de los $\bar{Y}$ reales originales, y $\bar{X}$ es la media o promedio de los $\bar{X}$ reales del caso.

$a = \bar{Y} - b * \bar{X}$, con a como el intercepto de la recta estimada, y con $\bar{Y}$ y $\bar{X}$ como las medias de los valores $\bar{Y}$ y $\bar{X}$ reales originales (Levin, 1996).

7.1 CRITERIOS DE CALIDAD DE LA ALINEACIÓN

Los criterios que permiten medir la calidad de la alineación que se alcanza son varios; entre los más relevantes se encuentran: el ajuste, el error estándar del estimado, el coeficiente muestral de determinación r^2 y el coeficiente de correlación γ .

7.1.1 Ajuste

Califica el grado de distancias en Y , tanto por encima como por debajo de la recta alineada.



Son varios los criterios que permiten medir la calidad de la alineación que se alcanza: el ajuste, el error estándar del estimado, el coeficiente muestral de determinación y coeficiente de correlación.

► ECUACIÓN 7.3 - Ajuste de la recta alineada

$$Ajuste = \sum |Y_j - \hat{Y}_j| =$$

Debe ser igual o tender a cero; manifiesta el centramiento de la alineación en el eje Y ; muestra si se compensan las diferencias en Y por encima y por debajo de la recta; es un indicador débil de la alineación. $\hat{Y}$ son los valores estimados correspondientes a cada Y .

7.1.2 Error típico o variación o error estándar del estimado

Mide la confianza de la ecuación de estimación y es similar a la desviación estándar, ya que ambos son medidas de dispersión. El error estándar también evalúa la variabilidad o la dispersión de los puntos en Y alrededor de la recta alineada.

► ECUACIÓN 7.4 - Error estándar del estimado de la recta alineada

$$Error\ estándar\ del\ estimado = Confianza\ de\ la\ ecuación\ de\ estimación = S_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N - 2}}$$

Éste debe tender a cero o a ser el valor mínimo posible. En ella $\hat{Y}$ son los valores estimados correspondientes calculados con la nueva ecuación $Y = a + b \cdot X$ para cada uno de los Y reales originales (Levin, 1996).

7.1.3 Coeficiente de determinación muestral r^2 y ajustado

Evalúa la fuerza, la extensión o el grado de asociación que existe entre los puntos correspondientes de las dos variables Y y X . Debe acercarse a uno (1) y se permite como aceptable entre un rango de 0,9025 y 1,0000.

► ECUACIÓN 7.5 - Coeficiente de determinación muestral r^2 de la recta alineada

$$\text{Coeficiente de Determinación muestral} = r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}$$

Donde:

$\hat{Y}$ son los valores estimados correspondiente a cada Y ; $\bar{Y}$ es el valor medio de las Y (Levin, 1996).

Últimamente se usa también otra prueba más fuerte en los procesos de alineación, que se denomina *coeficiente de determinación muestral ajustado*, el cual se estima mediante la expresión:

► ECUACIÓN 7.6 - Coeficiente de determinación muestral r^2 ajustado de la recta alineada

$$\text{Coeficiente de Determinación muestral ajustado} = r^2 \text{ Ajustado} = 1 - \frac{\left\{ \sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2 \right\} * (N-1)}{\left\{ \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2 \right\} * (N-i)}$$

Donde:

N es el número total de eventos, j el evento en particular e i el número de variables correlacionadas; en el caso particular de alineación de $F(t)$ o de $M(t)$ son dos variables, $i = 2$.

Los valores de r^2 ajustado deben estar entre 0,90 y 1,000.

7.1.4 Coeficiente de correlación

Es una medida que evalúa lo bien que el modelo se ajusta en la regresión lineal, e indica la correlación existente entre los datos y el estimador de no confiabilidad o de mantenibilidad; denota el valor de la correlación y el signo informa sobre el sentido inverso o directo de la correlación entre la variables Y y X. Los valores cercanos a uno o menos uno presentan una alta correlación, en tanto que los valores cercanos a cero no tienen correlación alguna con el modelo lineal. Se considera aceptable cuando se está entre 0,95 y 1.

► ECUACIÓN 7.7 - Definición matemática del coeficiente de correlación múltiple

$$\text{Coeficiente de Correlación múltiple} = r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X}) * (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 * \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}}$$

Donde:

γ : coeficiente de correlación,

Y y X: son los valores reales iniciales,

$\bar{Y}$ y $\bar{X}$: medias o promedios de los valores reales originales de t y $F(t)$ o de $M(t)$ (Reliasoft®, 2008).

El método de mínimos cuadrados es muy efectivo para las distribuciones que se dejan alinear; por fortuna, la mayoría de las distribuciones usadas en el análisis de fallas son de este tipo.

Para estas distribuciones los cálculos son relativamente sencillos y poseen una buena bondad de ajuste por medio del factor de correlación (Reliasoft®, 2008).



El método de mínimos cuadrados es muy efectivo para las distribuciones que se dejan alinear; por fortuna, la mayoría de las distribuciones usadas en el análisis de fallas son de este tipo.

CAPÍTULO 8

TRANSFORMACIONES EN WEIBULL, LOGNORMAL Y NORMAL, PARA OBTENER PARÁMETROS POR REGRESIÓN

Los valores de los datos de falla del eje X y los valores de los estimados de la no confiabilidad (o mantenibilidad), en el eje Y, requieren transformaciones para obtener la alineación de la función de distribución deseada.

8.1 DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

La distribución de Weibull responde a los parámetros β y η , que representan, respectivamente, el factor de forma y de escala de la distribución. Estos parámetros se obtienen con la alineación de la distribución de Weibull mediante las transformaciones necesarias; luego de obtener la pendiente y el intercepto de la recta, se calculan los parámetros β y η de la distribución (Reliasoft®, 2008).

► ECUACIÓN 8.1 - Transformación en Weibull para los valores Y y X

$$Y_j = \text{Ln} \left[\text{Ln} \left(\frac{1}{1 - F(t_j)} \right) \right]$$

para el caso de no confiabilidad $F(t_j)$,

$$X_j = \text{Ln}(t_j)$$

y

$$Y_j = \text{Ln} \left[\text{Ln} \left(\frac{1}{1 - M(t_j)} \right) \right]$$

para el caso de Mantenibilidad $M(t)$ con

$$X_j = \text{Ln}(t_j)$$

Los valores t_i (tiempos de falla o de reparación), $F(t_i)$ y $M(t_i)$ son los que se obtienen por el método de estimación i-kaésimo o por cualquiera de los dos métodos de rango de mediana (tabla o Benard). Recuérdese que no se recomienda Kaplan-Meier para cada uno de los puntos de UT o DT , en la correspondiente disponibilidad por utilizar.

Los valores de la pendiente b y de la intersección a de la recta alineada permiten estimar los parámetros de escala Eta y forma Beta, mediante las siguientes expresiones:

$$\text{Parámetro de escala Eta} = \eta = e^{\left[\frac{a}{\text{Beta}} \right]} = e^{\left[\frac{\text{Intersección}}{\text{Pendiente}} \right]}$$

Parámetro de forma Beta $= \beta = b = \text{Pendiente estimada de la recta alineada (Reliasoft@, 2008)}$

8.1.1 Parámetros de vida útil y de reparaciones en Weibull

La vida útil o tiempo medio entre fallas $MTBF$ se puede estimar a partir de:

► ECUACIÓN 8.2 - MTBF Weibull.

$$\text{Esperanza (TBF)} = MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - F(t)) * dt$$

Donde:

$MTBF$ es tiempo medio entre fallas, $R(t)$ es la función de confiabilidad y $F(t)$ es la función de no confiabilidad.

$$MTBF = \eta * \text{Función Gamma} \left(1 + \frac{1}{1 + \text{Beta}} \right)$$

Donde:

Eta es el parámetro de escala y Beta es el de forma, con función Gamma para la estimación.

ECUACIÓN 8.3 - MTTR Weibull

$$\text{Esperanza (TTR)} = \text{MTTR} = \int_0^{\infty} M(t) dt$$

Donde:

M, MTTR es el tiempo medio de reparaciones con $M(t)$ como función de mantenibilidad. Además

$$\text{MTTR} = \eta * \text{Función Gamma} \left(1 + \frac{1}{1 + \beta} \right)$$

Donde:

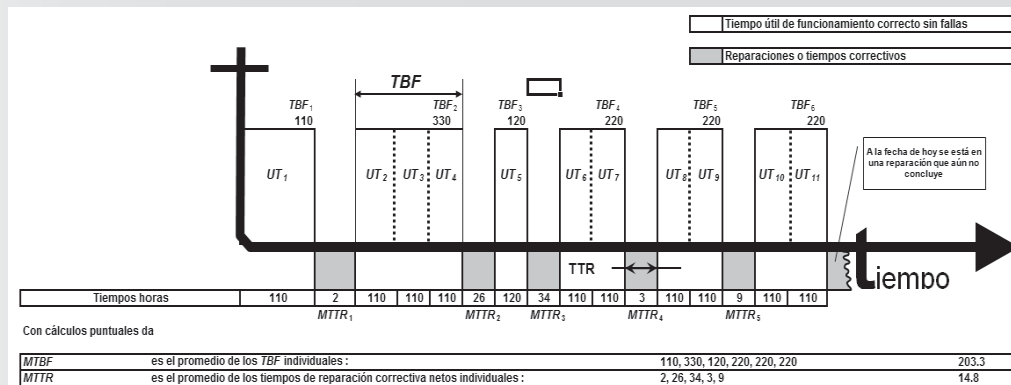
Eta es el parámetro de escala y Beta es el de forma, con función Gamma para la estimación.

La estimación de un parámetro adicional en la distribución de Weibull, el de posición, se debe realizar mediante métodos iterativos, reemplazando el tiempo t , por un tiempo $(t - t_0)$. El parámetro de posición se usa para desplazar la distribución en una u otra dirección; define la localización del origen de la distribución y puede ser tanto positivo como negativo (NS, 2005).

EJEMPLO 8.1

Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de Weibull para A_1

Con el mismo ejemplo que se trae a través del proceso se realizan los cálculos, así:



Método i-kaésimo

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	$F(t) = j / N + 1$
1	110	14.29%
2	120	28.57%
3	220	42.86%
4	220	57.14%
5	220	71.43%
6	330	85.71%
Media		50.00%

No. Dato j	Datos de reparación en horas	$M(t) = j / N + 1$
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
Media		50.00%

Método i-kaésimo con no repetición de UT

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	$F(t) = j / N + 1$
1	110	14.29%
2	120	28.57%
5	220	71.43%
6	330	85.71%
Media		50.00%

No. Dato j	Datos de reparación en horas	$M(t) = j / N + 1$
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
Media		50.00%

No Confiabilidad

$\ln(\ln(1/(1-F(t))))$ - Y de la regresión	Ln de datos - X de la regresión
-1.86982	4.700
-1.08924	4.787
0.22535	5.394
0.66573	5.799

Mantenibilidad

$\ln(\ln(1/(1-M(t))))$ - Y de la regresión	Ln de datos - X de la regresión
-1.70198	0.693
-0.90272	1.099
-0.36651	2.197
0.09405	3.258
0.58320	3.526

Cálculos con método de regresión en Excel

Intersección	-11.742
βeta	2.171
Eta η	223.25
MTBF	197.711

$MTBF = \eta * \text{Gamma } \Gamma (1+ 1/\beta)$

MTBF puntual	203.300

Intersección	-1.8708
βeta	0.6355
Eta η	18.98
MTTR	26.61

$MTTR = \eta * \text{Gamma } \Gamma (1+ 1/\beta)$

MTTR puntual	14.800

Transformaciones

Weibull - No confiabilidad

No Confiabilidad

Pruebas y cálculos de regresión									
j	t _j	F(t _j)	Ln(Ln(1/(1-F(t _j)))) Y de la regresión	Ln de datos - X de la regresión	X _j * Y _j	X _j ²	Y _j ²	X _j - X̄	[X _j - X̄] ²
1	110	14.29%	-1.86982	4.700	-8.7891	22.0945	-1.5368	-0.3331	0.1110
2	120	28.57%	-1.08924	4.787	-5.2147	22.9201	-1.4479	0.2586	0.0669
3	220	71.43%	0.22535	5.394	1.2155	29.0912	-0.0318	0.2572	0.0661
4	330	85.71%	0.66573	5.799	3.6006	33.6295	0.8485	-0.1828	0.0334
Suma					-8.9277	107.7353	-2.0680	0.0000	0.8125
								1.7641	0.0000
								4.1075	0.2774

Se usó valores de tablas de Fisher 2 Regresión a 220

Ȳ	X̄	Ajuste	Ajuste
-0.51700	5.170	0.0000	Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico
$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N - 2}} = 0.3724$			
$r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2} = 0.9325$			
Intercepto $a = \bar{Y} - b * \bar{X} = -11.7422$			

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X}) * (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 * \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9656$$

Weibull - Mantenibilidad

j	t _j	M(t _j)	Ln(Ln(1/(1-M(t _j)))) Y de la regresión	Ln de datos - X de la regresión	X _j * Y _j	X _j ²	Y _j ²	(X _j - X̄)	[X _j - X̄] ²
1	2	16.67%	-1.70188	0.693	-1.1797	0.4805	-1.4548	-0.2472	0.0611
2	3	33.33%	-0.90272	1.099	-0.9917	1.2089	-1.1785	0.2768	0.0761
3	9	50.00%	-0.36651	2.197	-0.8053	4.8278	-0.4298	0.0653	0.0026
4	26	66.67%	0.09405	3.258	0.3064	10.6152	0.2932	-0.1991	0.0397
5	34	83.33%	0.58320	3.526	2.0566	12.4332	0.4760	0.1072	0.0115
Suma					-0.6138	29.5656	-2.2940	0.0000	6.3522
								4.3290	3.1594
								0.2910	0.1923

Ȳ	X̄	Ajuste	Ajuste
-0.45879	2.155	0.0000	Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico
$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N - 2}} = 0.2532$			
$r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2} = 0.9391$			
Intercepto $a = \bar{Y} - b * \bar{X} = -1.9272$			

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X}) * (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 * \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9663$$

Weibull - Estimación de Parámetros

No Confiabilidad

Escala	<i>Parámetro de Escala</i>	$= \eta = e^{\left[-\frac{a}{\beta \ln 2}\right]} = e^{\left[-\frac{\ln 2 \cdot \text{seg} \cdot \text{cien}}{\text{Pendiente}}\right]}$	223.25
Forma	<i>Parámetro de Forma</i>	$\beta = b = \text{Pendiente estimada de la recta alineada}$	2.1712
MTBF =	$\eta * \text{Gamma } \Gamma (1+ 1/\beta) =$		197.71

Mantenibilidad

Escala	<i>Parámetro de Escala</i>	$= \eta = e^{\left[-\frac{a}{\beta \ln 2}\right]} = e^{\left[-\frac{\ln 2 \cdot \text{seg} \cdot \text{cien}}{\text{Pendiente}}\right]}$	16.91
Forma	<i>Parámetro de Forma</i>	$\beta = b = \text{Pendiente estimado de la recta alineada}$	0.6815
MTTR =	$\eta * \text{Gamma } \Gamma (1+ 1/\beta) =$		21.975

Cálculos con método de regresión en excel

Intersección	-11.742
Beta	2.171
Eta η	223.25

MTBF	197.711

$$\text{MTBF} = \eta * \text{Gamma } \Gamma (1+ 1/\beta)$$

MTBF puntual	203.300

Lectura de Allen - Plait o papel Weibull

Beta	2.070
Eta η	230.00

MTBF	203.734

Intersección	-1.9272
Beta	0.6815
Eta η	16.91

MTTR	21.97

$$\text{MTTR} = \eta * \text{Gamma } \Gamma (1+ 1/\beta)$$

MTTR puntual	14.800

Beta	0.7000
Eta η	17.00

MTTR	21.52

Fuente: El autor.

Se observa que el MTBF del cálculo puntual 203,3 es superior al estimado con distribución normal de 197,71 horas, al igual en el MTTR calculado con estimación puntual que da 14,8 horas es diferente al estimado con alineación y luego con distribución de Weibull, con un valor medio esperado en reparación de 21,97 horas.

En general, es más preciso¹ trabajar con distribuciones, ya que existe un solo valor de Beta y Eta para un mismo valor de MTBF. Igual ocurre con el MTTR, en el caso particular, el Beta obtenido en confiabilidad ubica el equipo del ejemplo en la fase III de envejecimiento de Weibull, la cual se debe verificar con la distribución Normal.

Los valores obtenidos en la alineación para no confiabilidad en la distribución de Weibull están dentro de lo permisible, pues su coeficiente de determinación muestral r^2 es de 0,9325 (debe estar entre 0,9025 y 1,00) y coeficiente de correlación r es de 0,9656 (debe ser entre 0,95 y 1,00). En el caso de la mantenibilidad, el coeficiente de determinación muestral r^2 con valor de 0,9391 y el coeficiente de correlación r de 0,9663 cumplen con lo requerido.

1 Recuérdese que existen varias curvas con diferentes Betas y Etas, que tienen los mismos MTBF o MTTR (ver Ejemplo 5.3 - Varias curvas de confiabilidad diferentes para el mismo MTBF, y Ejemplo 5.4 - Varias curvas de mantenibilidad diferentes, para el mismo MTTR.

8.2 DISTRIBUCION NORMAL

Es una distribución discreta que se presenta con frecuencia, cuando la vida útil de los componentes se ve afectada desde un comienzo por el desgaste. Sirve para describir muy bien los fenómenos de envejecimiento de equipos, modelos de fatiga y fenómenos naturales. En esta distribución las fallas tienden a distribuirse de una forma simétrica alrededor de la vida media (Díaz, 1992; Modarres, 1993; Ramakumar, 1996; Ebeling, 2005; O'Connor, 2002; Gnedenko y otros, 1999 y Lewis, 1995).

Dado que la vida de un componente cualquiera no puede tener valores negativos, esta distribución debe modificarse ligeramente para servir de distribución de fallas. Para ello se trunca el recorrido de t , limitándolo al intervalo $(0, +\infty)$ en lugar de $(-\infty, +\infty)$, lo cual implica el uso de un factor de normalización, que aparece en la definición de la distribución normal truncada (Rojas, 1975).

La distribución normal, también conocida como la distribución de Gauss o Laplace, es desarrollada por varios matemáticos, entre ellos Abraham de Moivre y Karl Gauss, en el siglo XVIII; se usa mucho en todos los campos de experimentación y sus valores están tabulados en tablas (Levin, 1996).

El proceso propuesto en el *Gráfico 4.1- Modelo universal e integral*, propuesto para la medición CMD indica que es recomendable usar la estimación de parámetros mediante la distribución normal, cuando la prueba de bondad de ajuste para la distribución de Weibull no es adecuada y el valor estimado de no confiabilidad Beta es superior a 2,05, de tal manera que se usa como segunda opción en la estimación.

La distribución normal responde a los parámetros μ y σ , que representan la media y la desviación estándar de la distribución, respectivamente, los cuales se estiman a partir de los valores de pendiente e intercepto con el eje Y obtenidos de la recta alineada de la distribución normal mediante el uso de transformaciones, así:



Es una distribución discreta que se presenta con frecuencia, cuando la vida útil de los componentes se ve afectada desde un comienzo por el desgaste.

► ECUACIÓN 8.4 - Transformación en Normal para los valores Y y X.

Para no confiabilidad

$$\begin{aligned} Y_j &= \Phi^{-1}[F(t_j)] \\ X_j &= t_j \end{aligned}$$

Donde:

Φ^{-1} es el inverso de la distribución normal estándar, $F(t_j)$ es el estimado de la no confiabilidad y t_j es el tiempo de falla.

Para mantenibilidad

$$\begin{aligned} Y_j &= \phi^{-1} [M(t_j)] \\ X_j &= t_j \end{aligned}$$

con $M(t_j)$ como el estimado de la mantenibilidad y t_j el tiempo de reparación.

Los parámetros de la distribución normal se calculan así:

$$\text{Desviación Estándar} = \sigma = \frac{1}{b} = \frac{1}{\text{Pendiente de la recta alineada}}$$

Media = $\mu = -a * \sigma = -\text{Intercepto} * \text{Desviación Estándar}$, con a como intercepto y b pendiente de la recta obtenida de la alineación (Reliasoft®, 2008; Vallejo y otros, 2004).

8.2.1 Parámetros de vida útil y de reparaciones en Normal

La vida útil o el tiempo medio entre fallas *MTBF* se puede estimar a partir de:

► ECUACIÓN 8.5 - MTBF Normal

$$\text{Esperanza}(TBF) = MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int (1 - F(t)) * dt$$

Donde:

MTBF tiempo medio entre fallas, $R(t)$ es la función de confiabilidad y $F(t)$ es la función de no confiabilidad; con confiabilidad.

$$R(t_j) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_j - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] dt$$

Donde:

$R(t_j)$ es la función de confiabilidad con su media μ y su desviación estándar σ .
Con

$$MTBF = \mu = -a * \sigma = -\text{Intercepto} * \text{Desviación Estándar} \text{ (Knezevic, 1996 y O'Connor, 2002)}$$

► ECUACIÓN 8.6 - MTTR Normal

$$Esperanza(TTR) = MTTR = \int_0^{\infty} M(t) dt$$

Donde:

M, donde MTTR es el tiempo medio de reparaciones con $M(t)$ como función de mantenibilidad, expresada como

$$M(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_j - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt$$

$$MTTR = \mu = -a * \sigma = -Intercepto * Desviación Estándar = -a * \frac{1}{b}$$

con media μ y desviación estándar σ de mantenibilidad. Los valores a y b son el intercepto y la pendiente de la recta alineada (Gnedenko, y otros, 1999).

► ECUACIÓN 8.7 - Funciones de densidad de probabilidad de fallas y de tasa de fallas en Normal

$$f(t_j) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_j - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

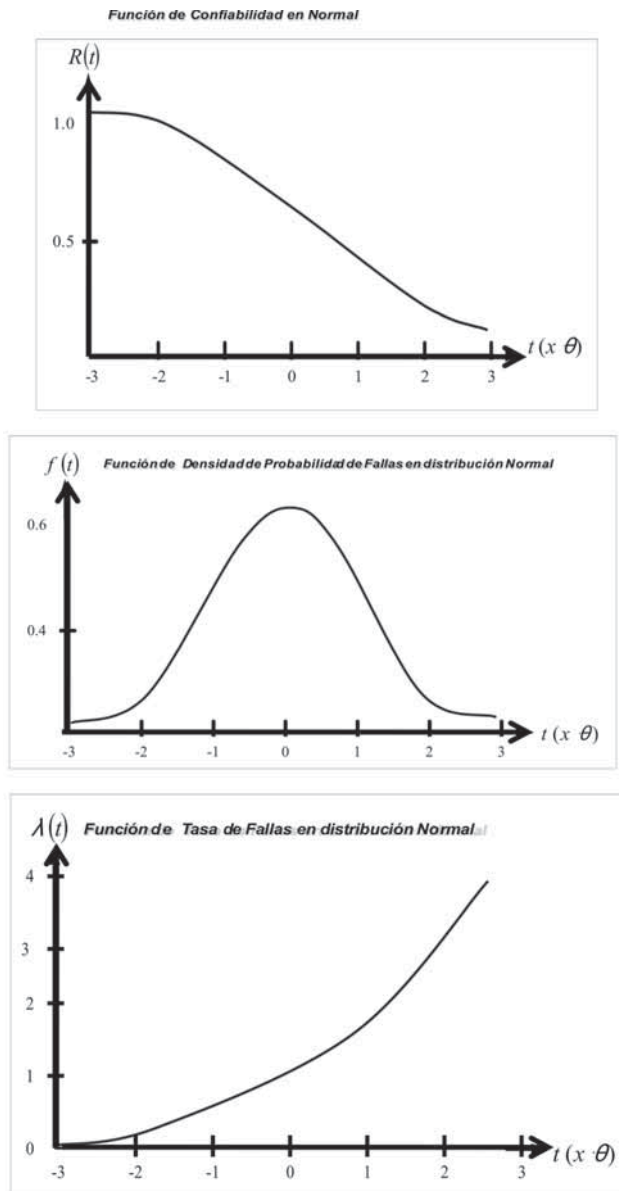
Donde:

$f(t_j)$ es la función de densidad de probabilidad de fallas y

$$\lambda(t_j) = \frac{f(t_j)}{R(t_j)}$$

es la función de tasa de fallas en la distribución normal, con μ y σ ya conocidos (O'Connor, 2002).

Funciones de confiabilidad, de densidad de probabilidad de fallas y de tasa de fallas de la distribución Normal.

GRÁFICO 8.1

Es importante recordar que la función de densidad de probabilidad de fallas es similar en la distribución normal y en la fase final (derecha) de la distribución de Weibull, cuando en ésta el Beta^2 es superior a 2,05 en la etapa 3 de la fase III del *Gráfico 5.5 - Curva de la bañera o de Davies*. También hay similitud en las dos distribuciones en la tasa de fallas, que en ambas es creciente.

A continuación se presenta el mismo ejemplo de disponibilidad inherente que se trae, pero con distribución Normal.

2 En especial cuando el Beta en la distribución de Weibull vale 3 se obtiene una distribución Normal muy pura en su *función de densidad de probabilidad de fallas* (en sentido estricto).

Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de distribución Normal para A₁

EJEMPLO 8.2

Transformaciones

Normal - No confiabilidad

No Confiabilidad

j	t _j	F(t _j)	Y de la regresión $Y_j = \phi^{-1} [F(t_j)]$	X de la regresión	X _j * Y _j	X _j ²	Y _j ²	Y _j - $\bar{Y}$	X _j - $\bar{X}$	(X _j - $\bar{X}$) * (Y _j - $\bar{Y}$)	[X _j - $\bar{X}$] ²	[Y _j - $\bar{Y}$] ²
1	110	14.29%	-1.86757	110.000	-117.4328	12.000	-0.7015	-0.2861	-85.0000	90.7435	-1.0076	1.1397
2	120	26.57%	-0.95995	120.000	-67.9139	14.000	-0.6996	0.1236	-75.0000	42.4462	-0.5659	0.3202
3	220	71.43%	0.66995	220.000	124.5987	48.000	0.2299	0.3361	25.0000	14.1487	0.5659	0.3202
4	330	85.71%	1.08757	330.000	352.2983	1080.00	1.2412	-0.1757	135.0000	-144.1220	1.0876	1.1397
N = 4												
Suma				291.4804	1238.0000	8.0000	0.0000	0.0000	0.0000	291.4804	0.0000	2.9200

Para calcular esta columna se usó la función de distribución Normal ESTAND. (NORM.S.DIST).

Pendiente		$b = \frac{\sum_{j=1}^N X_j * Y_j - N * \bar{X} * \bar{Y}}{\sum_{j=1}^N X_j^2 - N * \bar{X}^2} = \frac{0.0092}{0.0000}$	$Ajuste = \sum_{j=1}^N Y_j - \hat{Y}_j = 0.0000$	Ajuste
Intercepto		$a = \bar{Y} - b * \bar{X} = -1.7929$	$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N - 2}} = 0.3466$	Error Estándar del Estimado o Varianza de Error Tipico
			$r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2} = 0.9177$	Coefficiente de Determinación Minusstral

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X}) * (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 * \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9580$$

Normal - Mantenibilidad

Pruebas y cálculos de regresión

j	t _j	M(t _j)	Y de la regresión $Y_j = \phi^{-1} [M(t_j)]$	X de la regresión	X _j * Y _j	X _j ²	Y _j ²	Y _j - $\bar{Y}$	(X _j - $\bar{X}$)	(X _j - $\bar{X}$) * (Y _j - $\bar{Y}$)	[X _j - $\bar{X}$] ²	[Y _j - $\bar{Y}$] ²
1	2	16.67%	-0.86742	2.000	-1.9348	4.000	-0.6296	-0.3376	-12.8830	12.3830	-0.9674	0.9359
2	3	33.33%	-0.43073	3.000	-1.2922	9.000	-0.6804	0.1497	-11.8600	5.6826	-0.4307	0.1855
3	9	50.00%	0.00000	9.000	0.0000	81.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	26	66.67%	0.43073	26.000	11.1989	676.000	0.5509	-0.1202	11.2000	-0.4307	0.4307	0.1855
5	34	83.33%	0.86742	34.000	32.8923	1156.000	0.9444	0.0230	19.2000	16.5745	0.9674	0.9359
Suma				40.8642	192.0000	0.0000	0.0000	0.0000	40.8642	0.0000	2.2429	0.2329

Para calcular esta columna se usó la función de distribución Normal (NORM.S.INV).

Pendiente		$b = \frac{\sum_{j=1}^N X_j * Y_j - N * \bar{X} * \bar{Y}}{\sum_{j=1}^N X_j^2 - N * \bar{X}^2} = \frac{0.0492}{0.0000}$	$Ajuste = \sum_{j=1}^N Y_j - \hat{Y}_j = 0.0000$	Ajuste
Intercepto		$a = \bar{Y} - b * \bar{X} = -0.7280$	$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N - 2}} = 0.2786$	Error Estándar del Estimado o Varianza de Error Tipico
			$r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2} = 0.8962$	Coefficiente de Determinación Minusstral

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X}) * (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 * \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9467$$

Normal - Estimación de Parámetros				
No Confiabilidad				
Desviación estándar σ	Desviación	Estándar	$= \sigma = \frac{1}{b} = \frac{1}{\text{Pendiente de la recta alineada}} =$	108.763
Media μ	Media	$\mu = -a * \sigma = - \text{Intercepto} * \text{Desviación Estándar} =$		195.000
MTBF	=	$\mu = -a * 1 / b =$		195.000
a es el intercepto				
Mantenibilidad				
Escala	Desviación	Estándar	$= \sigma = \frac{1}{b} = \frac{1}{\text{Pendiente de la recta alineada}} =$	20.3307
Forma	Media	$\mu = -a * \sigma = - \text{Intercepto} * \text{Desviación Estándar} =$		14.8000
MTTR	=	$\mu = -a * 1 / b =$		14.800
a es el intercepto				
$MTBF = \eta * \text{Gamma } \Gamma (1 + 1/\beta)$		$MTTR = \eta * \text{Gamma } \Gamma (1 + 1/\beta)$		
MTBF puntual	203.300	MTTR puntual	14.800	
Lectura de Allen - Plait o papel Weibull				
Beta	2.070	Beta	0.7000	
Eta η	230.00	Eta η	17.00	
MTBF	203.734	MTTR	21.52	

Los valores obtenidos en la alineación para no confiabilidad en distribución Normal están dentro de lo permisible, pues su coeficiente de determinación muestral r^2 es de 0,9177 y el coeficiente de correlación r es de 0,9580. En el caso de la mantenibilidad, el coeficiente de determinación muestral r^2 no cumple tan bien como en el caso anterior pero se acepta con valor de 0,8962, a diferencia del coeficiente de correlación r de valor 0,9467 que sí cumple.

8.3 DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

La distribución LogNormal se genera a partir de los parámetros μ y σ debido a que el logaritmo de una variable aleatoria LogNormal es una variable aleatoria normal con media μ y desviación estándar σ (Barlow, 1998). La distribución, puede tomar varias formas pero siempre con tendencia o cola hacia su derecha (sesgo positivo). La razón para ser menos conocida que la distribución de Weibull consiste en que su función de supervivencia no tiene forma cerrada, lo cual es importante para la estimación de sus parámetros que siempre tienen la tendencia de ser muy altos (Ramakumar, 1996).

Los valores de μ y σ , no son la media y la desviación estándar de la variable aleatoria, sino de su logaritmo. Los tiempos de reparación de componentes se ajustan bien a este modelo de distribución (Ramakumar, 1996). También el estudio de mecanismos de falla revela que frecuentemente se puede observar que la fatiga de materiales sigue una

distribución LogNormal (Gnedenko, y otros, 1999; Vallejo, y otros, 2004). La distribución LogNormal sirve para representar la vida de ciertos componentes electrónicos (Nachlas, 1995).

Para distribución LogNormal se usan los parámetros μ y σ que representan el logaritmo natural de la media y la desviación estándar de la variable aleatoria de la distribución. La obtención de sus parámetros se realiza por medio de la alineación de la distribución LogNormal, con el uso de las transformaciones necesarias de su pendiente y su intercepto (Reliasoft®, 2008).

► ECUACIÓN 8.8 - Transformación en LogNormal para los valores Y y X

Para no confiabilidad

$$\begin{aligned} Y_j &= \phi^{-1} [F(t_j)] \\ X_j &= \ln(t_j) \end{aligned}$$

Donde:

ϕ^{-1} es el inverso de la distribución normal estándar, $F(t_j)$ es el estimado de la no confiabilidad y t_j es el tiempo de falla.

Para mantenibilidad

$$\begin{aligned} Y_j &= \phi^{-1} [M(t_j)] \\ X_j &= \ln(t_j) \end{aligned}$$

Con $M(t_j)$ como el estimado de la mantenibilidad y t_j el tiempo de reparación.

Los parámetros de la distribución normal, se calculan así:

$$\begin{aligned} \text{Desviación Estándar} = \sigma &= \frac{1}{b} = \frac{1}{\text{Pendiente de la recta alineada}} \\ \text{Media} &= -a \cdot \sigma = -\text{Intercepto} \cdot \text{Desviación Estándar}, \end{aligned}$$

con a como intercepto y b pendiente de la recta obtenida de la alineación; la media es también el promedio de los logaritmos naturales de la variable aleatoria (Vallejo, y otros 2004; Reliasoft®, 2008).

Parámetros de vida útil y de reparaciones en LogNormal

La vida útil o tiempo medio entre fallas $MTBF$ se puede estimar a partir de:

► ECUACIÓN 8.9 - MTBF LogNormal

Donde:

MTBF tiempo medio entre fallas (Rojas, 1975).

$$Esperanza(TBF) = MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - F(t)) * dt$$

$R(t)$ es la función de confiabilidad y $F(t)$ es la función de no confiabilidad; con confiabilidad.

Donde:

$R(t)$ es la función de confiabilidad con su media μ y su desviación estándar σ (Ramakumar, 1996).

$$R(t_j) = \int_t^{\infty} \frac{1}{t_j * \sigma * \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln(t_j) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] dt$$

con μ como la media de los logaritmos naturales de la variables aleatoria y σ su desviación estándar.

$$MTBF = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)}$$

► ECUACIÓN 8.10 - MTTR LogNormal

$$Esperanza (TTR) = MTTR = \int_0^{\infty} M(t) dt$$

Donde:

M , donde MTTR tiempo medio de reparaciones con $M(t)$ como función de mantenibilidad, expresada como

$$M(t_j) = \int_t^{\infty} \frac{1}{t_j * \sigma * \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln(t_j) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] dt$$

$$MTTR = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)}$$

con media μ y desviación estándar σ de mantenibilidad.

Los valores a y b son el intercepto y la pendiente de la recta alineada (Gnedenko y otros, 1999).

► ECUACIÓN 8.11 - Funciones de densidad de probabilidad de fallas y de tasa de fallas en LogNormal

$$f(t_j) = \frac{\exp\left[-\frac{(\ln(t_j) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]}{t_j * \sigma * \sqrt{2\pi}}$$

Donde:

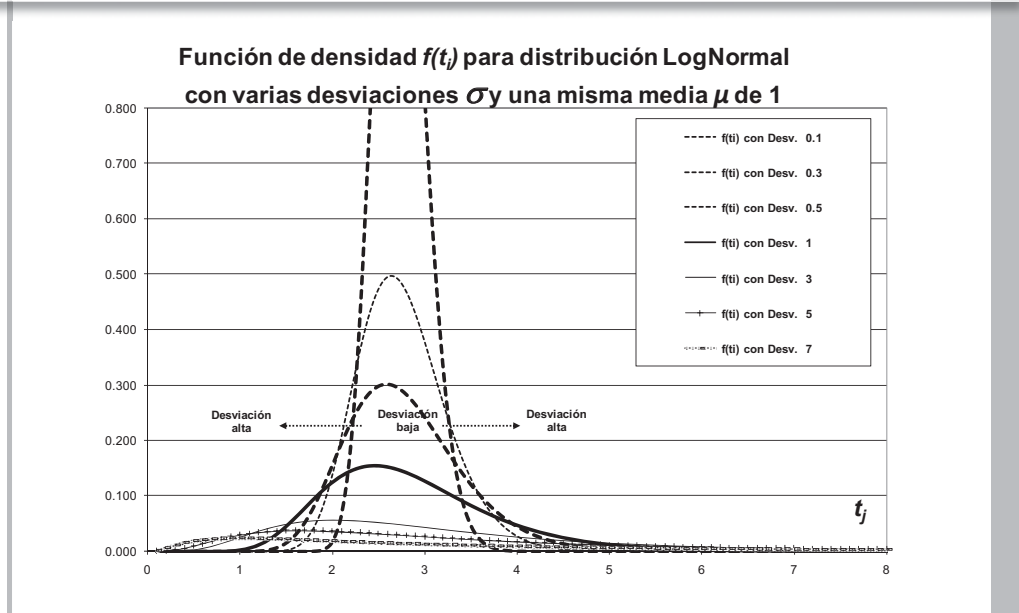
$f(t_j)$ es la función de densidad de probabilidad de fallas, y donde

$$\lambda(t_j) = \frac{f(t_j)}{R(t_j)}$$

es la función de tasa de fallas en la distribución LogNormal, con μ y σ ya conocidos (O'Connor, 2002).

Funciones de confiabilidad, de densidad de probabilidad de fallas y de tasa de fallas de la distribución LogNormal

GRÁFICO 8.2



En la función de tasa de fallas se observa que LogNormal adquiere la misma forma decreciente para desviaciones bajas que la forma decreciente de la función Weibull en la curva de la bañera, en la fase I de mortalidad infantil con valores de Beta entre 0,00 y 0,95.

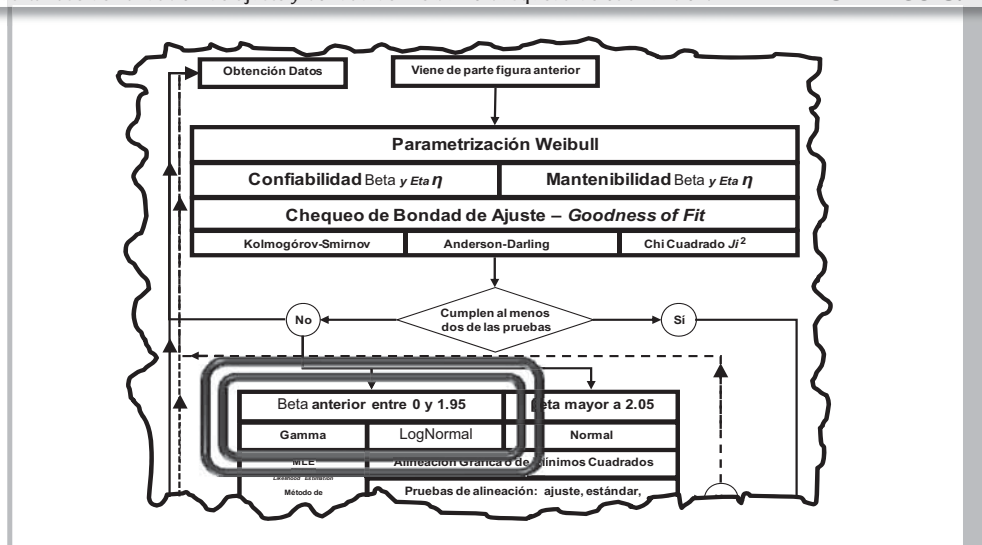
De igual manera, obtiene la función de tasa de fallas en LogNormal para desviaciones medias, una forma cóncava similar a la curva de la etapa 1 de la fase III de Weibull en el *Gráfico 5.5 - Curva de la bañera* o de Davies, para valores de Beta entre 1,05 y 1,95, de tal manera que se usa LogNormal como segunda opción cuando Weibull no cumple con la bondad de ajuste en los rangos descritos de Beta.

LogNormal también sirve cuando Beta de Weibull está entre 0,95 y 1,05 con tasa de fallas constante. Este rango también se usa en la distribución exponencial, pero como ésta es un caso particular de Gamma (Gamma-Exp@, 2005) y, y ésta se explica más adelante, se recomienda sólo usar LogNormal o Gamma cuando Beta de Weibull está entre 0,95 y 1,95.

Además, se debe recordar que la estructura de Weibull es originalmente una exponencial; por lo tanto, con ella no se debe trabajar con distribución exponencial si lo que se busca es una mejor alternativa, pues Weibull no trabaja bien en ese caso en particular que se analiza con Beta entre 0,95 y 1,05. Por lo cual para esta zona sólo se recomienda Gamma⁴ o en su defecto LogNormal.

Cuarta fase de validación de ajuste y bondad de Weibull o búsqueda de otra función.

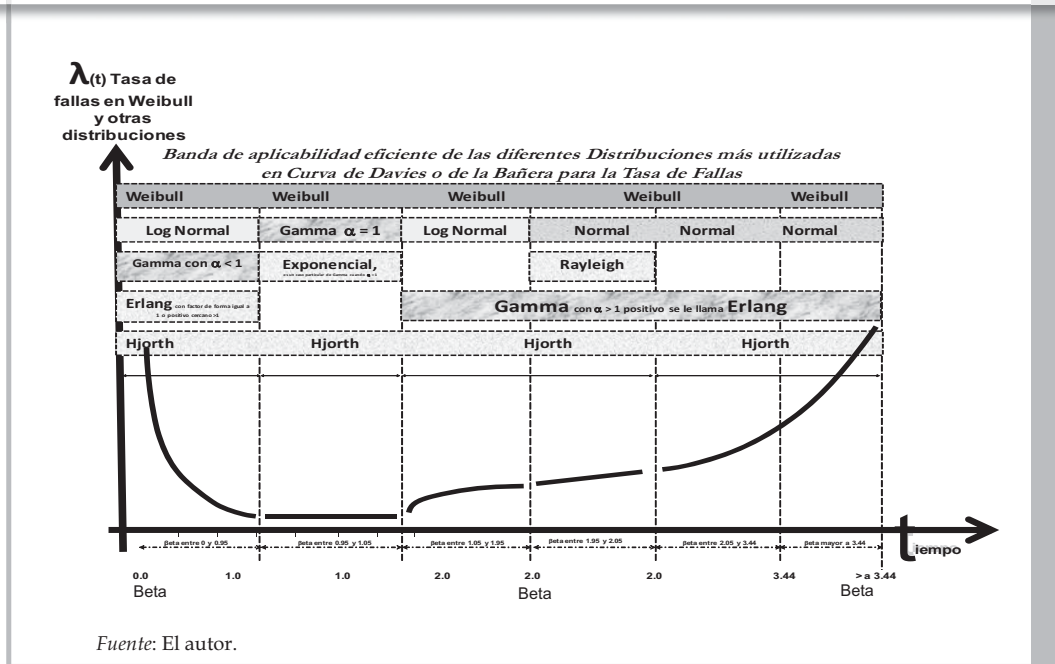
GRÁFICO 8.4



4 Se debe recordar que los cálculos con Gamma no requieren alineación previa.

Zonas comunes del Beta en Weibull (para cálculos de la tasa de fallas y otros parámetros) con otras distribuciones.

GRÁFICO 8.5



Ahora se resuelve el mismo ejercicio que se trae, pero con distribución LogNormal.

Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de distribución LogNormal para A₁

EJEMPLO 8.3

Transformaciones

LogNormal - No confiabilidad

No Confiabilidad

Pruebas y cálculos de regresión

j	t _j	F(t _j)	Y de la regresión $Y_j = \phi^{-1} [F(t_j)]$	X de la regresión = Ln(t _j)	X _j * Y _j	X _j ²	Y _j	Y _j - $\bar{Y}$	X _j - $\bar{X}$	$[X_j - \bar{X}]^2$	$(X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})$	$[Y_j - \bar{Y}]^2$	$[Y_j - \bar{Y}]^3$
1	110	14.29%	-1.06757	4.700	-5.0181	22.1	-0.8763	-0.1913	-0.4687	0.2206	0.5014	-1.0876	1.1397
2	120	28.57%	-0.66595	4.797	-2.7098	22.9	-0.7159	-0.1480	-0.3827	0.1464	0.2166	-0.5659	0.3203
3	220	71.43%	0.95993	5.394	3.0252	28.1	0.4169	0.1481	0.2235	0.0499	0.1265	0.5659	0.3203
4	330	85.71%	1.06757	5.799	6.1809	33.6	1.1733	-0.1058	0.6289	0.3955	0.6714	1.1397	0.0112
N = 4													
Suma					15.159	107.7353	0.0000	0.0000	0.0000	0.8125	1.5159	2.3200	0.0819

Para calcular esta columna se usa la siguiente función

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{j=1}^N Y_j}{N} = \frac{0.0000}{4} = 0.0000$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} = \frac{5.170}{4} = 1.2925$$

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}{N - 2}} = \frac{0.2144}{2} = 0.1072$$

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2} = \frac{0.9685}{1} = 0.9685$$

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = \frac{1.5159}{\sqrt{0.8125 \cdot 2.3200}} = 0.9841$$

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9841$$

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2} = \frac{0.9685}{1} = 0.9685$$

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9841$$

LogNormal - Mantenibilidad

Pruebas y cálculos de regresión

j	t _j	M(t _j)	Y de la regresión $Y_j = \phi^{-1} [M(t_j)]$	X de la regresión = Ln(t _j)	X _j * Y _j	X _j ²	Y _j	Y _j - $\bar{Y}$	(X _j - $\bar{X}$)	$[X_j - \bar{X}]^2$	$(X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})$	$[Y_j - \bar{Y}]^2$	$[Y_j - \bar{Y}]^3$
1	2	16.67%	-0.98742	0.693	-0.6706	0.4805	-0.8447	-0.1228	-1.4615	2.1361	1.4139	-0.9674	0.9359
2	3	33.33%	-0.43073	1.099	-0.4732	1.2069	-0.6103	-0.1796	-1.0561	1.1153	0.6449	-0.4307	0.1855
3	9	50.00%	0.00000	2.197	0.0000	4.8278	0.0246	-0.0246	0.0425	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000
4	26	66.67%	0.43073	3.258	1.4554	10.6152	0.8377	0.2070	1.0334	1.2175	0.4307	0.1855	0.0262
5	34	83.33%	0.98742	3.526	3.4119	12.4352	0.7927	0.1747	1.3717	1.8815	1.2670	0.9359	0.9359
Suma					3.6711	29.5696	0.0000	0.0000	0.0000	6.3222	3.6711	2.2429	0.1213

Para calcular esta columna se usa la siguiente función

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{j=1}^N Y_j}{N} = \frac{0.0000}{5} = 0.0000$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} = \frac{2.155}{5} = 0.4310$$

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}{N - 2}} = \frac{0.2011}{3} = 0.0670$$

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2} = \frac{0.9459}{1} = 0.9459$$

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = \frac{3.6711}{\sqrt{6.3222 \cdot 2.2429}} = 0.9726$$

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9726$$

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2} = \frac{0.9459}{1} = 0.9459$$

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9726$$

LogNormal - Estimación de Parámetros			
No Confiabilidad			
Desviación estándar	$Desviación\ Estándar = \sigma = \frac{1}{b} = \frac{1}{Pendiente\ de\ la\ recta\ alineada} =$		0.53601
Media	$Media = \mu = -a * \sigma = -Intercepto * DesviaciónEstándar =$		5.170
MTBF	$= e^{(\mu + \frac{\sigma^2}{2})} =$		203.126
Mantenibilidad			
Desviación estándar	$Desviación\ Estándar = \sigma = \frac{1}{b} = \frac{1}{Pendiente\ de\ la\ recta\ alineada} =$		1.73035
Media	Recuerde que μ es la media de los Ln de t_i $Media = \mu = -a * \sigma = -Intercepto * DesviaciónEstándar =$		2.1547
MTTR	$= e^{(\mu + \frac{\sigma^2}{2})} =$		38.542
$MTBF = \eta * Gamma\ \Gamma\ (1 + 1/\beta)$		$MTTR = \eta * Gamma\ \Gamma\ (1 + 1/\beta)$	
MTBF puntual	203.300	MTTR puntual	14.800
Lectura de Allen - Plait o papel Weibull			
Beta	2.070	Beta	0.7000
Eta η	230.00	Eta η	17.00
MTBF	203.734	MTTR	21.52

Los valores que se obtienen de alineación tanto en no confiabilidad como en mantenibilidad para LogNormal, del coeficiente de determinación muestral de 0,9685 en no confiabilidad y 0,9489 en mantenibilidad, como del coeficiente de correlación con 0,9841 en no confiabilidad y 0,9726 para mantenibilidad, están dentro de los rangos de aceptación, por lo cual se acepta como válida la alineación de ambas funciones.

Las tres distribuciones hasta ahora descritas utilizan en forma previa la alineación, a diferencia de la distribución Gamma que utiliza el método de máxima verosimilitud para estimar directamente los parámetros.

8.4 DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL

La distribución exponencial es útil cuando el Beta de Weibull alcanza el valor de 1 ± 0.005 y su tasa de fallas tiende a ser constante (esto ocurre en la fase II Weibull, como se instruye en el *Gráfico 5.5 - Curva de la bañera o de Davies*). La distribución exponencial es un caso especial de la distribución Gamma, y es la más común entre las distribuciones de fallas: su importancia radica en el hecho de que casi todos los componentes tienen, durante su período de operación normal, una intensidad de falla constante.

La distribución exponencial es la única que posee una intensidad constante de fallas. La distribución exponencial es muy usada para modelar el tiempo de vida de

componentes electrónicos, y es apropiada cuando un componente usado que aún no falla, es estadísticamente tan bueno como un componente nuevo.

Las distribuciones Gamma y exponencial juegan un papel importante tanto en teoría de colas como en problemas de confiabilidad. El tiempo entre las llegadas en las instalaciones de servicio y el tiempo de falla de los componentes y sistemas eléctricos, frecuentemente, involucran la distribución exponencial. La relación entre la Gamma y la exponencial permite que la distribución Gamma se utilice en tipos similares de problemas (Gamma-Exp@, 2005).

En especial se recomienda usar Gamma o LogNormal cuando el Beta de Weibull está entre 0,95 y 1,05 en sustitución de la distribución exponencial, por ser las primeras más fáciles de manejar.

► ECUACIÓN 8.12 - Función de densidad en distribución exponencial

Cuando la variable aleatoria x tiene una distribución exponencial, con parámetro β , su función de densidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} x^{\frac{-x}{\beta}}$$

Con $x > 0$; $f(x) = 0$ en cualquier otro caso, donde $\beta > 0$.

La media y la variancia de la distribución exponencial son $\mu = \beta$ y $\sigma^2 = \beta^2$ (Gamma-Exp@, 2005).

8.5 DISTRIBUCIÓN GAMMA

Es una distribución de dos parámetros que tienen propiedades similares a los de la distribución de Weibull: el parámetro de escala y el parámetro de forma, que pueden ser ajustados a los datos obtenidos con gran flexibilidad. La distribución exponencial es un caso especial de la distribución Gamma, cuando $\alpha = 1$ (O'Connor, 2002 y Ramakumar, 1996). Cuando Alfa es un entero positivo, a Gamma se le denomina la distribución de Erlang.

La distribución Gamma es muy conveniente para caracterizar los tiempos de fallas de equipos durante períodos de rodaje. Es también muy adecuada para representar sistemas con componentes en *stanby* (Rojas, 1975). Se puede caracterizar mediante las expresiones:

► ECUACIÓN 8.13 - Distribución Gamma

$$R(t) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_t^\infty t^{\alpha-1} \exp[-\lambda t] dt$$

$$\text{Función de Densidad de Gamma} = f(t_j) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} * (t_j)^{\alpha-1} * \exp^{-\lambda t_j}$$

para valores positivos de t_j , en el evento de que t_j sea igual o menor a 0, la función de densidad $f(t_j) = 0$, es igual a cero.

Gamma es una distribución de probabilidad continua con dos parámetros: el de forma denominado Alfa (α) y el de escala llamado Lambda (λ).

Por cada α mayor que cero, la expresión $(t_j)^{\alpha-1} * e^{-\lambda t_j}$ representa una curva positiva e integrable en el rango $(\alpha, +\infty)$.

La integral de la distribución es la función Gamma, así:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{+\infty} (t_j)^{\alpha-1} * e^{-\lambda t_j} * dt_j$$

Las propiedades más relevantes de la distribución Gamma son:

$$\forall \alpha > 1, \text{ se cumple que } \Gamma(\alpha) = (\alpha - 1) * \Gamma(\alpha - 1)$$

$$\Gamma(1) = 1$$

$$\forall n \in \mathbb{N}, \text{ es válido afirmar que } \Gamma(n) = (n - 1)!$$

$$\Gamma\left[\frac{1}{2}\right] = \sqrt{\pi}, \text{ para las condiciones especificadas.}$$

La función de confiabilidad y de tasa de fallas vienen dadas por

$$\text{Función de Confiabilidad Gamma} = R(t_j) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} * \int_{t_j}^{+\infty} (t_j)^{\alpha-1} * e^{-\lambda * t_j} * dt_j$$

$$\text{Función de Tasa de Fallas} = \frac{f(t_j)}{R(t_j)}$$

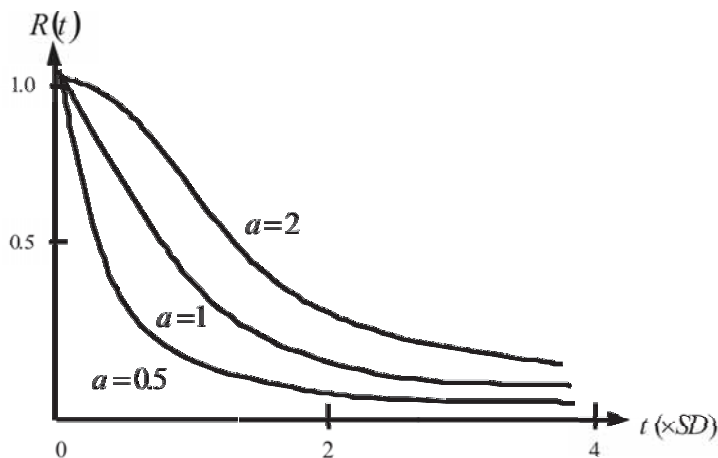
Si t_j es mayor que cero y existen alfa y lambda, se define la esperanza matemática, como,

En no confiabilidad $MTBF = E(t_j) = \frac{\alpha}{\lambda}$, para los valores obtenidos de α y λ con t_j .

En mantenibilidad es similar $MTTR = \frac{\alpha}{\lambda}$ con α y λ correspondientes a t_j (GammArgen@, 2005 y O'Connor, 2002).

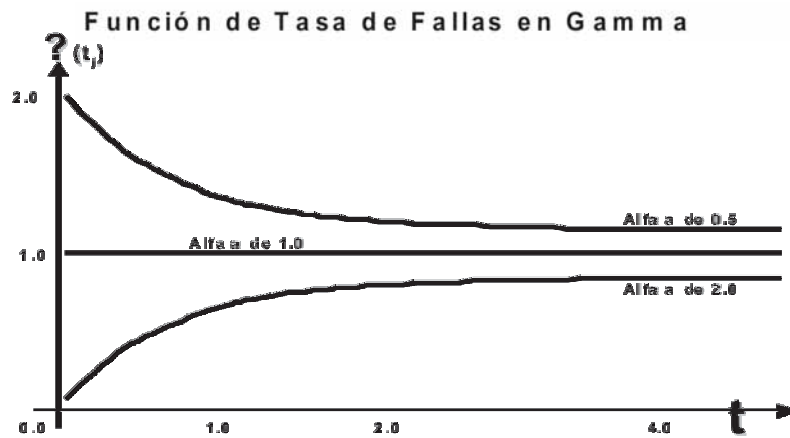
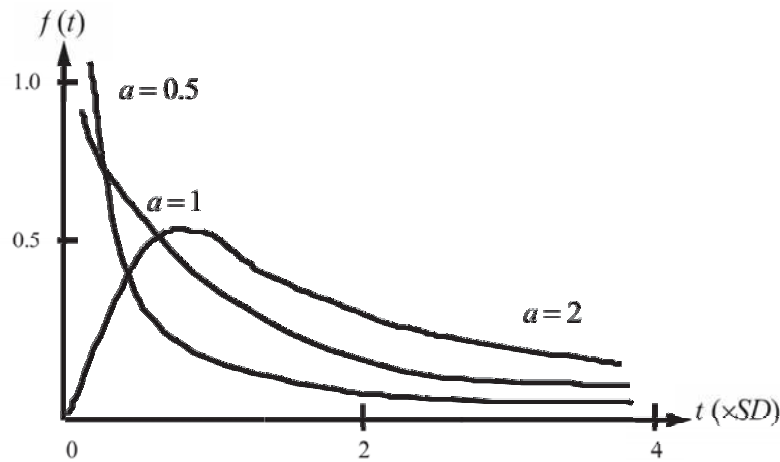
Funciones de confiabilidad, de densidad de probabilidad de fallas y de tasa de fallas de la distribución Gamma.

GRÁFICO 8.6



(Continuación)

GRÁFICO 8.6



Transformaciones y alineación

Normal - No confiabilidad

Pruebas y cálculos de regresión									
j	t _j	F(t _j)	Y de la regresión Y _j = φ ⁻¹ [F(t _j)]	X de la regresión X _j * Y _j	X _j ²	Y _j	Y _j - Ŷ _j	Y _j - X̄	[X _j - X̄] ²
1	110	14.29%	-1.06757	110.000	12100.0	-0.7815	-0.2861	-85.0000	7225.0000
2	120	28.57%	-0.56956	120.000	14400.0	-0.6896	0.1236	-75.0000	5625.0000
3	220	71.43%	0.56956	220.000	48400.0	0.2299	0.3361	25.0000	625.0000
N = 4	330	85.71%	1.06757	330.000	108900.0	1.2412	-0.1737	135.0000	18225.0000
Para calcular esta columna se usó del excel la función DISTR.NORM.ESTAND.INV(F(t))									
Suma				291.4604	18380.0000	0.0000	0.0000	0.0000	31700.0000

Ajuste = ∑ Y _j - Ŷ _j = 0.0000		Ajuste
Pendiente	$b = \frac{\sum_{j=1}^N X_j \cdot Y_j - N \cdot \bar{X} \cdot \bar{Y}}{\sum_{j=1}^N X_j^2 - N \cdot \bar{X}^2} = 0.0092$	Error Estándar del Estimado o Variación o Error Técnico = 0.3466
Intercepto	$a = \bar{Y} - b \cdot \bar{X} = -1.7929$	Coefficiente de Determinación Muestral = 0.9177

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X}) \cdot (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 \cdot \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9580$$

Normal - Mantenibilidad

Pruebas y cálculos de regresión									
j	t _j	M(t _j)	Y de la regresión Y _j = φ ⁻¹ [M(t _j)]	X de la regresión X _j * Y _j	X _j ²	Ŷ _j	Y _j - Ŷ _j	(X _j - X̄)	[X _j - X̄] ²
1	2	16.67%	-0.96742	2.000	4.0000	-0.6296	-0.3378	-12.8000	163.8400
2	3	33.33%	-0.43073	3.000	9.0000	-0.5804	0.1497	-11.8000	139.2400
3	9	50.00%	0.00000	9.000	81.0000	0.2853	0.2853	-5.8000	33.6400
4	26	66.67%	0.43973	26.000	676.0000	0.5809	-0.1202	11.2000	125.4400
N = 5	34	83.33%	0.96742	34.000	1156.0000	0.9444	0.2230	12.2000	368.6400
Para calcular esta columna se usó del excel la función DISTR.NORM.ESTAND.INV(F(t))									
Suma				40.8642	1926.0000	0.0000	0.0000	0.0000	639.8000

Ajuste = ∑ Y _j - Ŷ _j = 0.0000		Ajuste
Pendiente	$b = \frac{\sum_{j=1}^N X_j \cdot Y_j - N \cdot \bar{X} \cdot \bar{Y}}{\sum_{j=1}^N X_j^2 - N \cdot \bar{X}^2} = 0.0492$	Error Estándar del Estimado o Variación o Error Técnico = 0.2786
Intercepto	$a = \bar{Y} - b \cdot \bar{X} = -0.7280$	Coefficiente de Determinación Muestral = 0.8962

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X}) \cdot (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 \cdot \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9467$$

Al hacer la estimación normal de los parámetros, da un MTBF de 195 y un MTTR de 14.8.

Normal - Estimación de Parámetros

No Confiabilidad

Desviación estándar	<i>Desviación Estándar</i>	$= \sigma = \frac{1}{b} = \frac{1}{\text{Pendiente de la recta alineada}}$	108.763
Media	<i>Media</i>	$= \mu = -a * \sigma = -\text{Intercepto} * \text{Desviación Estándar}$	195.000
MTBF	=	$\mu = -a * 1 / b =$	195.000

Mantenibilidad

Escala	<i>Desviación Estándar</i>	$= \sigma = \frac{1}{b} = \frac{1}{\text{Pendiente de la recta alineada}}$	20.3307
Forma	<i>Media</i>	$= \mu = -a * \sigma = -\text{Intercepto} * \text{Desviación Estándar}$	14.8000
MTTR	=	$\mu = -a * 1 / b =$	14.800

$$MTBF = \eta * \text{Gamma } \Gamma(1 + 1/\beta)$$

MTBF puntual	203.300

$$MTTR = \eta * \text{Gamma } \Gamma(1 + 1/\beta)$$

MTTR puntual	14.800

Lectura de Allen - Plait o papel Weibull

Beta	2.070
Eta η	230.00

Beta	0.7000
Eta η	17.00

MTBF	203.734

MTTR	21.52

Para poder compararlo, se trabaja ahora con MLE (sin alineación), para distribución Gamma.

Ayuda en la



Estimación de parámetros para distribución Gamma y método de máxima verosimilitud, MLE

En la Web, ver - Estimación de parámetros para distribución Gamma y método de máxima verosimilitud, MLE.

Para no confiabilidad:

Después de usar la macro con el método *MLE* con múltiples iteraciones y cálculos, entrega los siguientes resultados:

ALFAOMEGA

Para mantenibilidad:

GAMMA Método de Máxima Verosimilitud Coloque acá primero los t_j a parametrizar				Instala Comandos Solver		Parámetro de Forma Alfa α 3.0000	
						Parámetro de Escala Landa λ 26.0000	
						Valor a maximizar (suma de los $\text{Ln}f(t_j)$) -33.6365	
						MTBF 78.0000 MTTR	
						No Confiabilidad Mantenibilidad	
						Ya terminó, gracias por esperar	
Dato No.	t_j	$f(t)$	$\text{Ln}(f(t))$				
1	2	0.00010537	-9.15807				
2	3	0.00022813	-8.38560				
3	9	0.00163006	-6.41914				
4	26	0.00707460	-4.95124				
5	34	0.00889374	-4.72241				
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							

Una vez haya ingresado los tiempos en la columna B, con los valores t_j (máximo 2500 datos), entonces de doble click izquierdo a este recuadro

Si en cualquier momento le aparece uno o dos recuadros para que Ud. tome alguna opción, dé siempre **Aceptar**

Después de usar la macro con el método MLE con múltiples iteraciones y cálculos, entrega los siguientes resultados:

GAMMA Método de Máxima Verosimilitud Coloque acá primero los t_j a parametrizar				Instala Comandos Solver		Parámetro de Forma Alfa α 1.0617	
						Parámetro de Escala Landa λ 13.9401	
						Valor a maximizar (suma de los $\text{Ln}f(t_j)$) 0.0000	
						MTBF 14.8000 MTTR	
						No Confiabilidad Mantenibilidad	
						Ya terminó, gracias por esperar	
Dato No.	t_j	$f(t)$	$\text{Ln}(f(t))$				
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							

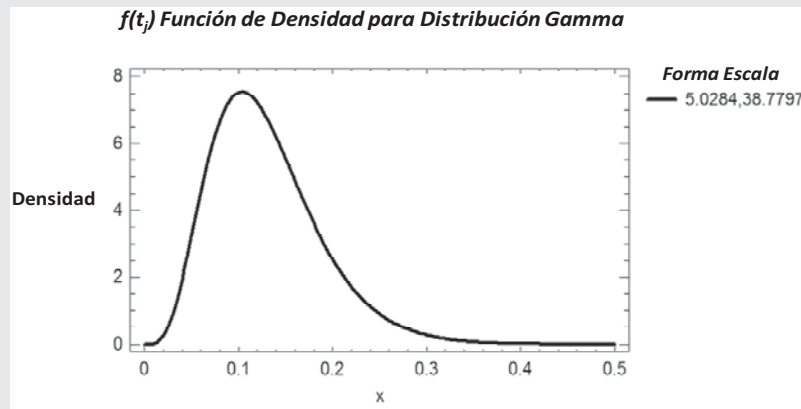
Una vez haya ingresado los tiempos en la columna B, con los valores t_j (máximo 2500 datos), entonces de doble click izquierdo a este recuadro

Si en cualquier momento le aparece uno o dos recuadros para que Ud. tome alguna opción, dé siempre **Aceptar**

Directo con Gamma y MLE, se obtiene un MTBF de 194,98 y un MTTR de 14,8000, frente a 195 y 14,98 del método clásico con alineación y regresión, lo que garantiza excelentes resultados.

Función de densidad $f(t)$ para distribución Gamma⁵

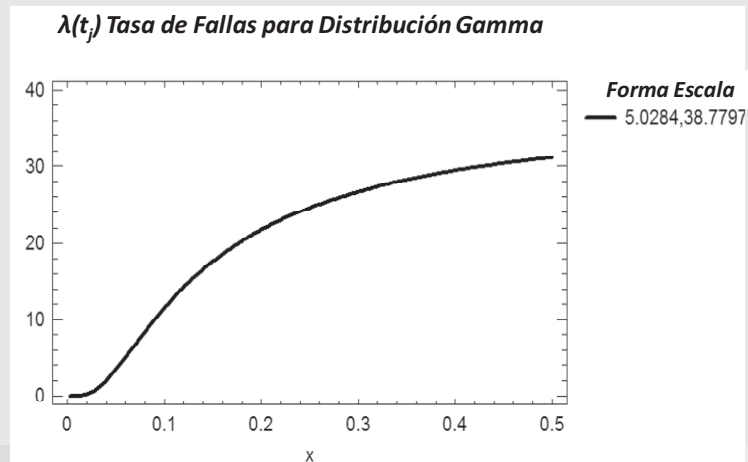
GRÁFICO 8.7



Se observa que con α de Gamma en no confiabilidad superior a 2, su $f(t)$ tiende a parecerse a una distribución normal.

Tasa de Fallas $\lambda(t)$ para distribución Gamma⁶

GRÁFICO 8.8



5 Construida a partir del software *Statgraphics -Versión XV- Centurion*, en las opciones *Tools, Probability Distribution, LogNormal Gráfica Density / Mass Function*.

6 Construida a partir del software *Statgraphics -Versión XV- Centurion*, en las opciones *Tools, Probability Distribution, LogNormal, Gráfica Hazard Function*.

Su tasa de fallas $\lambda(t_f)$ es muy cóncava; todo señala que tiende a la etapa 2 o 3 de la fase III en la curva de la bañera en Weibull, a pesar de que el alfa del Weibull ya calculado 2.17 (véase Ejemplo 8.1 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de Weibull para AI) es superior a 2,05; es decir, no cumple para esta zona de Weibull, como se explica anteriormente.

Parámetro de Forma Alfa (α)	1.0616
Parámetro de Escala Lambda (λ)	13.9412
Valor a maximizar (suma de los $\text{Ln}f(t)$)	0.0000
MTBF	14.8000
MTTR	
Mantenibilidad	

En la mantenibilidad, se observa que con Alfa α de Gamma en mantenibilidad de 1, su función de densidad de reparaciones es decreciente y su tasa de reparaciones $\lambda(t_f)$ es constante; todo señala que tiende a la fase II en la curva de la bañera en Weibull, lo que tampoco coincide con el cálculo con Weibull de Beta de 0,68 de la fase I.

(Ejemplo 8.1 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de Weibull para AI).
Tanto la distribución Gamma como el método de máxima verosimilitud sirven para muestras amplias, completas y sin datos censurados.

CAPÍTULO 9

MÉTODO DE MÁXIMA VEROSIMILITUD - MLE

9.1 MÉTODO DE MÁXIMA VEROSIMILITUD, MLE

Desde el punto de vista estadístico, el método de máxima verosimilitud es el más vigoroso para la estimación de parámetros. Tanto en la distribución Gamma como en este MLE se procede sin alineación previa, y mediante la optimización de funciones con métodos iterativos.

La idea básica de este método es obtener el valor más probable de los parámetros para una distribución dada, a través de la maximización de la función de máxima verosimilitud (L) o la de su logaritmo natural (Λ) aplicada a la función de densidad cuyos parámetros se van a estimar.

► ECUACIÓN 9.1 - Función de máxima verosimilitud

$$L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k | x_1, x_2, \dots, x_R) = L = \prod_{j=1}^R f(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$$
$$\Lambda = \ln(L) = \sum_{j=1}^R \ln[f(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)]$$

Donde:

$f(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$: es la función de densidad de la distribución a la que se le estiman los parámetros.

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$: parámetros por estimar.

X_j : observaciones independientes de los datos de falla (Reliasoft@, 2008).

El método de máxima verosimilitud MLE tiene muchas propiedades que lo hacen atractivo: tiene una forma asintótica consistente, que significa que al aumentar el tamaño de la muestra el valor estimado converge al valor correcto. Es de naturaleza asintótica eficiente, lo que se refleja en que al aumentar el tamaño de la muestra el valor estimado es más preciso; y es de geometría asintótica imparcial; es decir, que al aumentar el tamaño de la muestra se espera conseguir en promedio el valor correcto.



El método de máxima verosimilitud tiene muchas propiedades que lo hacen atractivo: tiene forma asintótica consistente, es de naturaleza asintótica eficiente y es de geometría asintótica imparcial.

Sin embargo, el tamaño de la muestra necesaria para alcanzar tales propiedades requiere un valor considerablemente alto de datos (de entre treinta y cincuenta a más de cien), dependiendo de la aplicación, lo que para valores pequeños causa discrepancias en los análisis (Mora, 2007a y Reliasoft®, 2008).

En la Web, *ver Programa - Estimación de parámetros mediante método de máxima verosimilitud de A_1*

Al realizar los cálculos con el *software* adjunto en la Web: programa para estimar por método de máxima verosimilitud.xls, se obtienen los siguientes parámetros en el ejercicio que se trae de disponibilidad inherente¹:

No confiabilidad

Parámetro de forma Beta (β)	2.3881
Parámetro de escala Eta (η)	221.3674
MTBF	196.2206 horas

Ayuda en la



Estimación de parámetros mediante Método de Máxima Verosimilitud con Weibull de A_1

WEIBULL

Método de Máxima Verosimilitud

Coloque acá primero los t_j a parametrizar

Instala Comandos Solver

Dato No.	t_j	$f(t)$	$\ln(f(t))$
1	110	0.00338537	-5.68829
2	120	0.00365743	-5.61099
3	220	0.00399273	-5.52328
4	330	0.00140201	-6.56985
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			

Parámetro de Forma Beta	2.3880
Parámetro de Escala Eta η	221.3669
Valor a maximizar (suma de los $\ln f(t_j)$)	-23.3924
MTBF	528.6242
No Confiabilidad	MTTR
Ya terminó, gracias por esperar	

Una vez haya ingresado los tiempos en r en la columna B, con los valores t_j (máximo 2500 datos), entonces de doble click izquierdo a este recuadro

Si en cualquier momento le aparece uno o dos recuadros para que Ud. tome alguna opción, dé siempre **Aceptar**

10 En este libro se usa la distribución de Weibull, ya que es concomitante con el modelo propuesto, y además porque cubre bien las tres zonas de la curva de Davies o de tasa de fallas.

Los valores obtenidos por medio de la distribución de Weibull, con alineación de mínimos cuadrados y método *i*-kaésimo (véase Ejemplo 8.1 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de Weibull para A_1) de Beta: 2.1712, Eta: η : 223,25 y MTBF: 197,71 horas son muy similares a los resultados de MLE.

Solución de no confiabilidad en la Web, Programa - Estimación de parámetros mediante Método de Máxima Verosimilitud de A_r .

Ayuda en la



Estimación de
parámetros mediante
Método de Máxima
Verosimilitud de A_1

WEIBULL

Método de Máxima Verosimilitud

Coloque acá primero los t_j a parametrizar

Dato No.	t_j	$f(t)$	$\ln(f(t))$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			

Instala Comandos Solver

Parámetro de Forma Beta	2.3881
Parámetro de Escala Eta η	221.3671
Valor a maximizar (suma de los $\ln f(t_j)$)	0.0000
MTBF 196.2203	MTTR
No Confiabilidad	Mantenibilidad

Ya terminó, gracias por esperar

Una vez haya ingresado los tiempos en r en la columna B, con los valores t_j (máximo 2500 datos), entonces de doble click izquierdo a este recuadro

Si en cualquier momento le aparece uno o dos recuadros para que Ud. tome alguna opción, dé siempre **Aceptar**

Para Mantenibilidad

Parámetro de forma Beta (β)	1,0407
Parámetro de Escala Eta (η)	15,0398
MTTR horas	14,8005

Se observan los valores obtenidos por medio de la distribución de Weibull, con alineación de mínimos cuadrados y método *i*-kaésimo (véase Ejemplo 8.2 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de distribución Normal para A_1) de Beta: 0,6815, Eta: η : 16.91 y MTTR: 21,97 horas difieren a los hallados por MLE. Por lo cual se deben usar varios métodos o sólo usar MLE para grandes tamaños muestrales.

WEIBULL

Método de Máxima Verosimilitud

Coloque acá primero los t_j a parametrizar

Instala Comandos Solver

Dato No.	t_j	$f(t)$	$\ln(f(t))$
1	2	0.05779198	-2.85091
2	3	0.05453980	-2.90882
3	9	0.03726433	-3.28972
4	26	0.01185839	-4.43472
5	34	0.00684293	-4.98454
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			

Parámetro de Forma β

1.0200

Parámetro de Escala η

14.9040

Valor a maximizar (suma de los $\ln f(t_j)$)

-18.4687

MTBF

14.7828

MTTR

No Confiabilidad

Mantenibilidad

Ya terminó, gracias por esperar

Una vez haya ingresado los tiempos en r en la columna B, con los valores t_j (máximo 2500 datos), entonces de doble click izquierdo a este recuadro

Si en cualquier momento le aparece uno o dos recuadros para que Ud. tome alguna opción, dé siempre **Aceptar**

Ayuda en la



Estimación de
parámetros mediante
Método de Máxima
Verosimilitud de A_r

Programa - Estimación de parámetros mediante Método de Máxima Verosimilitud de A_r .

WEIBULL

Método de Máxima Verosimilitud

Coloque acá primero los t_j a parametrizar

Instala Comandos Solver

Dato No.	t_j	$f(t)$	$\ln(f(t))$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			

Parámetro de Forma β

1.0407

Parámetro de Escala η

15.0396

Valor a maximizar (suma de los $\ln f(t_j)$)

0.0000

MTBF

14.8005

MTTR

No Confiabilidad

Mantenibilidad

Ya terminó, gracias por esperar

Una vez haya ingresado los tiempos en r en la columna B, con los valores t_j (máximo 2500 datos), entonces de doble click izquierdo a este recuadro

Si en cualquier momento le aparece uno o dos recuadros para que Ud. tome alguna opción, dé siempre **Aceptar**

Con el fin de poder realizar cualquier cálculo de CMD, de sus parámetros de sus curvas típicas, tanto para No Confiabilidad como para Mantenibilidad, de los valores de Bondad de Ajuste y del Coeficiente de determinación muestral R^2 y de otros aspectos, en la Web se entrega el *Programa - Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste*.

Ayuda en la



Cálculo de CMD,
parámetros,
curvas y bondad
de ajuste

[illegible]

Síntesis comparativa de resultados de MTBF y MTTR con diferentes distribuciones y métodos

GRÁFICO 9.1

		Cálculo puntual	Distribución			MLE
	Resultados		Weibull	Normal	LogNormal	
No confiabilidad	Parámetro 1		2,17	108,76	0,54	2,38
	Parámetro 2		223,25	195,00	5,17	221,36
	MTBF	203,30	197,71	195,00	203,12	196,22
No confiabilidad	Parámetro 1		0,68	20,33	1,73	1,04
	Parámetro 2		16,91	14,80	2,15	15,04
	MTTR	14,80	21,97	14,80	38,54	14,80

Fuente: El autor.

Se aprecian *MTBF* muy similares, mas no así en los *MTTR*, aunque el que predomina es el de 14,80 horas, con las más atípicos de Weibull y LogNormal.

CAPÍTULO 10

PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE - GOODNESS OF FIT

Las pruebas de bondad de ajuste buscan comprobar una hipótesis, según la cual los datos que se observan corresponden a una distribución seleccionada bajo los parámetros estimados; entre otras pruebas para juzgar el ajuste de una muestra, se incluyen los métodos visuales y las pruebas de tendencia (NS@, 2005).

Las investigaciones estadísticas proporcionan una gran cantidad de pruebas que se pueden realizar para determinar si una muestra de datos corresponde a una distribución específica. Entre ellas están la J^2 , la de Kolmogórov, la de Kolmogórov-Smirnov, la de Anderson-Darling, la de Cramer von Mises, la de Watson, la de Kuiper, entre otras (Software Statgraphics).

Para efectos de comprobación en el método CMD propuesto en el *Gráfico 4.1 - Modelo universal e integral*, propuesto para la medición CMD, se realizan J^2 , la de Kolmogórov-Smirnov y la de Anderson-Darling, ya que son bastante comunes y se pueden desarrollar con muchas clases de *software* existentes, a la vez que se complementan unas con otras (Mora, 2007c).

10.1 KOLMOGÓROV-SMIRNOV

La prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov ($K-S^1$) se usa para decidir si una muestra de datos proviene de una población con una distribución específica; la prueba está basada en la función de distribución acumulada empírica (FDAE).



Las pruebas de bondad de ajuste buscan comprobar una hipótesis, según la cual los datos que se observan corresponden a una distribución seleccionada bajo los parámetros estimados.

La prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov se usa para decidir si una muestra de datos proviene de una población con una distribución específica.

1 Abreviatura de la prueba de Kolmogórov-Smirnov.

La prueba K-S es una medida definida como el máximo valor de la diferencia absoluta entre dos funciones de distribución acumulada. Entre sus ventajas se encuentra que no depende de la distribución con la cual es comparada, lo que le da un alto grado de independencia y de exactitud, es decir, tiene una relación estricta respecto al número de datos y no hay que modificarla para que sea válida. Entre sus desventajas están que tiende a ser más sensible cerca al centro de la distribución que hacia los extremos o colas.

► ECUACIÓN 10.1 - Función de distribución acumulada empírica K-S

Función de distribución acumulada empírica K-S

Donde:

$$E_N = \frac{n(j)}{N}$$

E_N : función de distribución acumulada empírica

$n(i)$: número de la posición ordenada del dato

N : número total de datos

La prueba K-S está definida como:

Donde:

H_0 : los datos siguen una distribución especificada

H_a : los datos no siguen la distribución especificada (NS@, 2005 y Rojas, 1975)

► ECUACIÓN 10.2 - Estadístico de la prueba K-S

Donde:

$$D = \max_{1 \leq j \leq N} |F(Y_j) - E_j|$$

$F(Y_j)$: función de distribución acumulada por probar

E_j : función empírica K-S (Mora, 2007a)

La prueba es aceptada cuando el valor D es menor que el valor crítico ($D_{\text{crítico}}$), para el nivel de significancia seleccionado y rechazada en caso contrario. Los valores críticos se encuentran tabulados en:

Valores críticos para el estadístico D de Kolmogórov-Smirnov²

CUADRO 10.1

Tamaño de la muestra - n	Nivel de significancia D = máximo absoluto (Fe-Fo)				
n	0.2	0.15	0.1	0.05	0.01
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.510	0.565	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.577
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
16	0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.210	0.220	0.240	0.270	0.320
30	0.190	0.200	0.220	0.240	0.290
35	0.180	0.190	0.210	0.230	0.270
>35	$1.07 / \sqrt{n}$	$1.14 / \sqrt{n}$	$1.22 / \sqrt{n}$	$1.36 / \sqrt{n}$	$1.63 / \sqrt{n}$

10.2 ANDERSON-DARLING

La prueba de Anderson-Darling (A-D) se usa para probar si una muestra de datos proviene de una población con una distribución específica. Esta prueba es una modificación de la prueba K-S, en la cual se da más peso a los valores extremos o colas.

La prueba A-D usa la distribución específica para calcular los valores críticos, lo cual da la ventaja de hacerla más sensible a la prueba; su desventaja es requerir el cálculo del valor crítico para cada distribución de datos (NS@, 2005). La mayoría de los programas estadísticos ofrecen esta prueba.



La prueba de Anderson-Darling se usa para probar si una muestra de datos proviene de una población con una distribución específica.

² $\sqrt{n}$ denota la raíz cuadrada del tamaño muestral n, para este caso en particular.

► ECUACIÓN 10.3 - Hipótesis de distribución acumulada empírica A-D

Función de distribución acumulada empírica A-D

La prueba A-D está definida como:

H_o : los datos siguen una distribución especificada

H_a : los datos no siguen la distribución especificada (NS, 2005).

► ECUACIÓN 10.4 - Estadístico de la prueba empírica A-D

$$A^2 = -N - \sum_{j=1}^N \frac{(2j-1)}{N} [\ln F(Y_j) + \ln(1 - F(Y_{N+1-j}))]$$

Donde:

N: número total de datos

$F(Y_j)$: función de distribución acumulada por probar

j: número de la posición ordenada del dato (NS@, 2005).

La prueba es aceptada cuando el valor A^2 es menor al valor crítico ($A^2_{\text{crítico}}$) para el nivel de significancia seleccionado y rechazada en caso contrario (Mora, 2007a y NS@, 2005).

Valores críticos en Anderson-Darling.

GRÁFICO 10.1

Valores críticos de A^2 para las distribuciones Normal y LogNormal.

a	0,1	0,05	0,025	0,01
A^2 crít	0,631	0,752	0,873	1,035

Valores críticos de A^2 para las distribuciones exponencial y de Weibull.

a	0,1	0,05	0,025	0,01
A^2 crít	0,637	0,757	0,877	1,038

Para muestras o poblaciones pequeñas, el valor A^2 debe ser modificado a:

► ECUACIÓN 10.5 - Valores críticos modificados en Anderson-Darling

A^2 modificado para las distribuciones Normal y LogNormal (Annis@, 2008).

$$A_m^2 = A^2 \left(1 + \frac{0.75}{N} + \frac{2.25}{N^2} \right)$$

A² modificado para las distribuciones exponencial y de Weibull.

$$A_m^2 = A^2 \left(1 + \frac{0.2}{\sqrt{N}} \right)$$

10.3 Ji² - CHI CUADRADO

La prueba Ji² Chi cuadrado (χ^2)³ se usa para probar si una muestra de datos proviene de una población con distribución específica. La prueba puede ser aplicada a cualquier distribución univariada, a la cual se pueda estimar su función de distribución acumulada. La prueba es alternativa a K-S y a A-D (NS, 2005).

► ECUACIÓN 10.6 - Hipótesis de distribución acumulada empírica Ji²

La prueba Ji² está definida como:

H₀: los datos siguen una distribución especificada

H_a: los datos no siguen la distribución especificada

► ECUACIÓN 10.7 - Estadístico para la prueba Chi cuadrado Ji²

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(O_j - E_j)^2}{E_j}$$

Donde:

k: número de segmentos en los que está dividida la muestra

O_j: frecuencia observada para el segmento j

E_j: frecuencia esperada para el segmento j (NS, 2005).

► ECUACIÓN 10.8 - Cálculo de la frecuencia esperada en Ji²

$$E_j = N(F(Y_u) - F(Y_l))$$



La prueba Chi cuadrado se usa para probar si una muestra de datos proviene de una población con distribución específica.

3 En el documento el símbolo χ^2 se refiere a la prueba Ji al cuadrado.

Donde:

$F(Y)$: función de distribución acumulada por probar

Y_u : límite superior para el segmento j

Y_l : límite inferior para el segmento j

N : tamaño de la muestra (NS, 2005).

La prueba Chi cuadrado Ji^2 se puede aplicar a funciones discretas, como la binomial y la de Poisson.

La prueba es sensible a la determinación del número de segmentos pero no hay una forma óptima de escogerlos. Una manera razonable consiste en hacer la frecuencia esperada de por lo menos cinco datos. Esta prueba no es válida para muestras pequeñas.

El estadístico sigue aproximadamente una distribución X^2 con $(k-c)$ grados de libertad, donde k es el número de segmentos y c es el número estimado de parámetros; por lo tanto, la hipótesis se rechaza, si $\chi^2 > \chi^2_{(\alpha, k-c)}$.

Las diferentes pruebas de bondad de ajuste se pueden realizar con el *software* anexo en la Web - Programa - Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste.

Ayuda en la



Cálculo de CMD,
parámetros,
curvas y bondad
de ajuste

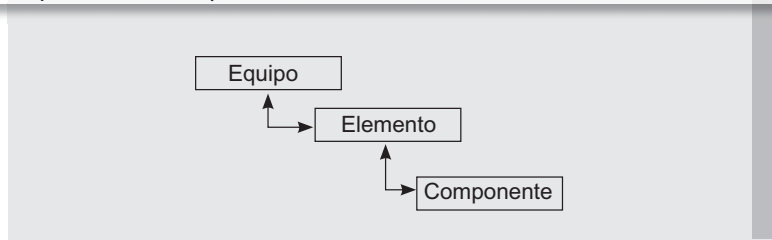
CAPÍTULO 11

ESTIMACIONES DE SISTEMAS O EQUIPOS EN SERIE Y PARALELO

Para el análisis de CMD en plantas grandes y complejas, se debe establecer una jerarquía de partes clasificadas, de acuerdo con sus funciones y con su posibilidad de ser reemplazados (Kelly y otros, 1998):

Jerarquía en sistemas de producción o servicio.

GRÁFICO 11.1



Componente: Es una unidad o partes individuales cuya confiabilidad se estudia independientemente de la de sus partes. Cuando falla un componente se reemplaza y no se repara. Por ejemplo, una bombilla, un interruptor o una resistencia (Forcadás, 1983).

Elemento: Es una parte racional de un equipo. Puede estudiarse por separado y considerarse como un sistema en sí mismo. Por ejemplo, los frenos de un automóvil o el motor (Rojas, 1975).

Equipo: Es una combinación de partes reunidas para obtener un resultado o una misión conjunta. Los componentes de un sistema fallan independientemente unos de otros. Por ejemplo, un automóvil o una red de microondas (Kelly y otros, 1998).



Componente es una unidad o partes individuales cuya confiabilidad se estudia independientemente de la de sus partes.

Elemento es una parte racional de un equipo. Puede estudiarse por separado y considerarse como un sistema en sí mismo. Por ejemplo, los frenos o el motor de un automóvil.

Equipo es una combinación de partes reunidas para obtener un resultado o una misión conjunta. Los componentes de un sistema fallan independientemente unos de otros. Ejemplo, un automóvil o una red de microondas.

En cada uno de estos niveles los equipos pueden estar conectados en serie, en paralelo o redundantes, en *standby*¹, en forma mixta o combinada, entre otros.

11.1 ESTRUCTURA EN SERIE

Es aquella en que todos los componentes deben funcionar adecuadamente para que funcione el sistema. Una falla en uno de los componentes implica la no funcionalidad de todo el sistema (Bajaria, 1983; Forcadas, 1983 y Bazovsky, 2004).

El concepto de un circuito en serie se utiliza para definir una representación gráfica de una estructura en serie.

El sistema en serie no necesariamente tiene que estar físicamente conectado de esta manera; por ejemplo, un sistema con dos componentes en paralelo en el cual para que el sistema funcione correctamente, los dos componentes tienen que funcionar; es un sistema cuyos componentes, desde el punto de vista de la confiabilidad, están conectados en serie.

La confiabilidad de un sistema en serie disminuye (o decrece) si la confiabilidad de cualquiera de sus componentes disminuye (o decrece); y aumenta (o crece) si el número de componentes crece (Gnedenko y otros, 1999).

ECUACIÓN 11.1 - Confiabilidad de un sistema en serie

$$R_s = R(x_1) \cdot R(x_2) \cdot \dots \cdot R(x_n)$$

$$R_s = \prod_{j=1}^N R(x_j) \equiv \prod_{j=1}^N R_j$$

Donde:

R_s : la confiabilidad del sistema

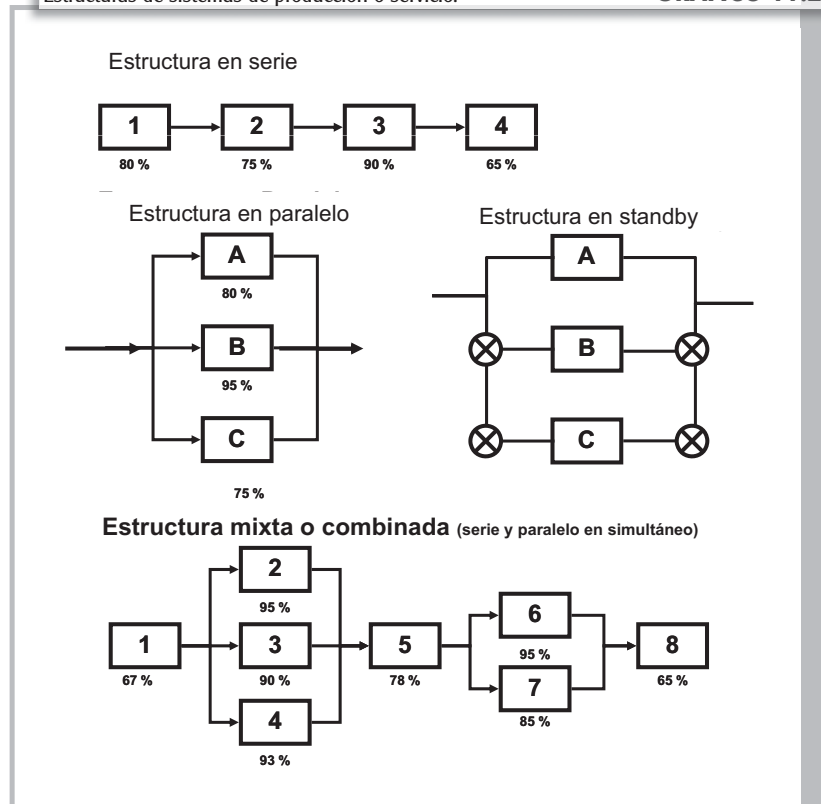
$R(x_j)$: la confiabilidad del componente x_j (Gnedenko y otros, 1999)

En la práctica se demuestra que la dependencia de los componentes afecta sólo ligeramente la confiabilidad de un sistema en serie; sin embargo, la confiabilidad de estos sistemas es siempre menor que la del menos confiable de sus componentes (Gnedenko y otros, 1999 y Ramakumar, 1996).

1 *Stand-by* estructura con respaldo o reserva.

Estructuras de sistemas de producción o servicio.

GRÁFICO 11.2



La confiabilidad de un sistema en serie disminuye (o decrece) si la confiabilidad de cualquiera de sus componentes disminuye (o decrece); y aumenta (o crece) si el número de componentes crece.

La práctica demuestra que la dependencia de los componentes afecta sólo ligeramente la confiabilidad de un sistema en serie; sin embargo, la confiabilidad de estos sistemas es siempre menor que la del menos confiable de sus componentes.

Si se desea conocer la confiabilidad total del sistema denominado como estructura en serie que se describe en el *Gráfico 11.2*, en la cual cada elemento tiene su confiabilidad en la parte inferior, se estima de la siguiente manera:

Cálculos de estructuras en serie

EJEMPLO 11.1

La confiabilidad de cada uno de los elementos en serie dada en el *Gráfico 11.2* son: $R(x_1) = 80\%$, $R(x_2) = 75\%$, $R(x_3) = 90\%$ y $R(x_4) = 65\%$; donde la confiabilidad de todo el sistema está dada por:

$R_s = R(x_1) * R(x_2) * R(x_3) * R(x_4) = 0,80 * 0,75 * 0,90 * 0,65 = 0,351 = 35,10\%$, para una confiabilidad total del sistema de 35,10%.

11.2 ESTRUCTURA EN PARALELO O REDUNDANTE ACTIVA

Es aquella en que el funcionamiento de k , de los n componentes, implica el de todo el sistema.

Un ejemplo es el conjunto de dos motores en un avión bimotor: mientras que funciona uno de los motores, el vuelo aún se mantiene (Bazovsky, 2004 y Nachlas, 1995).



Las estructura en paralelo o redundantes sólo fallan si todos los componentes del sistema dejan de funcionar.

Las estructuras en paralelo o redundantes sólo fallan si todos los componentes del sistema dejan de funcionar. Las fallas de uno o más componentes redundantes, normalmente no se detectan y se rectifican, a menos que haya inspecciones periódicas o mantenimientos preventivos.

Es obvio que el *MTBF* del sistema se incrementa cuando se aumentan las frecuencias de inspección. Sin revisiones, el *MTBF* se mantiene en el valor calculado para el sistema paralelo. Con inspecciones apropiadas y mantenimientos planeados, el *MTBF* se puede incrementar notoriamente. En contraste, si el mantenimiento no es apropiado, es posible que el *MTBF* sea menor que el valor estimado para el sistema en paralelo (Ramakumar, 1996).

► ECUACIÓN 11.2 - Confiabilidad de un sistema de estructura en paralelo con redundancia activa (Díaz, 1992)

$$R_s = 1 - [F(\bar{x}_1) * F(\bar{x}_2) \dots F(\bar{x}_n)]$$

$$R_s = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - R(x_j)) \equiv 1 - \prod_{j=1}^N F_j$$

Donde:

R_s es la confiabilidad de todo el sistema

F_j es la no confiabilidad del componente x

$R(x_j)$ es la confiabilidad dada o calculada del componente j

Otra forma de plantear el resultado es

$$R_s = \sum_{j=1}^N R_j - \prod_{j=1}^N R_j$$

Cálculos de estructuras en paralelo o redundancia activa²

EJEMPLO 11.2

La confiabilidad de cada uno de los tres elementos (dispuestos en paralelo) dada en el *Gráfico 11.2* - Estructuras de sistemas de producción o servicio, son: $P(A) = 80\%$, $P(B) = 95\%$ y $P(C) = 75\%$, donde la confiabilidad de todo el sistema está dada por:

$$\begin{aligned} R_s &= 1 - \{ (1 - R(A)) * (1 - R(B)) * (1 - R(C)) \} = \\ &= (1 - \{ (1 - 0.80) * (1 - 0.95) * (1 - 0.75) \}) = \\ R_s &= (1 - 0.2 * 0.05 * 0.25) = 0.9975 = 99.75\% \end{aligned}$$

Si por alguna razón se aumenta la confiabilidad del elemento A a 90%, sucede que:

$$\begin{aligned} R_s &= 1 - \{ (1 - R(A)) * (1 - R(B)) * (1 - R(C)) \} = \\ &= (1 - \{ (1 - 0.90) * (1 - 0.95) * (1 - 0.75) \}) = \\ R_s &= (1 - 0.1 * 0.05 * 0.25) = 0.99875 = 99.875\% \end{aligned}$$

Por lo cual se puede deducir que si uno de los componentes aumenta (crece) su confiabilidad esto a su vez incrementa (aumenta) la del sistema.

11.3 ESTRUCTURA EN STANDBY

Una estructura en *standby* o con respaldo es aquella donde existe una unidad principal respaldada por n unidades de reserva. En esta estructura sólo trabaja una unidad a la vez, y si uno de los componentes falla, su función es reemplazada por otro componente en reserva, para lo cual es necesario tener un mecanismo detector que transfiera el control en el momento de la falla (Ramakumar, 1996; Bazovsky, 2004 y Mora, 2007a).

11.4 ESTRUCTURA MIXTA

Una estructura mixta es la combinación de dos o más tipos de estructuras elementales, que está presente en la mayoría de los equipos. Para su estudio es necesario realizar equivalencias entre sus componentes, como en el caso de los circuitos eléctricos (Rojas, 1975 y Forcadás, 1983).



Una estructura en *stand-by* es aquella donde existe una unidad principal respaldada por n unidades de reserva. Aquí sólo trabaja una unidad a la vez, y si uno de los componentes falla su función es reemplazada por otro componente en reserva.

2 Se denomina redundancia activa cuando todos los componentes paralelos operan en forma simultáneo.

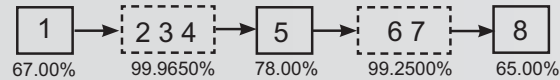
EJEMPLO 11.3

Cálculos de estructura mixta

La confiabilidad de cada uno de los elementos (dispuestos en estructura mixta) es dada en el *Gráfico 11.2* - Estructuras de sistemas de producción o servicio. Para resolver el sistema se deben solucionar primero las dos partes en paralelo (2-3-4 y 6-7); una vez halladas sus confiabilidades se asume el nuevo sistema con una estructura en serie compuesta por los elementos: 1-2,3,4-5-6,7-8, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 R_{s_{234}} &= 1 - \{ (1 - R(x_2)) * (1 - R(x_3)) * (1 - R(x_4)) \} = \\
 &= 1 - \{ (1 - 0.95) * (1 - 0.90) * (1 - 0.93) \} = \\
 R_{s_{234}} &= (1 - 0.05 * 0.10 * 0.07) = 0.99965 = 99.9650\%
 \end{aligned}$$

Y ahora el otro sistema en paralelo



$$\begin{aligned}
 R_{s_{67}} &= 1 - \{ (1 - R(x_6)) * (1 - R(x_7)) \} = \\
 &= 1 - \{ (1 - 0.95) * (1 - 0.85) \} = \\
 R_s &= (1 - 0.05 * 0.15) = 0.9925 = 99.25\%
 \end{aligned}$$

Con lo cual el sistema equivalente queda así (de tal forma que ahora se resuelve el sistema como una estructura en serie):

$$\begin{aligned}
 R_{s_{1-234-5-678}} &= R(x_1) * R(x_{234}) * R(x_5) * R(x_{67}) * P(x_8) = \\
 &= 0.67 * 0.99965 * 0.78 * 0.9925 * 0.65 = 0.351 = 33.70\%
 \end{aligned}$$

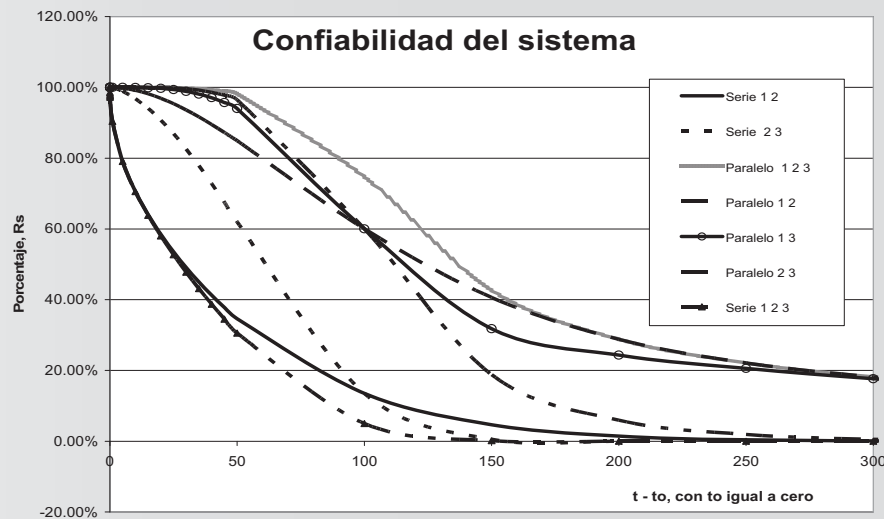
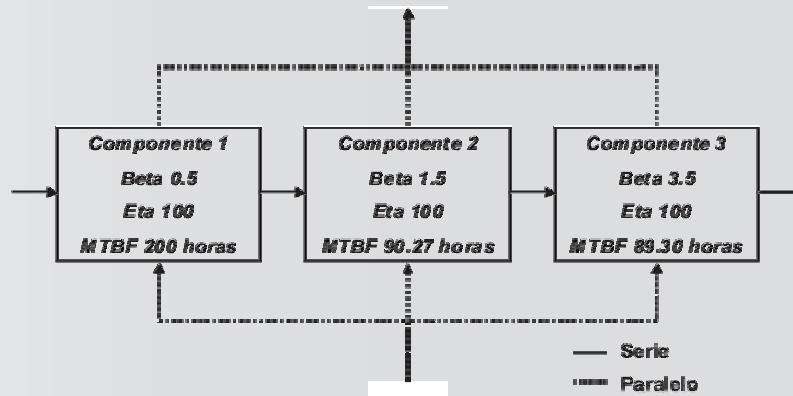
De donde la confiabilidad total del sistema es 33,70%.

En el evento de que no se cuente con los valores de la confiabilidad (o mantenibilidad) en porcentajes, se recurre a la construcción de las curvas de función de densidad $f(t)$, función de no confiabilidad $F(t)$, función de confiabilidad $R(t)$ y de tasa de fallas $\lambda(t)$, luego se ubican los valores de $R(t)$ para el respectivo t solicitado y de esta forma se leen los diferentes valores y se puede estimar de forma puntual.

Cálculo de confiabilidad R_s , de tres elementos dispuestos en serie y paralelo con parámetros Beta, Eta y MTBF

Si se dispone de un sistema con tres componentes organizados en serie y en paralelo de diversas formas, y se desea obtener su confiabilidad en cada combinación para un determinado valor de tiempo $t_j - t_o$, se procede de la siguiente forma:

EJEMPLO 11.4



En todos los tiempos se observa que la combinación paralela 1, 2, 3, da las mejores confiabilidades (las más altas), como también que las más bajas son las de la serie 1, 2, 3.

Para el cálculo de serie se usa $R_s = R_1 * R_2 * \dots * R_n$ y para paralelo $R_s = 1 - (1 - P_1) * (1 - P_2) * (1 - \dots) * (1 - P_n)$. Por ejemplo, para un tiempo de $t - t_o$ igual a cien (100) horas se tiene una confiabilidad del sistema en paralelo 1, 2, 3 del 74,74% y en la estructura serie 1, 3 se obtiene una R_s total del sistema del 13,53%.

Los cálculos de cada componente y de los sistemas se expresan así:

Weibull		Componente 1					Componente 2					Componente 3				
		0.50					1.50					3.00				
		100					100					100				
Factor de Forma beta																
Factor de Escala Eta																
η																
MTBF (horas)		200					90.27					89.30				
j	t _j - t ₀	Función de densidad de probabilidad de falla f(t)	Función acumulada de falla o de No Confiabilidad F(t)	Función de Confiabilidad R(t)	Función de Tasa de Falla Lambda(t) = λ(t)	Función de densidad de probabilidad de falla f(t)	Función acumulada de falla o de No Confiabilidad F(t)	Función de Confiabilidad R(t)	Función de Tasa de Falla Lambda(t) = λ(t)	Función de densidad de probabilidad de falla f(t)	Función acumulada de falla o de No Confiabilidad F(t)	Función de Confiabilidad R(t)	Función de Tasa de Falla Lambda(t) = λ(t)			
1	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%			
2	0.02	34.86%	1.40%	98.60%	35.36%	0.02%	0.00%	100.00%	0.02%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%			
3	0.04	24.50%	1.98%	98.02%	25.00%	0.03%	0.00%	100.00%	0.03%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%			
4	0.06	19.92%	2.42%	97.58%	20.41%	0.04%	0.00%	100.00%	0.04%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%			
5	0.08	17.18%	2.79%	97.21%	17.68%	0.04%	0.00%	100.00%	0.04%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%			
6	1.00	4.52%	9.52%	90.48%	5.00%	0.15%	0.10%	99.90%	0.15%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%			
7	5.00	1.79%	20.04%	79.96%	2.24%	0.33%	1.11%	98.89%	0.34%	0.03%	0.01%	99.99%	0.01%			
8	10.00	1.15%	27.11%	72.89%	1.58%	0.46%	3.11%	96.89%	0.47%	0.03%	0.10%	99.90%	0.03%			
9	15.00	0.88%	32.11%	67.89%	1.29%	0.55%	5.64%	94.36%	0.58%	0.07%	0.34%	99.66%	0.07%			
10	20.00	0.71%	36.06%	63.94%	1.12%	0.61%	8.36%	91.44%	0.67%	0.12%	0.80%	99.20%	0.12%			
11	25.00	0.61%	39.35%	60.65%	1.00%	0.66%	11.75%	88.25%	0.75%	0.18%	1.55%	98.45%	0.19%			
12	30.00	0.53%	42.17%	57.83%	0.91%	0.70%	15.15%	84.85%	0.82%	0.26%	2.66%	97.34%	0.27%			
13	35.00	0.47%	44.66%	55.34%	0.85%	0.72%	18.70%	81.30%	0.89%	0.35%	4.20%	95.80%	0.37%			
14	40.00	0.42%	46.87%	53.13%	0.79%	0.74%	22.35%	77.65%	0.95%	0.45%	6.20%	93.80%	0.48%			
15	45.00	0.38%	48.87%	51.13%	0.75%	0.74%	26.06%	73.94%	1.01%	0.55%	8.71%	91.29%	0.61%			
16	50.00	0.35%	50.69%	49.31%	0.71%	0.74%	29.78%	70.22%	1.06%	0.66%	11.75%	88.25%	0.75%			
17	100.00	0.18%	63.21%	36.79%	0.50%	0.55%	63.21%	36.79%	1.50%	1.10%	63.21%	36.79%	3.00%			
18	150.00	0.12%	70.62%	29.38%	0.41%	0.29%	84.07%	15.93%	1.84%	0.23%	96.59%	3.42%	67.5%			
19	200.00	0.09%	75.69%	24.31%	0.35%	0.13%	94.09%	5.91%	2.12%	0.00%	99.97%	0.03%	12.00%			
20	250.00	0.07%	79.43%	20.57%	0.32%	0.05%	98.08%	1.92%	2.37%	0.00%	100.00%	0.00%	18.75%			
21	300.00	0.05%	82.31%	17.69%	0.29%	0.01%	99.45%	0.55%	2.60%	0.00%	100.00%	0.00%	27.00%			
22	350.00	0.04%	84.60%	15.40%	0.27%	0.00%	99.86%	0.14%	2.81%	0.00%	100.00%	0.00%				
23	400.00	0.03%	86.47%	13.53%	0.25%	0.00%	99.97%	0.03%	3.00%	0.00%	100.00%	0.00%				
24	450.00	0.03%	88.01%	11.99%	0.24%	0.00%	99.99%	0.01%	3.18%	0.00%	100.00%	0.00%				
25	500.00	0.02%	89.31%	10.69%	0.22%	0.00%	100.00%	0.00%	3.35%	0.00%	100.00%	0.00%				
26	550.00	0.02%	90.42%	9.58%	0.21%	0.00%	100.00%	0.00%	3.52%	0.00%	100.00%	0.00%				
27	600.00	0.02%	91.37%	8.63%	0.20%	0.00%	100.00%	0.00%	3.67%	0.00%	100.00%	0.00%				
28	650.00	0.02%	92.19%	7.81%	0.20%	0.00%	100.00%	0.00%	3.82%	0.00%	100.00%	0.00%				
29	700.00	0.01%	92.90%	7.10%	0.19%	0.00%	100.00%	0.00%	3.97%	0.00%	100.00%	0.00%				
30	750.00	0.01%	93.53%	6.47%	0.18%	0.00%	100.00%	0.00%	4.11%	0.00%	100.00%	0.00%				
31	800.00	0.01%	94.09%	5.91%	0.18%	0.00%	100.00%	0.00%	4.24%	0.00%	100.00%	0.00%				
32	850.00	0.01%	94.58%	5.42%	0.17%	0.00%	100.00%	0.00%	4.37%	0.00%	100.00%	0.00%				
33	900.00	0.01%	95.02%	4.98%	0.17%	0.00%	100.00%	0.00%	4.50%	0.00%	100.00%	0.00%				
34	950.00	0.01%	95.41%	4.59%	0.16%	0.00%	100.00%	0.00%	4.62%	0.00%	100.00%	0.00%				
35	1000.00	0.01%	95.77%	4.23%	0.16%	0.00%	100.00%	0.00%	4.75%	0.00%	100.00%	0.00%				

Confiabilidad del sistema - R_s									
j	$t_j - t_o$	Serie 1 2 3	Serie 1 2	Serie 1 3	Serie 2 3	Paralelo 1 2 3	Paralelo 1 2	Paralelo 1 3	Paralelo 2 3
1	0.00	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
2	0.02	98.60%	98.60%	98.60%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
3	0.04	98.02%	98.02%	98.02%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
4	0.06	97.58%	97.58%	97.58%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
5	0.08	97.21%	97.21%	97.21%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
6	1.00	90.39%	90.39%	90.48%	99.90%	100.00%	99.99%	100.00%	100.00%
7	5.00	79.06%	79.07%	79.95%	98.88%	100.00%	99.78%	100.00%	100.00%
8	10.00	70.55%	70.62%	72.82%	96.79%	100.00%	99.16%	99.97%	100.00%
9	15.00	63.84%	64.06%	67.66%	94.04%	99.99%	98.19%	99.89%	99.98%
10	20.00	58.00%	58.47%	63.43%	90.72%	99.98%	96.91%	99.71%	99.93%
11	25.00	52.70%	53.53%	59.71%	86.88%	99.93%	95.38%	99.39%	99.82%
12	30.00	47.76%	49.06%	56.29%	82.59%	99.83%	93.61%	98.88%	99.60%
13	35.00	43.10%	44.99%	53.02%	77.88%	99.65%	91.65%	98.13%	99.22%
14	40.00	38.70%	41.25%	49.83%	72.83%	99.35%	89.52%	97.09%	98.61%
15	45.00	34.51%	37.81%	46.68%	67.50%	98.89%	87.27%	95.74%	97.73%
16	50.00	30.55%	34.62%	43.51%	61.97%	98.23%	84.90%	94.04%	96.50%
17	100.00	4.98%	13.53%	13.53%	13.53%	74.74%	60.04%	60.04%	60.04%
18	150.00	0.16%	4.68%	1.01%	0.55%	42.66%	40.63%	31.80%	18.80%
19	200.00	0.00%	1.44%	0.01%	0.00%	28.81%	28.79%	24.34%	5.94%
20	250.00	0.00%	0.40%	0.00%	0.00%	22.10%	22.10%	20.57%	1.92%
21	300.00	0.00%	0.10%	0.00%	0.00%	18.15%	18.15%	17.69%	0.55%
22	350.00	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	15.52%	15.52%	15.40%	0.14%
23	400.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	13.56%	13.56%	13.53%	0.03%
24	450.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	11.99%	11.99%	11.99%	0.01%
25	500.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	10.69%	10.69%	10.69%	0.00%
26	550.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	9.58%	9.58%	9.58%	0.00%
27	600.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	8.63%	8.63%	8.63%	0.00%
28	650.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	7.81%	7.81%	7.81%	0.00%
29	700.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	7.10%	7.10%	7.10%	0.00%
30	750.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	6.47%	6.47%	6.47%	0.00%
31	800.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.91%	5.91%	5.91%	0.00%
32	850.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.42%	5.42%	5.42%	0.00%
33	900.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.98%	4.98%	4.98%	0.00%
34	950.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.59%	4.59%	4.59%	0.00%
35	1000.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.23%	4.23%	4.23%	0.00%

Los conceptos de estructuras en serie y paralelo no aplican en forma muy clara a mantenibilidad, ya que esta noción es propia de la gestión de mantenimiento que realicen los diferentes grupos humanos que los ejecutan, a diferencia de la confiabilidad, que es una característica inherente al equipo.



Los conceptos de estructuras en serie y paralelo no aplican en forma muy clara a mantenibilidad, ya que esta noción es propia de la gestión de mantenimiento que realicen los diferentes grupos humanos que los ejecutan.

RESUMEN

PARÁMETROS Y DISTRIBUCIONES - CMD

Esta tercera parte aporta las diferentes metodologías, los métodos, fundamentos, cálculos, fórmulas, criterios, etc., necesarios para realizar los pasos de parametrización y cálculo de $F(t)$, $R(t)$, $M(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, etc., de cualquiera de las distribuciones explicadas, de tal manera que se puede caracterizar y monitorear su comportamiento futuro, mediante las predicciones CMD, por los modelos puntual y de distribuciones, para establecer estrategias, tácticas y tareas óptimas del mantenimiento y de la producción.

PREGUNTAS, DESARROLLOS, FOROS Y EJERCICIOS

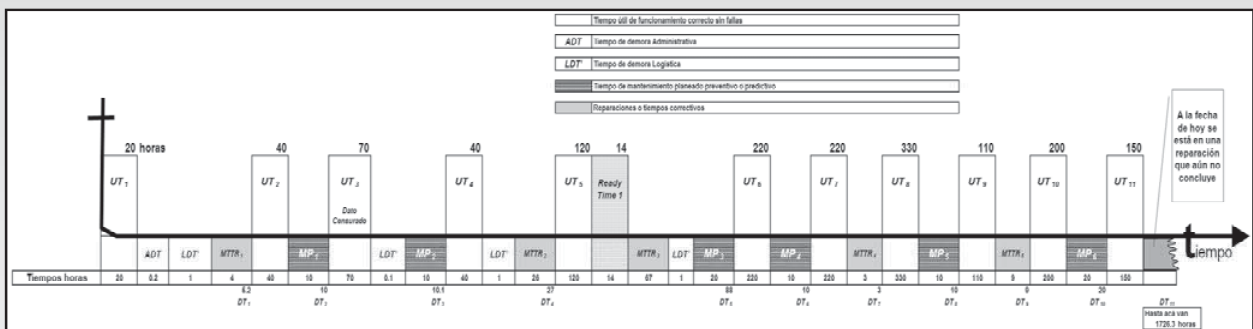
- En los diferentes modelos de parametrización de $F(t)$ y de $M(t)$, ¿cuáles son los más favorables en términos de criticidad? Explique el porqué.
- ¿Por qué siempre el modelo de parametrización de Kaplan-Meier es el más desfavorable en criticidad, a la hora de estimar los parámetros y funciones?
- Explique los criterios estadísticos de ajuste, error típico, variación, error estándar del estimado, coeficiente de determinación muestral y el ajustado, coeficiente de correlación múltiple, etc., para validar las alineaciones, y explique en cada caso sus usos y aplicaciones, sus rangos de validez y sus diferencias.
- La metodología de datos censurados ¿qué pasos lleva a cabo para la estimación de parámetros de $F(t)$ y de $M(t)$, en términos de comparación con los datos no censurados, cuál es más conveniente y por qué?
- Explique la aplicación real, sus lecturas, manejo de datos, interpretación de resultados y diferencias en el comportamiento del equipo que se analiza, mediante las curvas de no confiabilidad, de confiabilidad o supervivencia y la de mantenibilidad; coloque, por favor, de lectura puntual y de distribución, en cada gráfico.
- Explique detalladamente el método de parametrización en Weibull y en otras distribuciones, tratadas en esta parte.
- ¿Cuáles son las principales diferencias, semejanzas, aplicaciones y desventajas de las distribuciones: Weibull, LogNormal, Erlang, Rayleigh, Gamma, Exponencial y Normal? ¿Cuándo se deben usar y por qué? Describa el comportamiento en cada caso de sus curvas de no confiabilidad, mantenibilidad, supervivencia o confiabilidad, función de densidad $f(t)$ de probabilidad de fallas, tasa de fallas $\lambda(t)$ y, por favor, encuentre en cada una la similitud en zonas de etapas de la curva de la bañera.

- ¿En qué consisten los modelos de bondad de ajuste? ¿Para qué sirven? ¿Cómo se usan? Establezca algunas diferencias y ventajas entre Kolmogórov-Smirnov y Anderson-Darling. ¿En qué ocasiones se recomienda usar el J^2 – Chi cuadrado?
- Por favor, establezca las diferencias y los distintos métodos de cálculo, de los sistemas estructurales de equipos en serie, paralelo, *stand-by*, mixto y combinado, explicando en cada caso. ¿Cuál de ellos presenta las mejores probabilidades de confiabilidad y mantenibilidad? ¿Cuál presenta los menores valores?

Integral de la segunda y la tercera partes

EJERCICIO 11.1

Datos:



Problema 1 - Esquematice los mapas no planeado (correctivo y/o modificativo) y planeado (preventivos y/o predictivos).

Problema 2 - Haga los cálculos puntuales de *MTBF*, *MTTR* y de la disponibilidad.

Problema 3 - Seleccione la disponibilidad más apropiada y calcule todos los valores correspondientes con el método puntual, compare con la anterior y explique el porqué de la diferencia.

Problema 4 - Elija la disponibilidad más apropiada y calcule todos los parámetros y los valores correspondientes con el método de distribuciones, utilizando los métodos i-kaésimo, tabla de rango de medianas, Benard de rango de medianas y Kaplan-Meier. Maneje el método de Excel de regresión para el cálculo en la alineación, determine Beta (β) y Eta (η) en cada caso, calcule los valores necesarios de disponibilidad y establezca el porqué de las diferencias, con los procesos anteriores. Examine los valores de Beta para $MTBM_C$, $MTBM_p$, $MTTR$, M_p y verifique que estén en la zona correcta de la curva de la bañera. Haga las predicciones en horas de $MTBM_C$, $MTBM_p$, $MTTR$ y M_p tanto para el cálculo con distribuciones como para el método puntual, para el 30% del tiempo actual.

Problema 5 - Calcule los $F(t)$ y los $M(t)$ para mapa no planeado como para el planeado con datos censurados; observe y analice las diferencias con datos normales. Determine las conclusiones.

Ayuda en la



Estimación de
Parámetros para
Distribución Gamma
y Método de Máxima
Verosimilitud MLE

Estimación de
parámetros mediante
Método de Máxima
Verosimilitud de A, de
Weibull con MLE, de
la Web

Cálculo de CMD,
parámetros, curvas y
bondad de ajuste

Problema 6 - Calcule los valores de $MTBM_C$, $MTBM_P$, $MTTR$ y M_P mediante la distribución Gamma y con el Método MLE; compare con los valores obtenidos con Weibull por distribuciones y por el método puntual, utilizando el programa - *Estimación de parámetros para distribución Gamma y Método de Máxima Verosimilitud MLE* y luego con el programa - *Estimación de parámetros mediante Método de Máxima Verosimilitud de AI de Weibull con MLE*, de la Web, de Weibull con MLE.

Problema 7 - Calcule los valores de $MTBM_C$, $MTBM_P$, $MTTR$ y M_P mediante diferentes distribuciones y métodos de parametrización y alineación con *Programa - Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste*, analizando los diferentes resultados obtenidos de cada caso, sus curvas y ubicación estratégica con la curva de Davies o de la bañera.

APLICACIÓN CMD - ESTRATEGIAS Y ACCIONES

CUARTA PARTE

OBJETIVOS

Realizar los cálculos de predicción CMD de un ejemplo, de tal manera que se lleven a cabo todos los pasos de alineación, parametrización, cálculos, predicción, bondades de ajustes, verificación estadísticas, etc., exigidos en el Modelo universal propuesto para la predicción del CMD, estableciendo estrategias y acciones adecuadas, acordes con sus valores de parámetros pronosticados, y con base en las mejores prácticas internacionales – Nivel 3 – Aplicar – Escala de Bloom, Barret y Gagné (Gagné@ y otros, 2008)

INTRODUCCIÓN

La cuarta parte muestra una aplicación integral con cada uno de los pasos mínimos requeridos para predecir el comportamiento CMD de un ejemplo real, mediante la utilización y el refuerzo de todos los conceptos desarrollados en la segunda y la tercera partes, con el fin de utilizarlos en forma práctica, para pronosticar el comportamiento futuro del mantenimiento y de la operación de las máquinas, líneas de producción o fábricas.

Se realiza la estimación CMD con alineación y distribuciones en el cálculo de disponibilidad operacional descrito en el *Ejemplo 4.5 - Disponibilidad operacional (cálculos puntuales sin distribuciones)* - D_{OG} , con el fin de utilizar de una forma integral los conceptos desarrollados en las partes anteriores.

CONOCIMIENTOS PREVIOS REQUERIDOS

Aplicación CMD. Estrategias y acciones

Se debe tener pleno dominio de los modelos de alineación con mínimos cuadrados o regresión, como del modelo *MLE* que no requiere. Al igual que en los pasos previos y fundamentales en la predicción del CMD, es importante diferenciar las ventajas y limitaciones de cada una de las aplicaciones en las diferentes disponibilidades estandarizadas mundialmente, para una mejor claridad y precisión de los resultados, mediante el manejo de cada paso en la estimación de parámetros de las diferentes distribuciones explicadas, de sus chequeos estadísticos, y de su bondad de ajuste.

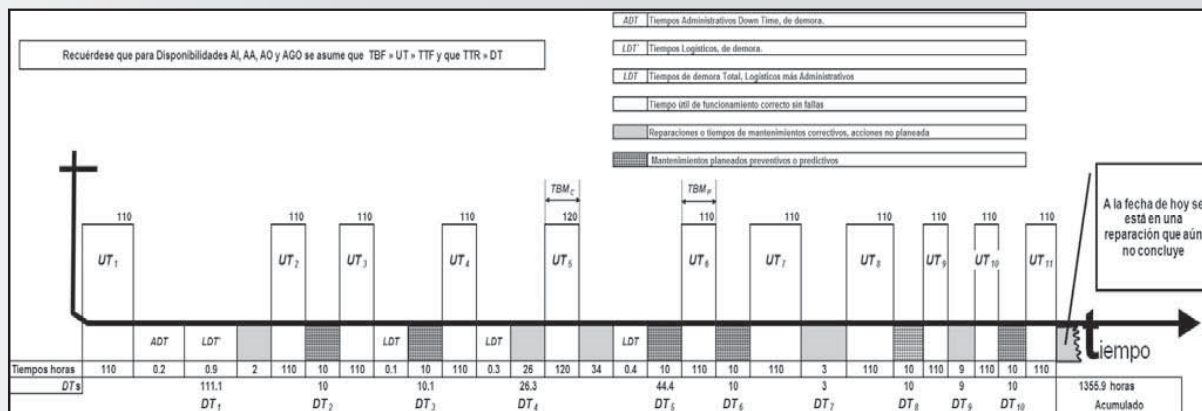
CAPÍTULO 12

DESARROLLO DE EJERCICIO INTEGRAL CMD

Aplicación integral con cálculos con distribuciones

EJEMPLO 12.1

Las condiciones iniciales del registro histórico de datos son:



Fuente: El autor.



En el modelo universal e integral para la medición CMD, lo primero que se decide es qué se hace con los datos; el proceso de pronóstico se hará al final y no al inicio y también se resuelve utilizar en el ejemplo la disponibilidad operacional, dado que trabaja con demoras.

El primer paso consiste en revisar los pasos de la metodología propuesta en el *Gráfico 4.1 - Modelo universal e integral*, propuesto para la medición CMD, según la cual lo primero que se decide es qué se hace con los datos; el proceso de pronóstico se hará al final y no al inicio y también se resuelve utilizar en el ejemplo la disponibilidad operacional, dado que trabaja con demoras.

Cada uno de los pasos de la metodología propuesta se sigue en el ejemplo que se desarrolla, en el cual se muestran los pasos y cálculos de cada etapa con sus respectivas pruebas de alineación y bondad de ajuste.

El segundo paso es tomar como base de estimación el método de Weibull, con alineación y sus respectivos procesos. Las fórmulas que se requieren para estimar los parámetros que se utilizan en los diferentes procedimientos son:

$$\text{Disponibilidad Operacional} = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M'}}$$

Donde:

sus parámetros $MTBM$ y $\overline{M'}$, que corresponden a confiabilidad y mantenibilidad respectivamente, se calculan mediante las expresiones:

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

y

$$\overline{M'} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

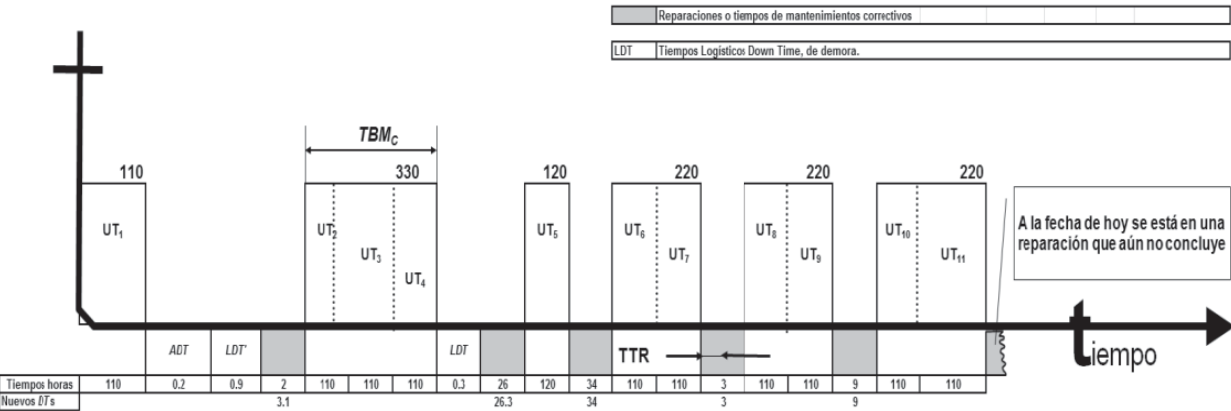
Para la estimación de $MTBM_c$ y $MTTR$ se usa el mapa *no planeado* (acciones correctivas y modificativas), y para $MTBM_p$ y M_p se utiliza el *mapa planeado*.

Mapa no planeado

Cálculos No Planeados

en esta sección se trata de evaluar los parámetros $MTBM_C$ y $MTTR$ por reparaciones / sus tiempos nexos

Para el cálculo de $MTBM_C$ se asume como si el comportamiento total fuese (se eliminan los mantenimientos y LDTs planeados de la gráfica) así:

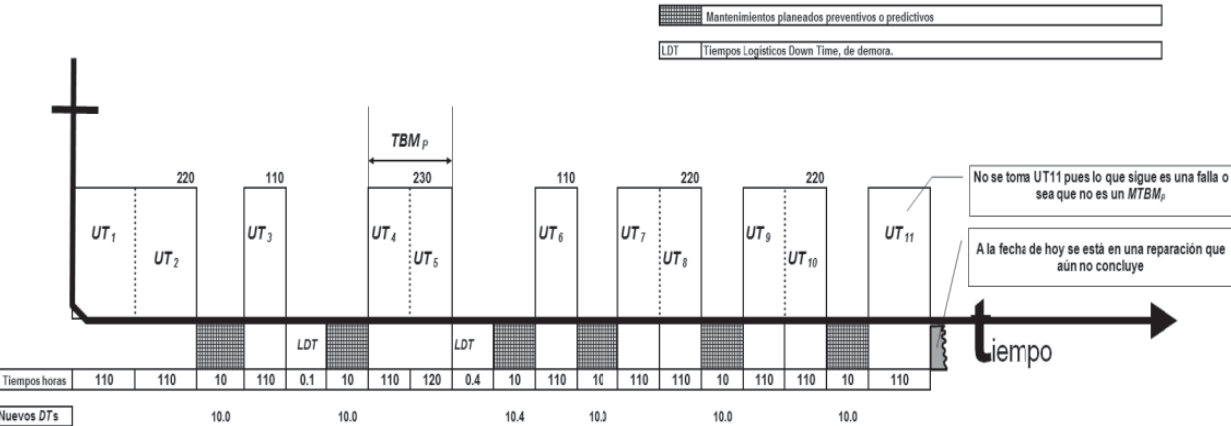


Mapa planeado

Cálculos Planeados: preventivos o predictivos

en esta sección se trata de evaluar los parámetros $MTBM_P$ y M_P por reparaciones y sus tiempos nexos

Para el cálculo de $MTBM_P$ se asume como si el comportamiento total fuese (se eliminan los tiempos y los LDT, correctivos de la gráfica)



Los diferentes $MTBM_C$, $MTBM_P$, $MTTR$ y M_P se estiman por los cuatro métodos de alineación y se toman los valores críticos (los más altos, $F(t)$ y $M(t)$ de i -kaésimo para valores inferiores o iguales al 50%, y para los mayores se trabaja con tabla de rango de medianas), de la siguiente manera:

Método con distribuciones
No Confiabilidad - No Planeada

Diferentes métodos

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas $MTBM_c$	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	Método i-kaésimo $F(r) = \frac{j}{N+1}$	$F(t)$ con Aproximación Rango Mediana Tabla	$F(t)$ redondeado con aproximación Rango Medianas Benard	$F(t)$ - Kaplan & Meier
1	110	110	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
2	330	120	28.57%	26.46%	26.56%	23.12%
3	120	220	42.86%	42.14%	42.19%	36.64%
4	220	220	57.14%	57.86%	57.81%	51.60%
5	220	220	71.43%	73.56%	73.44%	68.10%
6	220	330	85.71%	89.09%	89.06%	86.25%
Media			50.00%	50.00%	50.00%	46.11%

No Confiabilidad - No Planeada

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas $MTBM_c$	$F(t)$ con Valores más altos	Dato No.	Transformada $F(t)$
1	110	14.29%	1	14.29%
2	120	28.57%	2	28.57%
3	220	42.86%	3	73.56%
4	220	57.86%	4	89.09%
5	220	73.56%		
6	330	89.09%		

Mantenibilidad - No Planeada

Diferentes métodos

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas $MTTR$	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	Método i-kaésimo $M(r) = \frac{j}{N+1}$	$M(t)$ con Aproximación Rango Mediana Tabla	$M(t)$ redondeado con aproximación Rango Medianas Benard	$M(t)$ - Kaplan & Meier
1	3.10	3.1	16.67%	12.96%	12.96%	12.96%
2	26.30	3.0	33.33%	31.38%	31.48%	27.67%
3	34.00	9.0	50.00%	50.00%	50.00%	44.29%
4	3.00	26.3	66.67%	68.62%	68.52%	62.97%
5	9.00	34.0	83.33%	87.06%	87.04%	83.91%
Media			50.00%	50.00%	50.00%	46.36%

Mantenibilidad - No Planeada

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas $MTTR$	$M(t)$ con Valores más altos	Dato No.	Transformada $M(t)$
1	3	16.67%	1	16.67%
2	3	33.33%	2	33.33%
3	9	50.00%	3	50.00%
4	26	68.62%	4	68.62%
5	34	87.06%	5	87.06%

Método con distribuciones
No Confiabilidad - Planeada

Diferentes métodos

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas <i>MTBM_p</i>	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	Método i-kaésimo $F(r) = \frac{r}{N+1}$	<i>F(t)</i> con Aproximación Rango Mediana Tabla	<i>F(t)</i> redondeado con aproximación Rango Medianas Benard	<i>F(t)</i> - Kaplan & Meier
1	220	110	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
2	110	110	28.57%	26.46%	26.56%	23.12%
3	230	220	42.86%	42.14%	42.19%	36.64%
4	110	220	57.14%	57.86%	57.81%	51.60%
5	220	220	71.43%	73.56%	73.44%	68.10%
6	220	230	85.71%	89.09%	89.06%	86.25%
Media			50.00%	50.00%	50.00%	46.11%

No Confiabilidad - No Planeada

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas <i>MTBM_p</i>	<i>F(t)</i> con Valores más altos	Dato No.	Transformada <i>F(t)</i>
1	110	14.29%	1	28.57%
2	110	28.57%	2	73.56%
3	220	42.86%	3	89.09%
4	220	57.86%		
5	220	73.56%		
6	230	89.09%		

Mantenibilidad - Planeada

Diferentes métodos

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas <i>M_p</i>	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	Método i-kaésimo $M(r) = \frac{r}{N+1}$	<i>M(t)</i> con Aproximación Rango Mediana Tabla	<i>M(t)</i> redondeado con aproximación Rango Medianas Benard	<i>M(t)</i> - Kaplan & Meier
1	10.00	10.0	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
2	10.10	10.0	28.57%	26.46%	26.56%	23.12%
3	10.40	10.0	42.86%	42.14%	42.19%	36.64%
4	10.00	10.0	57.14%	57.86%	57.81%	51.60%
5	10.00	10.1	71.43%	73.56%	73.44%	68.10%
6	10.00	10.4	85.71%	89.09%	89.06%	86.25%
Media			50.00%	50.00%	50.00%	46.11%

Mantenibilidad - No Planeada

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas <i>M_p</i>	<i>M(t)</i> con Valores más altos	Dato No.	Transformada <i>M(t)</i>
1	10.0	14.29%	1	57.86%
2	10.0	28.57%	2	73.56%
3	10.0	42.86%	3	89.09%
4	10.0	57.86%		
5	10.1	73.56%		
6	10.4	89.09%		

El segundo paso es la alineación mediante el método de mínimos cuadrados - regresión tanto para F(t) como para M(t)

Transformaciones en Mantenimientos Planeados

Weibull - No confiabilidad - Alineación

No Confiabilidad

Pruebas y cálculos de regresión

j	t _j	F(t _j)	Ln(Ln(1/(1-F(t)))) - Y de la regresión	Ln(t) de datos - X de la regresión	X _j * Y _j	X _j ²	Ŷ _j	Y _j - Ŷ _j	Y _j - $\bar{Y}$	$\frac{(Y_j - \bar{Y})}{[Y_j - \bar{Y}]}$	$\frac{[(Y_j - \bar{Y}) * \bar{Y}]}{[Y_j - \bar{Y}]}$	$\frac{[(Y_j - \bar{Y}) * \bar{Y}]}{[Y_j - \bar{Y}]}$	$\frac{[(Y_j - \bar{Y}) * \bar{Y}]}{[Y_j - \bar{Y}]}$
1	110	28.57%	-1.0824	4.700	-5.1199	22.0945	-1.1019	0.0127	-0.4769	0.2774	0.5181	-1.0865	1.1804
2	220	73.56%	0.28540	5.394	1.5393	29.0912	0.4935	-0.2101	0.2162	0.0468	0.0623	0.2382	0.0831
3	230	89.09%	0.79347	5.438	4.3258	29.5727	0.5930	0.1975	0.2607	0.0690	0.2081	0.7983	0.6372
N =													0.0390

Suma	0.7462	80.7584	-0.0094	0.0000	0.0000	0.3422	0.7586	0.0000	1.9007	0.0333

$\bar{Y} = -0.00279$

$\bar{X} = 5.177$

Pendiente

$b = \frac{\sum_{j=1}^N X_j * Y_j - N * \bar{X} * \bar{Y}}{\sum_{j=1}^N X_j^2 - N * \bar{X}^2} = \frac{2.3046}{-11.9348}$

Intercepto

$a = \bar{Y} - b * \bar{X} =$

Parametro de forma β

$\beta = \text{pendiente} = b$

Parametro de Escala Eta η

$\eta = e^{\frac{1}{\beta}}$

MTBM P

$\eta * \text{Gamma } \Gamma(1 + 1/\beta) =$

2.3046

177.435285

157.20

Horas

Ajuste

$Ajuste = \sum |Y_j - \hat{Y}_j| = 0.000$

Error Estándar del Estimado
o Variación o Error Típico

$S_e = \sqrt{\frac{\sum (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N - 2}} = 0.2887$

Coefficiente de
Determinación Muestral

$r^2 = 1 - \frac{\sum (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum (Y_j - \bar{Y})^2} = 0.9562$

Coefficiente de determinación
muestral r^2 ajustado

$r^2 \text{ ajustado debe ser mayor a } 0.90$

0.9173

Coefficiente de Correlación Múltiple

$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X}) * (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 * \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9778$

Se observa que la alineación cumple bien las pruebas de ajuste (0), coeficiente de determinación (mayor a 0.9025) y coeficiente de correlación (mayor a 0.95)

Prueba de Kolmogórov-Smirnov	CUMPLE
Prueba de Anderson-Darling	CUMPLE
Prueba de J^2 Chi cuadrado	CUMPLE

ALFAOMEGA

LUIS ALBERTO MORA

Weibull - Mantenibilidad - Alineación - Planeada

Mantenibilidad										Pruebas y cálculos de regresión									
		t_j	$M(t_j)$	$\text{Ln}(\text{Ln}(1/(1-M(t))))$ Y de la regresión	$\text{Ln}(t)$ de datos - X de la regresión	$X_j * Y_j$	X_j^2	$\hat{Y}_j$	$ Y_j - \hat{Y}_j $	$ X_j - \bar{X} $	$\left[\frac{(Y_j - \hat{Y}_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}} \right] \cdot \left[\frac{(X_j - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}} \right]$	$\left[\frac{(Y_j - \hat{Y}_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}} \right]^2$	$\left[\frac{(X_j - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}} \right]^2$	$\left[\frac{(Y_j - \hat{Y}_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}} \right] \cdot \left[\frac{(X_j - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}} \right]$	$\left[\frac{(Y_j - \hat{Y}_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}} \right]^2$	$\left[\frac{(X_j - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}} \right]^2$	$\left[\frac{(Y_j - \hat{Y}_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}} \right] \cdot \left[\frac{(X_j - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}} \right]$	$\left[\frac{(Y_j - \hat{Y}_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}} \right]^2$	$\left[\frac{(X_j - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}} \right]^2$
1		10.00	57.66%	-0.14598	2.303	-0.3361	5.3019	-0.0574	-0.0866	-0.0164	0.0003	0.0075	-0.4516	0.2094	0.0079				
2		10.10	73.56%	0.28540	2.313	0.6800	5.3478	0.1666	0.1188	-0.0064	0.0000	0.0002	-0.0262	0.0007	0.0141				
3		10.40	89.09%	0.79547	2.342	1.8628	5.4641	0.8256	-0.0301	0.0228	0.0005	0.0110	0.4338	0.2341	0.0009				
N =		3																	
Suma																			
						2.1867	16.1338	0.9349	0.0000	0.0000	0.0008	0.0187	0.0000	0.4442	0.0229				

Coefficiente de determinación muestral r^2 ajustado	0.8971
r^2 ajustado debe ser mayor a 0.90	

Coefficiente de Correlación Múltiple

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X}) * (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 * \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9739$$

		Ajuste	Ajuste
$Ajuste = \sum Y_j - \hat{Y}_j =$		0.000	
Error Estándar del Estimado o Varación o Error Típico		0.1512	
$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N - 2}} =$			
Coefficiente de Determinación Muestral		0.9485	
$r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2} =$			

Se observa que la alineación cumple bien las pruebas de ajuste (t), coeficiente de determinación (t), coeficiente de correlación (mayor a 0.95)

Prueba de Kolmogorov-Smirnov	CUMPLE
Prueba de Anderson-Darling	CUMPLE
Prueba de J2 Chi cuadrado	CUMPLE

Las pruebas de bondad de ajuste se realizan con
programa CMD integral en CD software

Resultados obtenidos con distribuciones

Valores No Planeados

Reparaciones

Parametro de forma beta	2.2881
Parametro de Escala Eta η	216.0235
MTBM_C	191.37
MTBM _C puntual	203.33

Parametro de forma beta	0.8288
Parametro de Escala Eta η	25.3399
MTTR	28.02
MTTR puntual	15.08

Valores Planeados

Mantenimientos preventivos y/o predictivos

Parametro de forma beta	2.3046
Parametro de Escala Eta η	177.4353
MTBM_P	157.20
MTBM _P puntual	185.00

Parametro de forma beta	22.5126
Parametro de Escala Eta η	10.0255
M_P	9.79
M _P puntual	10.10

MTBM86.30

M'18.01

D_O82.74%

$$\frac{1}{M'} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{\frac{28.02}{191.37} + \frac{9.79}{157.20}}{\frac{1}{191.37} + \frac{1}{157.20}} = 18,01 \text{ horas}$$

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{1}{\frac{1}{191,37} + \frac{1}{157,20}} = 86,30 \text{ horas}$$

$$Disponibilidad Operacional = A_o = \frac{MTBM}{MTBM + M'} = \frac{86,30}{86,30 + 18,01} = 82,74 \text{ horas}$$

Con estimaciones puntuales se consigue:

$$\bar{M}' = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} \cdot \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{\frac{15,1}{203,3} \cdot \frac{10,1}{185}}{\frac{1}{203,3} + \frac{1}{185}} = 12,48$$

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{1}{\frac{1}{203,3} + \frac{1}{185}} = 96,86$$

$$Disponibilidad Operacional = A_o = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}'} = \frac{96,86}{96,86 + 12,48} = 88,59\%$$

En comparación con los valores puntuales obtenidos (que no deben usarse porque pueden existir varias curvas de fiabilidad y de mantenibilidad con los mismos $MTBF$ y $MTTR$ respectivamente, se observa que el $MTBM$ es menor¹ con distribución, al igual se denota un $\bar{M}'$ mayor² con distribución.

En ambos casos se vuelve más estricto con distribución, lo que puede ser debido a asumir valores más críticos en los $F(t_i)$ y de $M(t_i)$ en los valores repetidos de UT y DT , por un lado, y por el otro que los diferentes procesos matemáticos y estadísticos realizados hacen más severo el proceso de cálculo.

En todos los eventos de este ejercicio, es más conservador trabajar con distribuciones frente a la opción de cálculos puntuales.

Al aplicar en la vida real las expresiones para estimar A_o , se debe tener en cuenta que el $MTBM$ debe ser mucho más grande que $\bar{M}'$, (al menos unas 10 veces), (en el ejemplo resuelto es igual a 86,30/18,01 o sea que es 4,79 veces mayor, se debe recordar que es simplemente un ejemplo y por eso no cumple con todo lo debido, pues no hay muchos eventos registrados, dado que no cabrían en las figuras).

También se debe evaluar un período lo suficientemente largo, de tal forma que el tiempo total de análisis de eventos sea al menos 10 veces el $\bar{M}'$ (en el ejemplo resuelto es 1.355,9 horas de análisis total / tiempo medio entre reparaciones y mantenimientos planeados de 18,01 horas, lo que da 75,28 veces), como también que para tener soporte estadístico en cada uno de los cuatro cálculos haya al menos treinta y un eventos³.

1 Al ser menor es más crítico, pues se asume que el sistema trabaja menos tiempo entre fallas.

2 Cuando es mayor es más crítico, pues se asume que cuanto más tiempo tome la reparación o el mantenimiento se hace más riguroso el cálculo.

3 Véase Teorema del límite central en el que Levin demuestra la bondad estadística de tener tamaños muestrales superiores a treinta y un elementos.

Es importante resaltar que como las diferentes pruebas de bondad de ajuste dan correctas⁴ en los cuatro casos, no es necesario recurrir a otras distribuciones⁵, ni al *MLE*, aparte de que cada una de las pruebas estadísticas de alineación (ajuste, error típico, coeficiente de correlación, coeficiente de determinación muestral normal y ajustado) en general dan aceptables en los cuatro casos (no planeado (no confiabilidad y mantenibilidad) y planeado (no confiabilidad y mantenibilidad)).

4 Para una correcta aplicación de Ji2 Chi cuadrado, se deben tener al menos cinco datos o muchos más, lo que pone de manifiesto que en este caso del ejercicio cumplen, pero no es una ortodoxa aplicación.

5 En el evento de que algunas de las pruebas de bondad de ajuste no cumplan, se recomienda en este caso particular chequear con distribución normal, ya que en ambos casos $MTBM_c$ y $MTBM_p$ dan por encima de 2,05.

CAPÍTULO 13

COMPORTAMIENTO FUTURO - NUEVOS CÁLCULOS

Los valores que se hallan de $MTBM_C$, $MTBM_p$, $MTBM$, $MTTR$, M_p y $\bar{M}$ permiten construir el futuro cercano y ver qué ocurre con el componente analizado. Se recomienda estimar hasta un 10% del tiempo evaluado y calculado, como máximo.

Se logra estimar el futuro cercano simulado con base en los tiempos entre reparaciones y mantenimientos obtenidos. Su cómputo es sencillo en Excel o en otro medio informático, respetando el evento que se dé primero si una reparación (correctiva o modificativa), o un mantenimiento planeado (preventivo o correctivo).

Se debe tener en cuenta que todo evento nuevo que ocurra, trátase de un UT , de un TTR o de M_p puede cambiar significativamente los valores de los parámetros $MTBM_C$, $MTBM_p$, $MTTR$ o M_p estimados en el cálculo previo anterior, como también pueden variar los Betas, Etas, $MTBF$ o $MTTR$, lo que significa estar ante una situación muy diferente, que requiere nuevas estimaciones futuras de corto plazo.

Se recomienda hacer nuevos cálculos cada vez que ocurre un nuevo evento o ciclo que incluya al menos un UT , un $MTTR$ y un M_p , o cada vez que se incremente el tiempo estudiado al menos en un diez por ciento. En el ejercicio que se desarrolla, por ejemplo, se sugiere hacer la nueva evaluación cuando se complete un tiempo mínimo de 1.491 horas (1.355,99 más el 10% de 135,59 horas).

Algunas empresas avanzadas en el tema prefieren desarrollar paquetes informáticos o de apoyo al sistema informático global de la empresa, que calculen siempre en tiempo real, que en definitiva es lo más recomendable, aunque todo depende de las necesidades en particular o de los recursos que se dispongan.



Estimar el futuro cercano simulado se logra con base en los tiempos entre reparaciones y mantenimientos obtenidos; su cómputo es sencillo en Excel, respetando el evento que se dé primero si una reparación o un mantenimiento planeado.

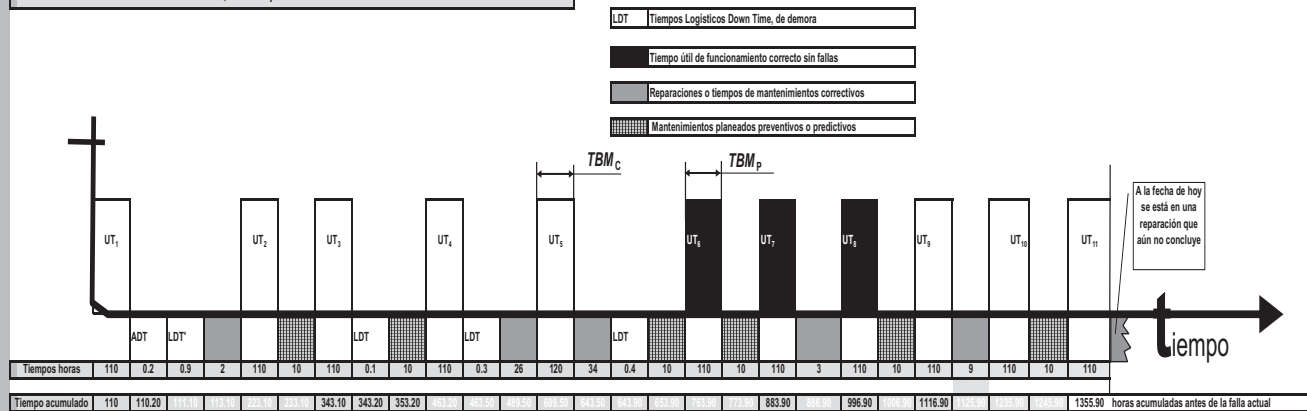
Algunas empresas avanzadas en el tema prefieren desarrollar paquetes informáticos o de apoyo al sistema informático global de la empresa, que calculen siempre en tiempo real, que en definitiva es lo más recomendable.

Simulación de corto plazo en la disponibilidad operacional (cálculos con distribuciones)

EJEMPLO 13.1

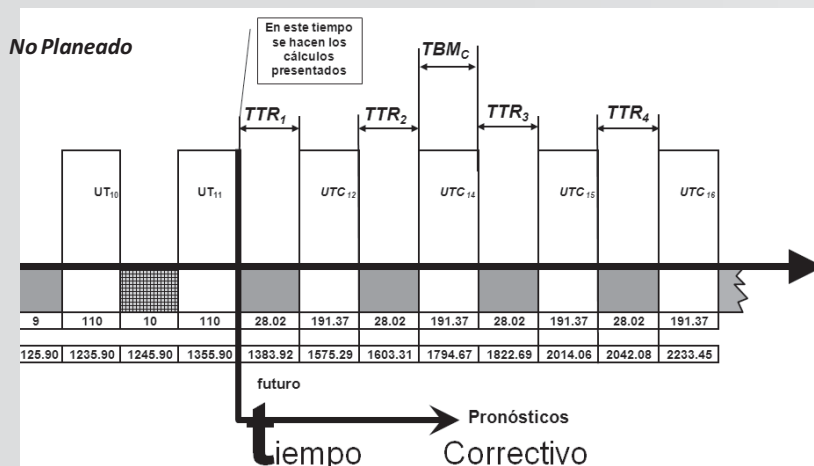
Situación actual hasta el cálculo o estimación de parámetros (hora 1.355,9)

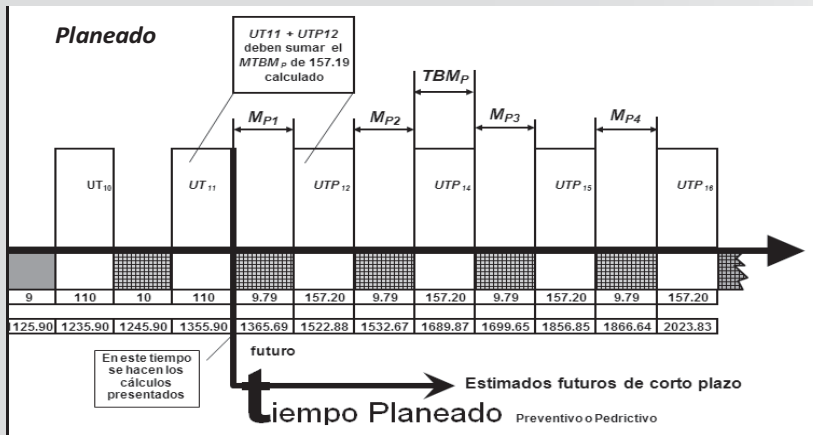
Recuérdese que para Disponibilidades A_k , A_0 y A_{GO} se asume que $TBF \approx UT \approx TTF$, también sucede que LDT tiende al mínimo o a cero, a la vez que $UT \gg DT$ con lo cual $DT \approx TTR$



Fuente: El autor.

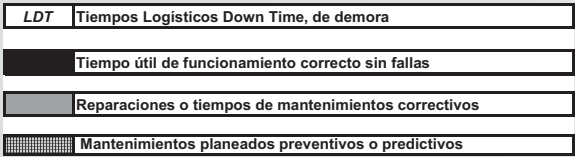
Situación futura, teniendo en cuenta las acciones correctivas y los mantenimientos planeados que se espera ocurran en el corto plazo (estimaciones correctivas y planeadas respectivamente).



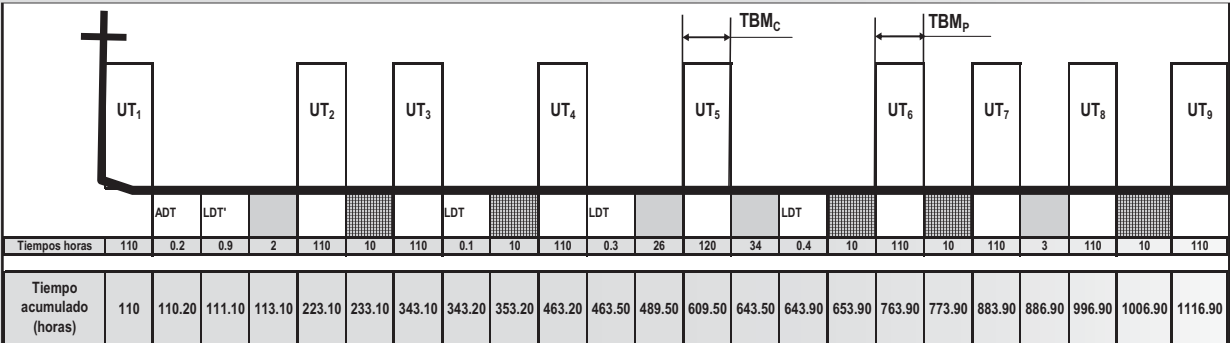


Fuente: El autor.

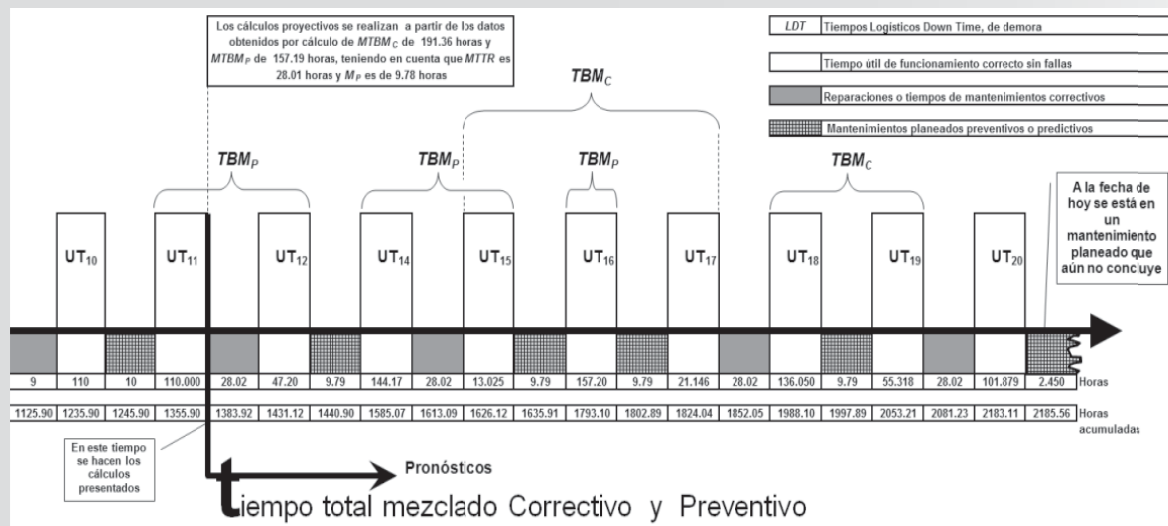
El comportamiento futuro de corto plazo simulado que se obtiene al conjugar ambas situaciones (reparaciones y mantenimientos planeados), se visualiza en:



Tiempos que ya han transcurrido:



Pronósticos de los eventos que ocurren a futuro:



La gran ventaja de poseer el estimado consiste en que todo se puede planear con mayor anticipación y se ahorran grandes sumas de dinero en la preparación de las actividades, por parte de mantenimiento.

La gran ventaja de poseer el estimado consiste en que todo se puede planear con mayor anticipación y se ahorran grandes sumas de dinero en la preparación de las actividades, por parte de mantenimiento. Para producción es más importante aun, pues se pueden conocer con antelación los tiempos en que tendrá una disponibilidad estimada para realizar su actividad de generar bienes o servicios con el sistema o máquina analizado.

CAPÍTULO 14

ESTRATEGIAS Y ACCIONES DERIVADAS DEL CMD - ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD - BETA

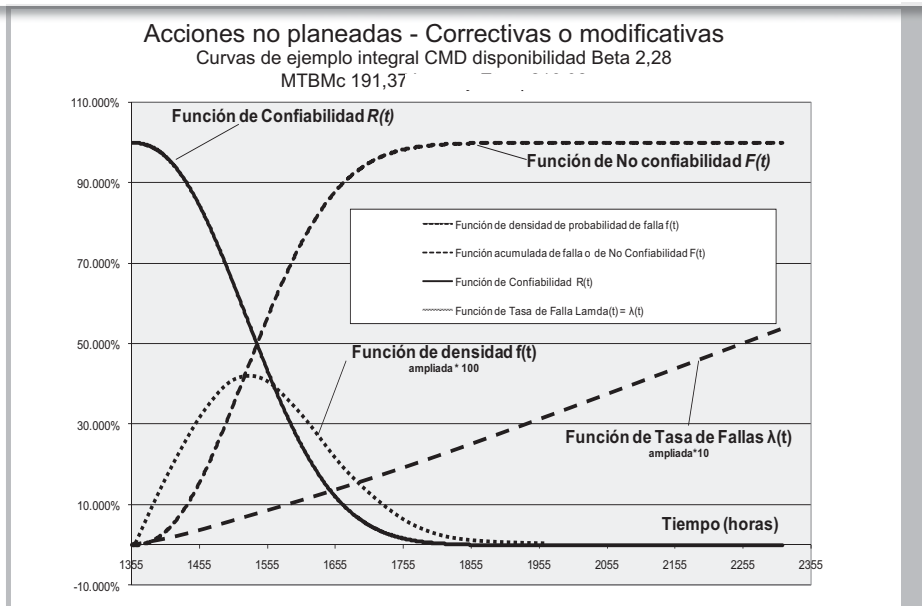
Los valores calculados en confiabilidad, tanto para la fase de reparaciones $MTBM_C$ como para la sección de mantenimientos planeados (preventivos o predictivos) $MTBM_p$, dan Betas cercanos a 2,30, lo que ubica el ejercicio al inicio de la etapa 3 de la fase III, donde la función de densidad empieza un ciclo de reparaciones y mantenimientos planeados con distribución normal, y una tasa de fallas creciente.

14.1 ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD INFLUENCIADA POR REPARACIONES FUTURAS ESTIMADAS DE CORTO PLAZO

Para el $MTBM_C$ o sea el comportamiento debido a fallas y reparaciones:

Curvas de función de densidad, confiabilidad, tasa de fallas y no confiabilidad en confiabilidad correctiva en el ejercicio integral A_0

GRÁFICO 14.1



Del *Gráfico 14.1* se desprende que la función de densidad o de falla instantánea asume una distribución normal donde en cada avance del tiempo se incrementa la probabilidad de que aparezca una nueva falla, hasta llegar a un tope que sucede en la media de la distribución, exactamente en el punto 1.523,99 horas, donde alcanza la función instantánea su máximo valor. De allí en adelante empieza a disminuir paulatinamente el valor $f(t)$, demostrando que el sistema ha fallado suficientes veces y que cada vez será menor la probabilidad instantánea de falla nueva.

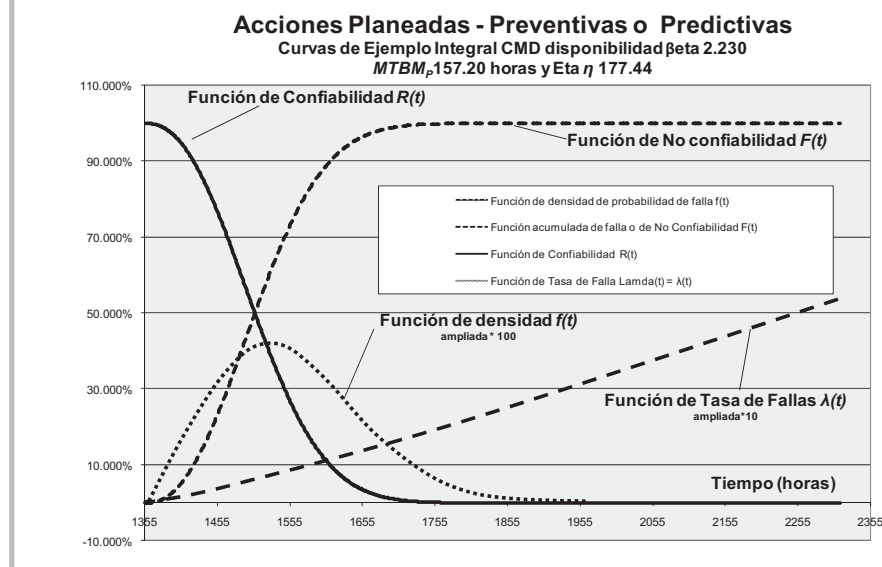
La tasa de fallas, tasa de fallas $\lambda(t)$ o función de riesgos, empieza a incrementarse en forma constante y luego aceleradamente hacia la derecha, lo cual es muy característico del final de la etapa 2 e inicio de la etapa 3 de la fase III en la curva de Davies, lo que pone de manifiesto que la tasa con que aumenta $\lambda(t)$ es una compensación entre la variación de función de densidad y la confiabilidad. Por su lado, la confiabilidad disminuye significativamente en la medida en que aumenta el tiempo.

14.2 ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD INFLUENCIADA POR LOS MANTENIMIENTOS PLANEADOS FUTUROS ESTIMADOS DE CORTO PLAZO

Para el $MTBM_p$, o sea el comportamiento debido a mantenimientos planeados y su influencia en la confiabilidad:

Curvas de función de densidad, confiabilidad, tasa de fallas y no confiabilidad en mantenimientos planeados en el ejercicio integral

GRÁFICO 14.2



De forma casual, lo mismo que sucede en la función de densidad para las fallas debidas a reparaciones, es muy similar a los hechos que suceden en la confiabilidad influenciada por los mantenimientos planeados; la $f(t)$ crece gradualmente hasta alcanzar el máximo valor en la media de la distribución normal en el punto 1.494,99 horas, descendiendo después de allí.

Por otro lado, la tasa de fallas o función de riesgo crece en forma constante y luego empieza a acelerar en la medida en que se incrementa el tiempo; como también sucede que la confiabilidad disminuye aceleradamente hacia la derecha al incrementarse el tiempo.

Los resultados manifiestan que las pérdidas de funcionalidad imputables a fallas que implican reparaciones son mayores que las pérdidas de producción generadas por la ejecución de mantenimientos planeados. Esto es muy evidente debido a que el $MTBM_C$ es mayor que el $MTBM_P$, por lo cual se deben controlar o erradicar las fallas con reparaciones mediante la utilización de la técnica *FMECA*, y una vez se logre reducirlas, aplicar una táctica *RCM* para incorporar los mantenimientos planeados que eviten esas fallas actuales.

Es evidente que el mantenimiento planeado actual no alcanza a prevenir o predecir las fallas imprevistas que ocurren, lo que corrobora la urgente necesidad de usar análisis de fallas, y luego implementar el *RCM*, siempre y cuando se tenga un recurso humano motivado a ello, lo que en su defecto implica más bien un *TPM*.

Es importante señalar que las acciones correctivas debidas a reparaciones, básicamente atienden componentes, mientras que los mantenimientos planeados o tareas proactivas procuran evitar fallas en las máquinas o sistemas, aunque conviene mencionar que la acción específica preventiva o predictiva se realiza concretamente en uno o varios componentes.

La conducta de los componentes o sistemas en cada fase y etapa (*ver Gráfico 5.5 - Curva de la bañera o de Davies*), se identifica mediante:



Las acciones correctivas debidas a reparaciones, básicamente atienden componentes, mientras que los mantenimientos planeados o tareas proactivas procuran evitar fallas en las máquinas o sistemas.

Comportamiento en las zonas de la curva de la bañera. **CUADRO 14.1**

	Característica	Causado por	Disminuido con
Fase I - mortalidad infantil	La tasa de fallas disminuye paulatinamente o drásticamente con el tiempo ¹ .	Defectos de producción. Fallas por soldadura. Fisuras. Componentes imperfectos. Calidad defectuosa. Medio ambiente fuera de control. Condiciones fuera de estándares. Ensamblajes inadecuados. Procesos inadecuados	Chequeo de funcionamiento. Control de calidad. Examen de aceptación. FMECA o análisis de fallas. Acciones correctivas buenas.
Fase II - Rodaje o vida útil	El Beta y la tasa de fallas son fijos en valor.	Mantenimiento inadecuado. Entorno de trabajo. Cargas aleatorias. Errores humanos. Situaciones fortuitas. Eventos inesperados al azar.	Rediseño de máquina o de proceso. Recurrencia. Revisión técnica de proceso u operación.
Fase III - Envejecimiento o desgaste	La tasa de fallas se incrementa de varias formas.	Fatiga. Corrosión. Envejecimiento. Fricción. Cargas cíclicas. Defectos ocultos. Bajos coeficientes de seguridad.	Tareas proactivas. Reemplazo de componentes. Tecnología instrumentos avanzados específicos de orden técnico de mantenimiento. (Véase en capítulos posteriores).

Las acciones que se deben realizar se abren en dos partes: en cuanto a las acciones correctivas de reparación, nótese que se empiezan a incrementar, dado que se está al inicio de la fase creciente izquierda de la distribución normal de función de densidad o falla instantánea; esto se puede controlar mediante la erradicación o disminución de las fallas recurrentes, al utilizar la técnica *FMECA*² mediante la cual se eliminan o se controlan las fallas imprevistas; otro método ideal para la erradicación de fallas imprevistas (o al menos su adecuada gestión y operación) es utilizar *RCM*³.

El hecho de que ya el equipo del ejercicio se conoce en cuanto a los tipos de fallas que presenta, permite la adecuada utilización de la táctica *RCM*, la cual se posibilita más para equipos maduros con Beta superior a 2. Por otro lado, para controlar los tiempos de no funcionalidad del equipo analizado se puede utilizar el *RCM*, ya que por medio de éste se controlan todos los modos de falla en cada una de las fallas funcionales que presenta.

Recuérdese que la metodología táctica *RCM* implementa tareas proactivas de mantenimientos planeados sobre las fallas potenciales que pudiesen ocurrir; al combinarlo con el *FMECA* permite adaptar la estrategia adecuada, ya que va incorporando las acciones de reparaciones a tareas de mantenimiento planeado rutinario, en aquellos casos en los que hay que seguir conviviendo con ellas.

1 En la zona I, con piezas nuevas que están en contacto, y partiendo de cero, hay un rápido aumento inicial de la rata de fallas, hasta llegar a un punto de pulimento de las superficies, donde hay una inflexión de la curva y comienza a disminuir paulatina o drásticamente la tasa de fallas.

2 *FMECA* Análisis de los modos, los efectos, las causas y las criticidades de las fallas.

3 *RCM* Mantenimiento centrado en confiabilidad.

En síntesis, esto corrobora que la mejor combinación de acciones correctivas y mantenimientos planeados, para este caso particular, consiste en la implementación de técnicas *FMECA* y táctica *RCM* para un Beta como el del ejercicio superior a 2, en fase de inicio de la etapa 3 en la fase III de la bañera.

Nótese que la táctica proactiva es mucho más amplia que cualquiera de las demás, aparte de que contiene la reactiva, el *TPM* y el *RCM*.

El Beta con valor mayor de 2,2 denota ya poca dispersión de los valores de los tiempos útiles, lo que implica que ya se tiene un buen control operativo del sistema, con lo cual se puede propender el *RCM*, pues es la etapa ideal para ello; situación esta que no se recomendaría, por ejemplo, para un Beta de valor cercano a 1,05 porque, apenas el equipo comienza a estabilizarse en cuanto a sus tiempos útiles y tiempos de no funcionalidad, lo que implica que es mejor dedicar el tiempo al reconocimiento y aprendizaje colectivo sobre las fallas que presenta el equipo, tanto por parte de producción como de mantenimiento, situación ideal para el *TPM*.

14.3 ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN DE MANTENIBILIDAD INFLUENCIADA POR LAS REPARACIONES TTR ESTIMADAS EN EL CORTO PLAZO

En cuanto a mantenibilidad debida a las acciones correctivas, se puede observar su comportamiento en el *Gráfico 14.3*:

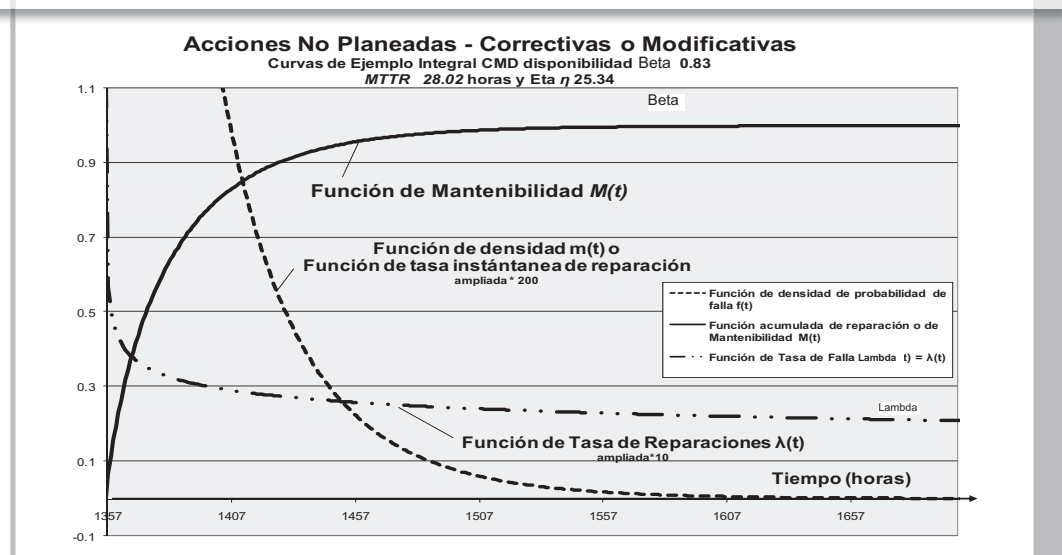


Para controlar los tiempos de no funcionalidad del equipo analizado se puede utilizar el *RCM*, ya que por medio de éste se controlan todos los modos de falla en cada una de las fallas funcionales que presenta.

Se debe recordar que la metodología táctica *RCM* implementa tareas proactivas de mantenimientos planeados sobre las fallas potenciales que pudiesen ocurrir.

Curvas de acciones correctivas de función de densidad, mantenibilidad y tasa de reparaciones en ejercicio integral A_0

GRÁFICO 14.3



Se descubre que las fallas instantáneas van disminuyendo con el tiempo y, en general, se puede afirmar que cada vez duran menos; la estrategia es mantener esta política e implementar urgentemente la técnica del análisis de fallas y el RCM como táctica para controlarlas o erradicarlas. Al estar en la fase I de la curva de la bañera se puede asumir que todas, o al menos la mayoría de las fallas, se pueden controlar o erradicar con la metodología *FMECA*.

En efecto, las cifras revisadas hasta ahora muestran que hay más acciones correctivas que mantenimientos planeados, lo cual se puede minimizar constituyendo un grupo de ataque correctivo con las personas de mantenimiento y de ingeniería de fábricas que posean mejores competencias en las ramas de la ingeniería, donde se estén presentando las fallas funcionales (derivadas del RPN^4 y/o del *FMECA*), de tal forma que al ser jerarquizadas se vayan eliminando o controlando gradualmente por parte de este grupo especial.

Las acciones realizadas por el mencionado grupo especial generan inmediatamente grandes ahorros de mantenimiento al tener mejores confiabilidades y mantenibilidades y, por ende, elevar la disponibilidad operacional de los componentes, máquinas o sistemas que se evalúan. La tasa de fallas está en disminución, lo que implica que es un buen síntoma, pero se debe acompañar del análisis de fallas para disminuirla al máximo y tratar de convertir las fallas imprevistas en tareas proactivas de mantenimiento, es decir, desplazarse a la derecha en la curva.

En cuanto a las tareas proactivas, se puede observar que están al inicio de la fase creciente de una distribución normal, lo cual implica un mejor comportamiento de ellas a través del RCM.

14.4 ANÁLISIS DE LA MANTENIBILIDAD INFLUENCIADA POR LAS TAREAS PROACTIVAS PLANEADAS ESTIMADAS EN EL CORTO PLAZO

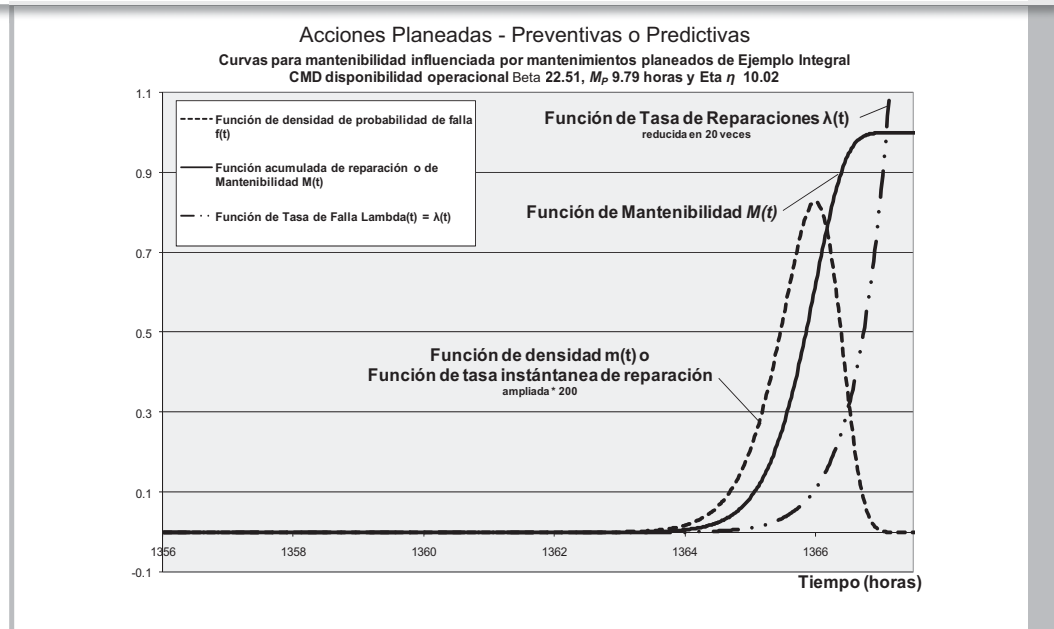
Los mantenimientos planeados se derivan de las decisiones de mantenimiento y producción en la empresa en cuestión, y son del control total de la compañía. Se deben ir incorporando más tareas planeadas derivadas del análisis de fallas del RCM recomendado, con el fin de que con el tiempo disminuya relativamente el *MTTR* frente al M_p en el corto plazo.

Se puede afirmar que existe un buen control en general de las tareas proactivas que se llevan a cabo, porque están estandarizadas ya que su Beta se encuentra al inicio de la etapa 3 de la fase III (para Betas superiores a 2), con lo cual se indica que existe un adecuado control de ellas. Sin embargo, al compararlas con las acciones correctivas se nota que los mantenimientos planeados no controlan totalmente las fallas imprevistas que se presentan. La recomendación estratégica, entonces, es la misma: implementar lo más pronto posible el análisis de fallas e involucrar las acciones derivadas de él en el plan normal de mantenimiento anticipado.

4 RPN, Número de riesgo prioritario.

Curvas de mantenimientos planeados de función de densidad, mantenibilidad y tasa de reparaciones en ejercicio integral A_0

GRÁFICO 14.4



La función de densidad se encuentra al inicio de una distribución normal, lo que manifiesta un lento crecimiento en el tiempo para luego disminuir a la derecha, cuando ya se han aplicado bastantes tareas proactivas.

También es importante mencionar que la tasa de reparaciones crece en esta zona, lo cual, acompañado de la situación de ir incorporando más acciones planeadas que eliminen las fallas que implican reparación, conduce a pensar en reforzar más el personal de mantenimiento planeado e ir disminuyendo el personal del grupo de ataque –citado anteriormente– a medida que vayan reduciendo las reparaciones y aumentando las tareas proactivas, con el fin de mantener el $\bar{M}'$ constante o que disminuya con el tiempo, para mejorar la mantenibilidad y, por ende, aumentar la disponibilidad del sistema.



La función de densidad se encuentra al inicio de una distribución normal, lo que manifiesta un lento crecimiento en el tiempo para luego disminuir a la derecha cuando ya se han aplicado bastantes tareas proactivas.

14.5 RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS DE ACCIONES Y TÁCTICA PARA EL EJERCICIO INTEGRAL DE A_0

En síntesis, del ejercicio en evaluación se recomienda:

- Implementar la técnica de análisis de fallas *FMECA*, acompañada de *RCFA*⁵ y *RPN*, mediante la creación de grupos “cazafallas” y de un grupo de ataque que disminuya rápidamente las fallas que implican reparaciones.
- Revisar los *ADT*, los *LDT* y los *LDT'* con el fin de eliminarlos o reducirlos a su mínima expresión.
- Convertir lo más pronto posible las reparaciones debidas a fallas imprevistas en mantenimientos planeados, que conduzcan a tareas proactivas que eviten esas fallas.
- Empezar a desarrollar la táctica *RCM* como derivación de la recomendación anterior.
- Medir constantemente la proporción del *M'* debida a correctivo y a planeado, para ver si la operación *FMECA* y la táctica *RCM* están dando frutos.
- Controlar y medir permanentemente los valores *CMD*, para constatar el mejoramiento continuo de los indicadores.

5 *RCFA*, Análisis de la causa raíz de las fallas.

CAPÍTULO 15

ANÁLISIS HISTÓRICO, PRESENTE Y FUTURO CERCANO DE PARÁMETROS DEL EJERCICIO INTEGRAL

La evaluación de todos los parámetros calculados en cada uno de los eventos (fallas, reparaciones, mantenimientos planeados, tiempos de demora, tiempos logísticos, *Ready Time*, etc.) que ocurren, permite identificar las directrices de cada uno de ellos y del sistema o componentes, en general, en el futuro cercano.

15.1 ESTRATEGIAS Y ACCIONES FUTURAS

En el gráfico se observa una suave tendencia creciente de la disponibilidad. El $MTBM_c$ oscila mucho, pero últimamente tiende a estabilizarse en menores valores; en éste se debe aplicar el *FMECA* para ampliarlo con proyección al futuro. El $MTBM_p$ tiende a estabilizarse, pero se debe buscar que suba, aplicando *RCM*. El $MTBM$ tiende también a estabilizarse con un leve crecimiento al final del período que se evalúa, y se debe procurar que aumente al aplicar las técnicas de *FMECA* y *RCM* recomendadas anteriormente para reparaciones y mantenimientos planeados, respectivamente.

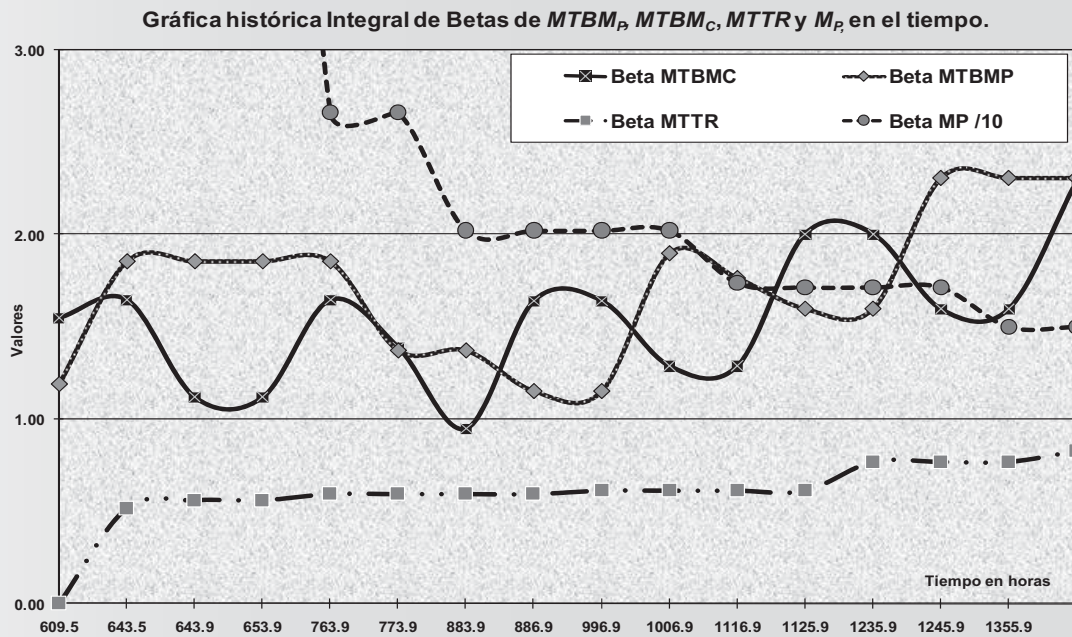
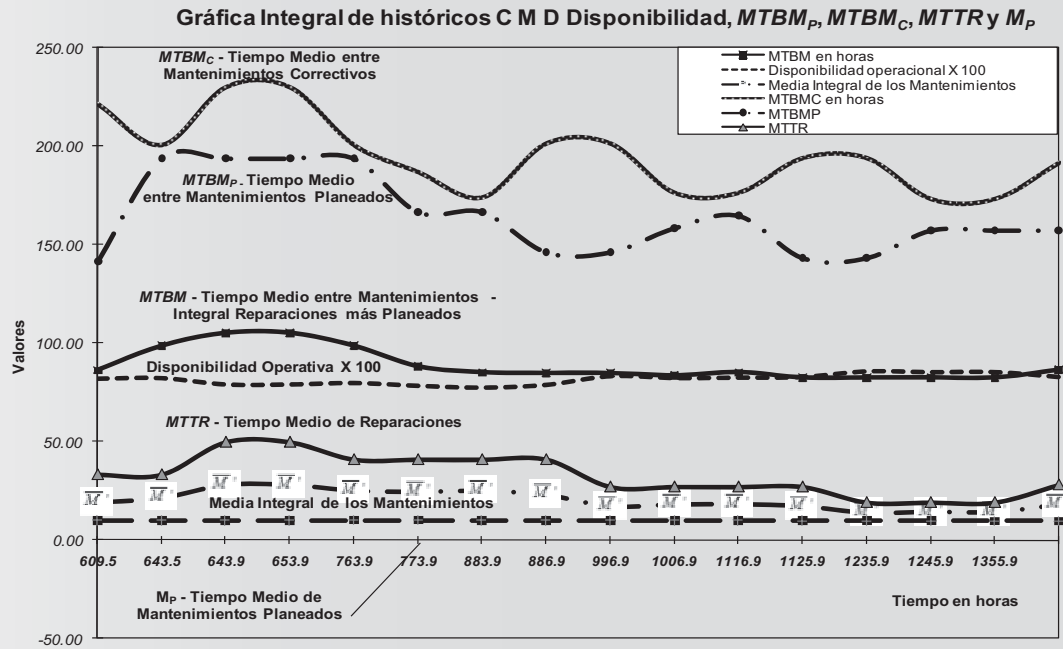


La evaluación de todos los parámetros calculados en cada uno de los eventos que ocurren, permite identificar las directrices de cada uno de ellos y del sistema o componentes, en general, en el futuro cercano.

Detalle de cálculos en cada evento. Aplicación integral con cálculos con distribuciones.

EJEMPLO 15.1

		Tiempo Lógicos Down Time de demora.													
		UT ₁ UT ₂ UT ₃ UT ₄ UT ₅ UT ₆ UT ₇ UT ₈ UT ₉ UT ₁₀ UT ₁₁													
		Tiempo útil de funcionamiento correcto sin fallas													
		Regeneración o tiempos de mantenimientos correctivos													
		Mantenimientos planificados y eventos o predictivos													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													
		MTTR en horas													
		MTBF en horas													



El $MTTR$ tiende a la baja, situación que es buena, pero se debe procurar que descienda más con las sugerencias enunciadas. El indicador M_p se mantiene estable. En este punto es conveniente intentar aumentar la cantidad de mantenimientos planeados en sustitución de las reparaciones. El M' tiende a la baja y, en general, debe procurarse mantenerlo así, pero teniendo en cuenta las consideraciones anteriores de $FMECA$ y RCM .

El Beta del $MTBM_c$ paulatinamente tiende a subir en un pequeño valor, lo cual indica que deben aplicarse las técnicas recomendadas a la etapa 3 de la fase III de la curva de la bañera. Igualmente, se aprecia que el Beta del $MTBM_p$ tiende a estabilizarse después de haber incrementado su valor. Para este caso se mantienen las recomendaciones ya entregadas en párrafos anteriores.

La ventaja de mantener los Betas en los eventos de mantenimientos planeados, por encima de 2, estriba en que se estandarizan y se vuelven muy fáciles de realizar. Lo que no puede decirse de los eventos de reparaciones que, por el contrario, al estar en la etapa 3 de la fase III de la bañera denotan que son similares y que no se controlan ni se erradican.

En el peor de los casos, aun teniendo fallas que impliquen tareas correctivas, deben estar en la fase I donde supuestamente son diferentes y nuevos cada vez. Pero conviene recordar que se deben eliminar sobre todo los recurrentes cada vez que se presenten.

Un Beta que tiende a valores superiores a 2 en la mantenibilidad, debido a tareas proactivas planeadas, significa que éstas se están estandarizando en términos del tiempo de realización, y que son cada vez más controladas, conocidas y sencillas de realizar.

Un Beta bajo inferior a 1 denota que apenas se inician las labores de mantenimiento planeado o que las diferentes cuadrillas que los realizan se demoran cantidades de tiempo significativamente diferentes para realizarlos. En este caso se debe procurar un adecuado entrenamiento del recurso humano para que propenda a la realización estandarizada en el mínimo tiempo, tratando de acercarse a valores internacionales de tiempos de reparación y de horas- hombre, como los que presenta la Casa Oreda en sus *Handbooks* de 1992, 1997 (OREDA, 1997) y 2002¹ (OREDA, 2002), o a otros estándares internacionales u otras entidades mundiales similares.



La ventaja de mantener los Betas en los eventos de mantenimientos planeados por encima de 2, estriba en que se estandarizan y se vuelven muy fáciles de realizar.

1 *Handbooks* – Manuales técnicos de información.

15.2 PRONÓSTICOS DE INDICADORES CMD DE CORTO PLAZO

La metodología más recomendada para conocer el futuro cercano es la de pronósticos bajo el método de series temporales, usando los modelos clásicos (de ajuste por tendencia, los de suavización –Brown, Holt, Winter, X Census 11, etc.– y los de descomposición –Winter, X11, etc.– y los modernos –metodología Box-Jenkins y AR.I.MA.)², mediante el uso y el desarrollo de toda la metodología estandarizada universalmente para realizar estos pronósticos, de tal forma que se garanticen resultados con buena bondad de ajuste entre pronósticos realizados y realidad (Mora, 2007c y Molinero 2004).

15.2.1 Pronósticos con series temporales

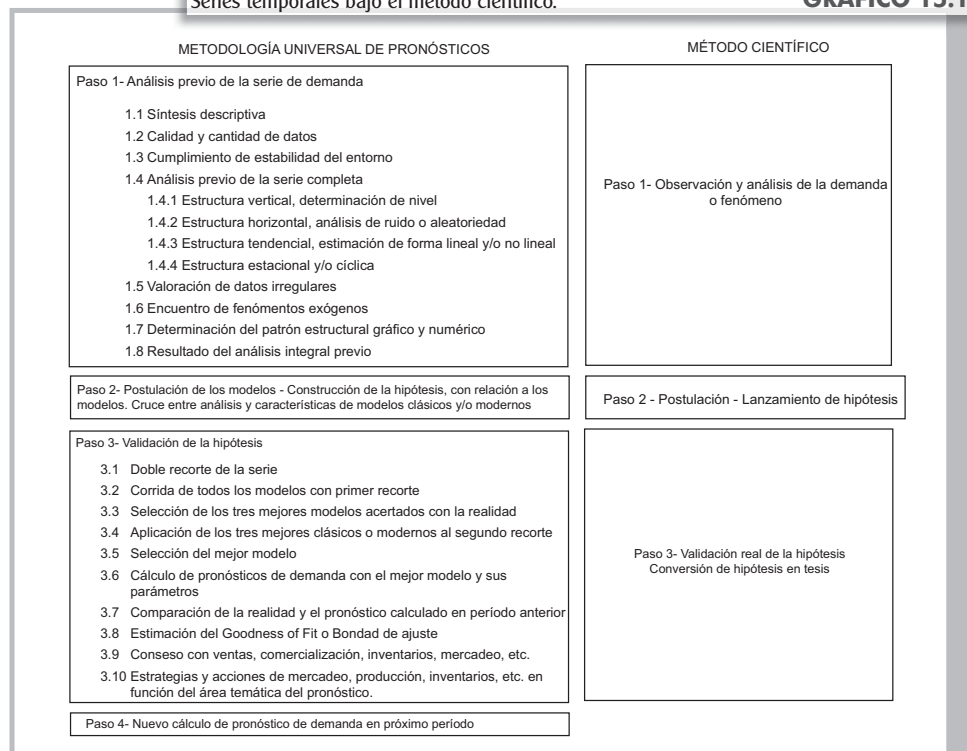
La metodología se basa netamente en el modelo científico de investigación y aplicación científica, que es lo más puro que se puede encontrar. A continuación se destacan los pasos que usa la metodología (Mora, 2007c; Molinero@, 2004).



La metodología más recomendada para conocer el futuro cercano es la de pronósticos bajo el método de series temporales, usando los modelos clásicos, de descomposición y modernos.

Series temporales bajo el método científico.

GRÁFICO 15.1



2 AR, AutoRegressive – I, Integrated – MA, Moving Average.

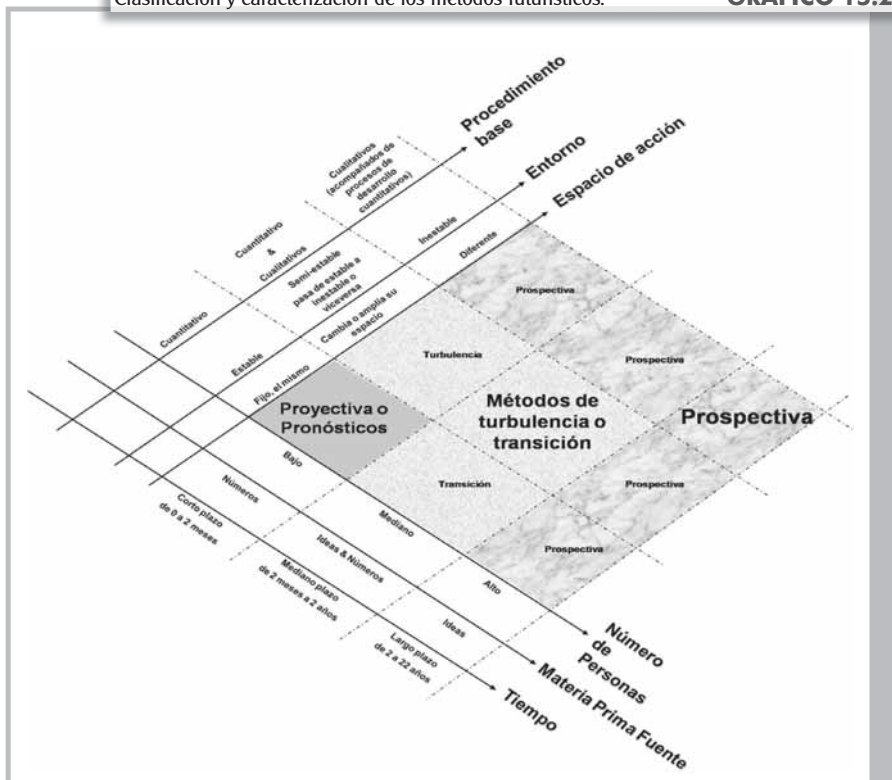
15.2.2 Clases de métodos futurísticos, según el tiempo por evaluar

Las tres grandes categorías que se establecen a la luz de esta óptica de parámetros de uso y aplicación, son:

- *Estudios proyectivos*: Básicamente son de corto plazo. Se basan en datos numéricos y sólo trabajan cuando el entorno es estable (así la variable oscile en sus valores). Lo usual es que extrapolen situaciones del pasado y del presente hacia el futuro, aunque existe la excepción de los modelos modernos denominados AR.I.MA., en las series temporales (que son capaces de detectar situaciones futuras sin relación con el pasado –que se obtienen de los residuos en las comparaciones correlacionales de los datos del pasado – al menos numéricamente).
- *Estudios de turbulencia o transición*. Son muy útiles cuando el entorno inestable se vuelve estable o a la inversa.
- *Estudios prospectivos*. Son metodologías de largo plazo que habitualmente combinan muchos métodos, que sólo se deben usar en entornos cambiantes de orden inestable; trabajan casi siempre a partir de ideas.

Clasificación y caracterización de los métodos futurísticos.

GRÁFICO 15.2



Los métodos proyectivos se caracterizan por ser aplicaciones de corto plazo y se desarrollan en entornos estables, aun cuando la variable oscile fuertemente alrededor de una media; son de orden probabilístico y en especial se definen por ser temporales, como su mismo nombre los describe.

Los métodos proyectivos se utilizan más que todo para períodos de uno o dos meses, cuando la base temporal es un mes. Cuando se trabaja en días se recomienda pronosticar hasta unos 10 días hábiles máximos, en semanas hasta dos, en horas hasta unas diez, etc., y así sucesivamente. Lo normal es que intervengan pocas personas en sus desarrollos: por un lado el (los) pronosticador (es) y por el otro el(los) experto(s) en el tema que se pronostica.

El espacio normalmente debe permanecer inmóvil, es decir, la variable kantiana del sitio debe ser fija, ya que se requiere cierto grado de estabilidad en el entorno para que se pueda proyectar con exactitud el futuro de corto plazo.

Es importante recordar que la estabilidad del contexto donde se desenvuelve el fenómeno que se pronostica debe ser constante. La base fundamental de trabajo en la proyectiva son números (valores de una variable) secuenciales en el tiempo que constituyen la serie temporal. Son estudios univariados en los cuales, por lo general, se desconoce el comportamiento de las causas que los originan o los impactan.

Los métodos proyectivos de series temporales se basan exclusivamente en una extrapolación de los datos del presente y del pasado hacia el futuro, lo cual denota que las causas que originan el comportamiento numérico en el pasado y en el presente son los mismos³ que patronean el comportamiento futuro. La temporalidad del corto plazo sólo puede ser prolongada en ciertos eventos naturales como en la astronomía, donde lo más corriente es que el entorno permanece constante, con variaciones minúsculas o insignificantes.

La estabilidad del entorno se refleja en la hipótesis según la cual las pautas que determinan el estado futuro de la variable son las mismas del pasado y del presente, que sólo presentan ciertas variaciones producto de las circunstancias del entorno, pero en todo caso pertenecientes a la variable en sí.

Estas oscilaciones se concretan en una primera división de los modelos de series temporales: unos de pauta fija que son determinísticos, en los que el patrón o la estructura del pasado permanece en el futuro, y los modelos modernos en los cuales los valores que se obtienen son la manifestación de procesos estocásticos, con ciertas estructuras que permanecen estables a futuro y que sus oscilaciones naturales pertenecen a la propia estructura de la serie evaluada.

Los pronósticos son generalmente probables; es decir, la probabilidad de ocurrencia es la misma propiedad de que ocurran en el tiempo, si



Los métodos proyectivos de series temporales se basan exclusivamente en una extrapolación de los datos del presente y del pasado hacia el futuro.

La estabilidad del entorno se refleja en la hipótesis según la cual las pautas que determinan el estado futuro de la variable son las mismas del pasado y del presente.

3 Aunque se hace la observación de que pueden aparecer ciertos datos a futuro, cuya causa no necesariamente está originada exactamente en valores anteriores.



Normalmente, el futuro que se calcula con las series temporales es cierto, mientras que en la prospectiva o en la turbulencia el porvenir es múltiple e incierto.

En los modelos proyectivos multivariados la hipótesis normal dice que las variables no se relacionan entre sí, lo que se puede entender como una limitación a este método futurístico, pero a pesar de esta condición, son muy útiles y acertados.

Además de los métodos proyectivos numéricos existen los modelos normativos que se acercan más a la prospectiva, pues se basan en la postulación de un futuro, el cual es alcanzable por distintas rutas.

se sigue la metodología universal MUP⁴, descrita anteriormente. Lo más probable es que los pronósticos se acerquen bastante a los valores reales, lo cual presupone que la proyectiva es condicionada; es decir, que el pasado explica el futuro, a diferencia de la prospectiva en que el futuro explica el pasado.

Normalmente, el futuro que se calcula con las series temporales es cierto, mientras que en la prospectiva o en la turbulencia el porvenir es múltiple e incierto. Los métodos proyectivos numéricos se adaptan pasivamente a la metodología que se desarrolla para su estimación, mientras que la prospectiva en sí es creativa y participa activamente en la creación intelectual del futuro.

En los modelos proyectivos multivariados la hipótesis normal dice que las variables no se relacionan entre sí, lo que se puede entender como una limitación a este método futurístico, pero a pesar de esta condición, son muy útiles y acertados. De aquí se deduce que la gran utilidad de los modelos proyectivos de series temporales es cuando se usan para estudios univariados y cuando de alguna manera se desconocen las causas que los imputan, pues en ese caso, donde se tenga claridad acerca de las variables que los afectan, se estudia más el futuro de estas causas, que el de la variable efecto primaria.

Además de los métodos proyectivos numéricos existen los modelos normativos que se acercan más a la prospectiva, pues se basan en la postulación de un futuro, el cual es alcanzable por distintas rutas. Las herramientas normativas tratan entonces de auscultar y decidir esas posibles alternativas y deducir la transición del presente al futuro propuesto.

Se puede definir una serie temporal como un conjunto de datos obtenidos del análisis y de las observaciones de una variable discreta durante un lapso secuencial de tiempo. Es importante recordar que existen datos no temporales, que son observaciones realizadas de una forma no hilada en el tiempo.

En general, se puede concretar que una serie temporal de datos es un conjunto de valores de una variable, asociados a otro grupo de instantes definidos de tiempo, lo que implica el estudio de dos variables, una de las cuales es el tiempo y la otra representa el fenómeno que se desea pronosticar.

Algunas de las áreas empresariales en donde se practican con intensidad los pronósticos son:

- *Previsión tecnológica:* Busca pronosticar cambios futuros en el sector en donde está ubicada la empresa, y en aquellos entornos donde se consumen los productos que se fabrican.

4 MUP, Metodología universal de pronósticos, propuesta en este libro.

- *Previsión de ventas:* Se basa en las estimaciones sobre las posibles cuotas de mercado de la empresa en cada segmento. Le permite a la organización planificar el resto de las actividades más importantes: producción, inversiones, gastos, contratación de personal, inventarios, demanda, materias primas, etc.
- *Previsiones demográficas:* Tales como tasas de natalidad, de nupcialidad, volúmenes de enfermedades, etc. Tienen interés para pronosticar las demandas de la sociedad en productos o servicios, como, por ejemplo, los cupos en las universidades o los artículos para bebés.
- *Previsión de recursos humanos:* Es una conjetura sobre las necesidades futuras de personal en las empresas en sus diferentes áreas (De Miguel, 1990).

Previsiones diferentes: Existe una amplia gama de aplicaciones sociales y empresariales.

Se deben entender los métodos de predicción como una ayuda en la toma de decisiones en las empresas, en los negocios, en los inventarios, en el comportamiento de máquinas, en las trayectorias de cuerpos, etc. Nunca se deben considerar infalibles, aunque de por sí son excelentes herramientas para el análisis.

De otro lado, si bien los pronósticos numéricos son relevantes, más importantes son los parámetros que se adquieren por parte del(los) pronosticador(es) y del equipo de expertos conocedores del fenómeno que se pronostica, para estudiar profundamente las situaciones que controlan y patronean la variable que se analiza. Es incommensurable la cantidad de beneficios y la profesionalización en el dominio de la serie que se estudia, y que se adquieren durante el desarrollo por parte de los analistas.

Es importante saber que los análisis de posición tendencial de los pronósticos son los que permiten conocer y deducir situaciones futuras, al analizar los modelos y su posición jerárquica en las últimas proyecciones que se realizan, y al hacer el análisis de la posición de los diferentes modelos de pronósticos. Este análisis consiste en observar secuencialmente durante los últimos períodos que se evalúan, la ubicación de los diferentes modelos A.R.I.M.A., y de los distintos modelos clásicos, para asumir o conjeturar sobre cuáles son las futuras posiciones que pueden asumir. Esta metodología se presenta como una ayuda complementaria.

Por ejemplo, en una serie evaluada hace cuatro períodos, el modelo de Brown (de suavización especializada para fenómenos con aleatoriedad o ruido) se ubica en el décimo lugar; hace tres períodos se hallaba en el séptimo lugar; en el estudio anterior se colocaba en el cuarto lugar y en el análisis presente se sitúa en el segundo lugar. Ello da pie para pensar que en el período dos en el futuro será el modelo que podría fijar las pautas de comportamiento de la serie, lo que permite ampliar (aunque de manera subjetiva, no científica) el espectro de validez de los pronósticos y permite tener una herramienta adicional de análisis (Mora, 2007c).

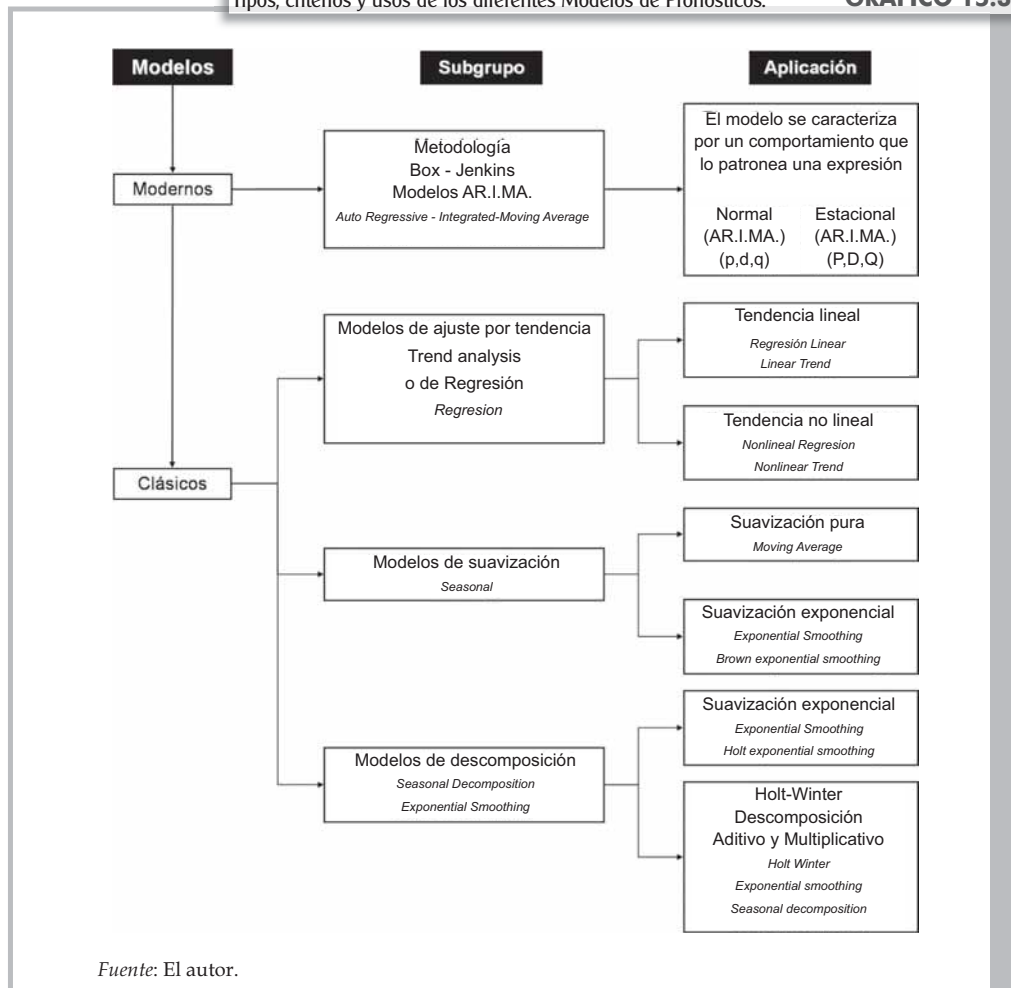


Una serie temporal de datos es un conjunto de valores de una variable, asociados a otro grupo de instantes definidos de tiempo; lo que implica el estudio de dos variables: tiempo y el fenómeno que se desea pronosticar.

Se deben entender los métodos de predicción como una ayuda en la toma de decisiones en las empresas, en los negocios, en los inventarios, en el comportamiento de máquinas, en las trayectorias de cuerpos.

Tipos, criterios y usos de los diferentes Modelos de Pronósticos.

GRÁFICO 15.3



Los modelos AR.I.MA. y Box-Jenkins son de carácter general, lo que denota que siempre existe uno de ellos que se adecua a toda serie temporal por más especial que ella sea.

15.2.3 Modelos AR.I.MA - Metodología de Box-Jenkins

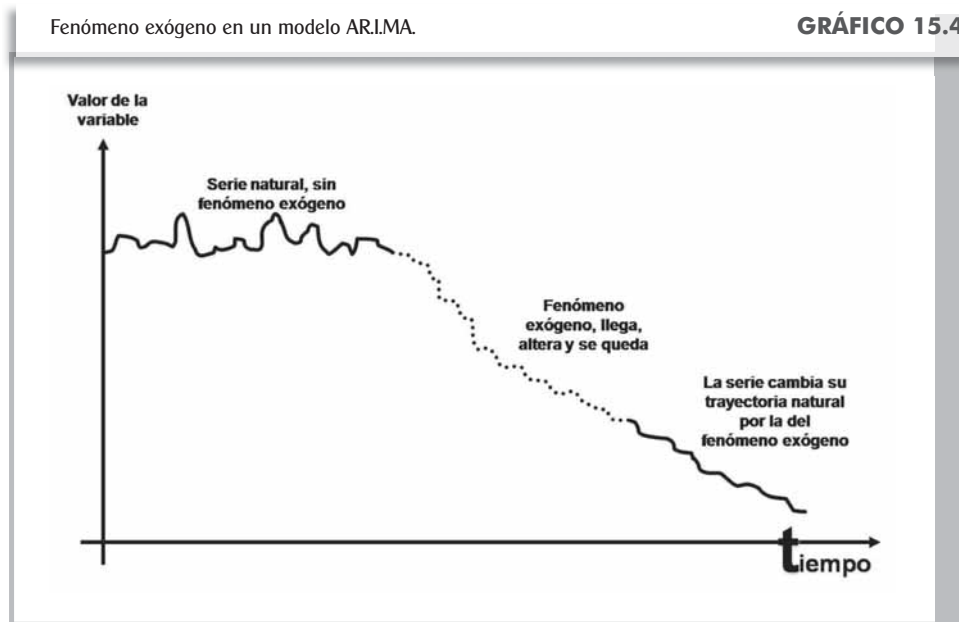
Son de carácter general, lo cual denota que siempre existe uno de ellos que se adecua a toda serie temporal por más especial que ella sea. Otro asunto es si esta modelación quizá no copia fielmente los valores reales del fenómeno evaluado; pero, en todo caso, se puede afirmar que siempre existe un modelo AR.I.MA capaz de simular toda variable temporal.

Según los procesos estocásticos, se puede afirmar que una serie temporal es una realización parcial de un proceso estocástico de parámetro de tiempo discreto.

15.2.4 Características de los AR.I.MA

- *Estocásticos*: Ya que se basan en estos procesos, no se les expresa en forma determinística con ecuaciones, sino con expresiones que involucran operadores.
- *Pronósticos*: Los modelos modernos pueden lanzar pronósticos que estén en función neta del pasado, pero también pueden predecir hechos totalmente novedosos que muy poca o ninguna relación tengan con los eventos ya descritos del pasado; como también una combinación de los anteriores pronósticos que, por una parte, dependan del pasado y, por otra, sean totalmente aleatorios.
- *Fenómenos exógenos*: Éstos se involucran, alteran la serie y pasan a formar parte de ella.
- *Simple vista*: En los modelos modernos no es factible predecir el comportamiento futuro de la serie con la simple observación humana.

Los modelos AR.I.MA, por su parte, muestran ante la presencia de fenómenos exógenos un cambio en su comportamiento, ya que adoptan en forma definitiva el perfil de este último.



15.2.5 Descripción de los modelos AR.I.MA (Modernos)

Así como los modelos clásicos tienen su inicio antes de 1950 y de ahí en adelante registran un gran desarrollo, específicamente los avances más notables se dan en los



Los modelos clásicos tienen su inicio antes de 1950 y de ahí en adelante registran un gran desarrollo, pero los avances más notables se dan en los modelos Brown (1959), en los Holt (1952), en los Winters (1960) y en los de descomposición (entre 1957 y 1961)

Los modelos modernos de promedio móvil autorregresivo AR.I.MA, son más generales y teóricos que los de ajuste por tendencia, que los de suavización y que los de descomposición.

Las técnicas de los modelos AR.I.MA. se basan en una síntesis de los patrones históricos de los datos, y son una clase especial de métodos de filtrado que desconocen por completo a las variables independientes..

modelos de Brown en 1950, en los de Holt en 1952, en los de Winters en 1960 y en los modelos de descomposición entre 1957 y 1961 (con Shiskin, del *Census Bureau* de los EE.UU.).

Con la aparición de computadores más eficaces y mayor cantidad de aplicaciones estadísticas, ocurren varios desarrollos relevantes en todos los métodos existentes hasta ese momento. Sin embargo, entre las décadas de 1950 y 1960 se buscan la unificación y la integración de todos estos avances, lo cual sucede gracias a que es puesta al servicio de la humanidad bajo la metodología de Box y Jenkins una técnica integradora, cuyos desarrolladores en 1976 involucran una práctica sistemática para el análisis de todo tipo de estructura de series de tiempo de una forma general. De esto se deduce que es un método genérico que sirve para analizar todo conjunto temporal de datos, con las estructuras y formas que posea, sean cuales fueren.

Los modelos modernos de promedio móvil autorregresivo AR.I.MA son más generales y teóricos que los de ajuste por tendencia, que los de suavización y que los de descomposición. Son capaces de tratar todo patrón de datos y a la vez son aptos para establecer directamente un modelo estadístico de clase general que simule más adecuadamente la serie de datos temporales, en vez de usar modelos estrechos o específicos, como los clásicos.

Herramientas básicas para la aplicación de estos modelos son la autocorrelación y los promedios móviles; los hay desde unos muy simples hasta más avanzados que usan la metodología Box-Jenkins, aunque existen otros más sofisticados como los modelos ARARMA de Parzen⁵, el filtrado AEP o de Kalman, o variaciones como el FORSYS de Lewandowski y los multivariantes AR.I.MA (Mora, 2007c).

Las técnicas de los modelos AR.I.MA se basan en una síntesis de los patrones históricos de los datos, y son una clase especial de métodos de filtrado que desconocen por completo a las variables independientes. Son herramientas de alto refinamiento que utilizan los valores reales y anteriores de la variable dependiente para generar pronósticos bastante exactos de corto plazo. Y son muy apropiadas cuando los valores de la serie que se pronostica están correlacionados o son dependientes estadísticamente entre sí.

15.2.6 Metodología de Box-Jenkins

Nace en 1976, con la publicación del libro *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, de G. E. P. Box, profesor de estadística de la Universidad

5 El modelo ARARMA de Parzen permite mejorar el espectro de la estacionariedad (centramiento de la media y eliminación del ruido o aleatoriedad o desviación estándar) de la metodología de Box-Jenkins con el operador diferencia, a la vez que amplía el uso de Box-Jenkins y facilita la aplicación más generalizada de los modelos modernos de series temporales.

de Wisconsin EE. UU., y de G. M. Jenkins, profesor de ingeniería de sistemas de la Universidad de Lancaster (Inglaterra), quienes generan un proceso novedoso en el análisis de series temporales en la realización de un trabajo sobre contaminación en la bahía de San Francisco, a fin de lograr mejores herramientas de procesos y control de pronósticos. El modelo que desarrollan alcanza un gran éxito y se constituye en la metodología conocida como Box-Jenkins de A.R.I.M.A.

La metodología Box-Jenkins de pronósticos es bastante particular y muy diferente de la mayoría de los demás métodos de previsiones: ella no asume un patrón específico de los valores de la serie que se pronostica, sino que utiliza un modelo basado en iteraciones que permiten identificar el mejor modelo a partir de patrones de tipo general.

El modelo se ajusta siempre y cuando los residuos entre el modelo real y el seleccionado sean bajos y se distribuyan de una forma aleatoria e independiente a lo largo del tiempo. Este proceso se repite sucesivamente hasta alcanzar el modelo que más se ajuste a estas especificaciones. Son, especialmente, apropiados para series estacionarias en media, denominación esta que se otorga a las series históricas cuyo promedio no varía significativamente a través del tiempo.

La selección del modelo apropiado se realiza mediante la comparación de la distribución de los coeficientes de autocorrelación simple (ACF) y parcial (PACF) con los modelos teóricos que se presentan más adelante en el *Gráfico 15.5* definido como *Diferentes correlogramas* para identificar a p , q , P o Q .

La metodología de Box Jenkins se lleva a cabo en tres etapas:

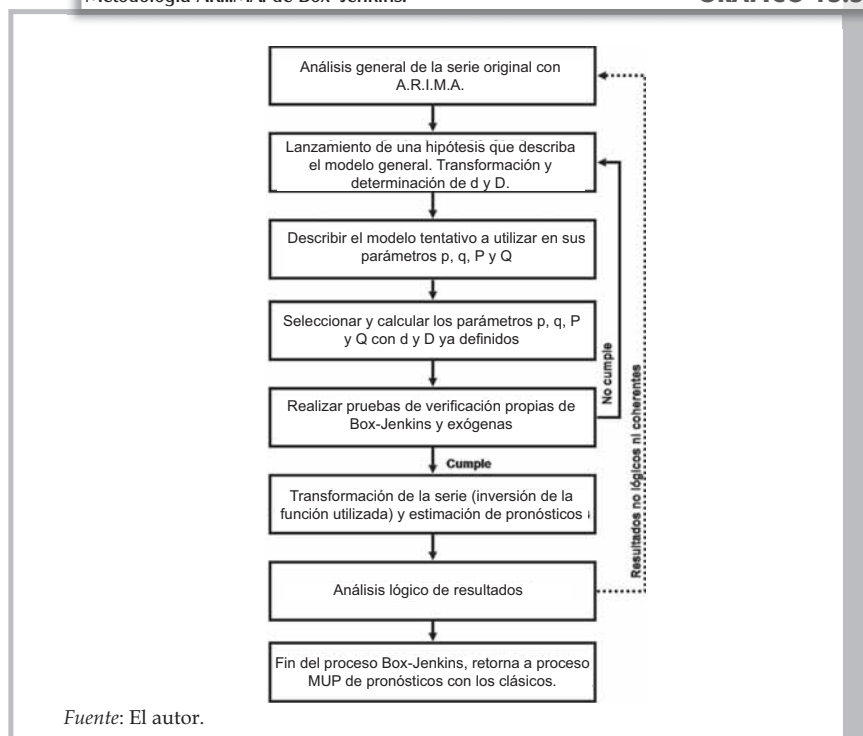
- Identificación del modelo
- Estimación del modelo y prueba de su ajuste
- Previsiones con el modelo ajustado que se selecciona



La metodología Box-Jenkins utiliza un modelo basado en iteraciones que permiten identificar el mejor modelo a partir de patrones de tipo general; es decir, no asume un patrón específico de los valores de la serie.

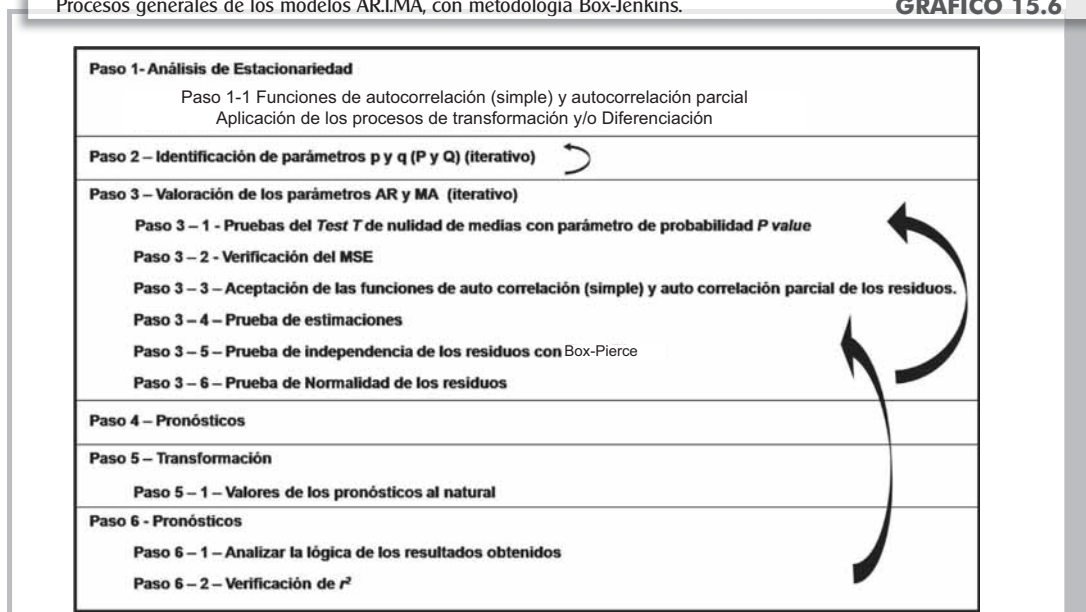
Metodología AR.I.M.A. de Box-Jenkins.

GRÁFICO 15.5

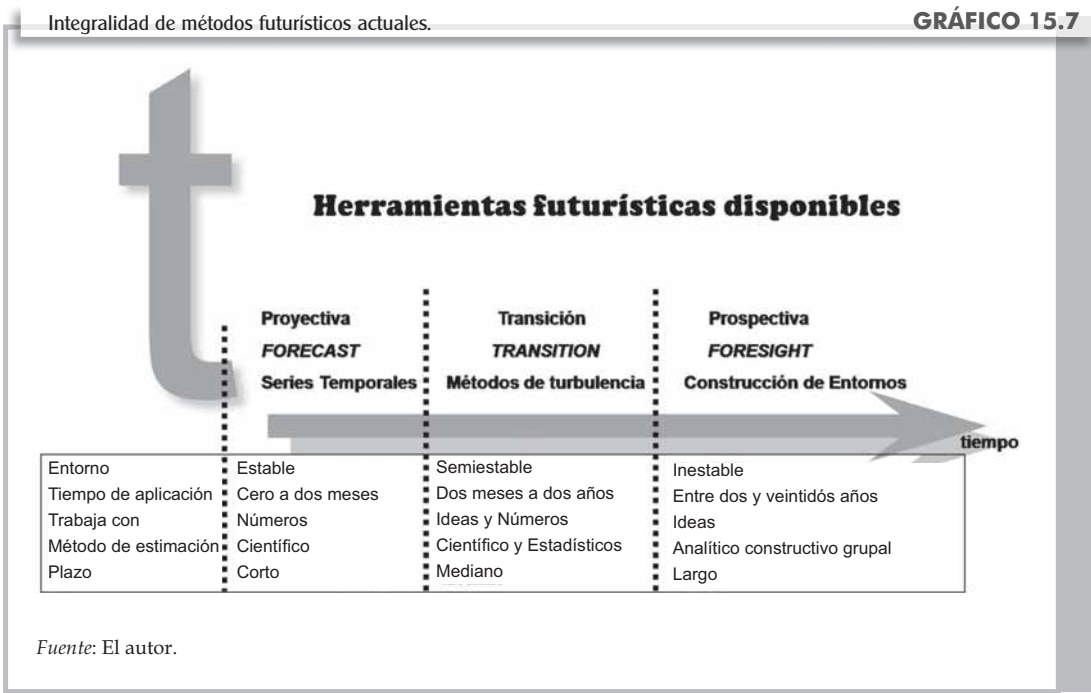


Procesos generales de los modelos AR.I.M.A, con metodología Box-Jenkins.

GRÁFICO 15.6



En el *Gráfico 15.6* el símbolo de flecha curva denota que es iterativo, o que puede regresar al paso anterior si no se cumplen las expectativas de esa sección en particular.



La medición se hace inicialmente para las turbinas, punto a punto, por cada evento que ocurre, lo cual genera la serie temporal: se toma el último dato el cual se reserva. Posteriormente, con la metodología universal de pronósticos con series temporales, se calcula este último dato real y se comparan los resultados, con lo que se obtienen en general unos buenos resultados con el pronósticos de los parámetros con la metodología de eventos que ocurren cada mes.

Los resultados que se registran y pronostican, son:

Mediciones CMD en turbinas pronosticadas con series temporales.

GRÁFICO 15.8

Series pronosticadas con SERIES TEMPORALES			No Confiabilidad Planeada					Mantenibilidad Planeada					No Confiabilidad No Planeada					Mantenibilidad No Planeada				
Ítem No.	FECHA	Año Mes	Ítem MTBM	Élita q MTBM	MTBM	Ítem No.	Élita q MTBM	M ₀	Ítem MTBM	Élita q MTBM	MTBM	Ítem MTBM	Élita q MTBM	MTBM	Ítem MTBM	Élita q MTBM	MTBM					
	Año 1 - Mes 1																					
	Año 1 - Mes 2																					
	Año 1 - Mes 3																					
	Año 1 - Mes 4																					
	Año 1 - Mes 5																					
	Año 1 - Mes 6																					
	Año 1 - Mes 7																					
	Año 1 - Mes 8																					
	Año 1 - Mes 9																					
	Año 1 - Mes 10																					
	Año 1 - Mes 11																					
	Año 1 - Mes 12																					
	Año 2 - Mes 1																					
	Año 2 - Mes 2																					
	Año 2 - Mes 3																					
	Año 2 - Mes 4																					
	Año 2 - Mes 5																					
	Año 2 - Mes 6																					
1	Año 2 - Mes 7	2.34	8122.05	7197.06		0.62	8.22	11.91														
2	Año 2 - Mes 8	0.34	8122.05	7197.06		0.62	8.22	11.91	0.71	1020.77	1268.61											
3	Año 2 - Mes 9	2.34	8122.05	7197.06		0.62	8.22	11.91	0.71	1020.77	1268.61											
4	Año 2 - Mes 10	2.34	8122.05	7197.06		0.62	8.22	11.91	0.71	1020.77	1268.61											
5	Año 2 - Mes 11	1.66	6631.60	5926.00		0.78	10.00	11.57	0.66	1032.96	1377.56											
6	Año 2 - Mes 12	1.66	6631.60	5926.00		0.78	10.00	11.57	0.68	1080.33	1413.34											
7	Año 3 - Mes 1	1.66	6631.60	5926.00		0.78	10.00	11.57	0.68	1080.33	1413.34											
8	Año 3 - Mes 2	1.62	5760.80	5160.03		0.88	11.13	11.82	0.69	1147.57	1481.48											
9	Año 3 - Mes 3	1.62	5760.80	5160.03		0.88	11.13	11.82	0.71	1113.40	1391.11											
10	Año 3 - Mes 4	1.62	5760.80	5160.03		0.88	11.13	11.82	0.73	1106.32	1349.62											
11	Año 3 - Mes 5	1.61	5069.09	4541.20		0.98	11.63	11.71	0.77	1040.51	1211.93											
12	Año 3 - Mes 6	1.61	5069.09	4541.20		0.98	11.63	11.71	0.77	1040.51	1211.93											
13	Año 3 - Mes 7	1.61	5069.09	4541.20		0.98	11.63	11.71	0.77	1040.51	1211.93											
14	Año 3 - Mes 8	1.61	5069.09	4541.20		0.98	11.63	11.71	0.77	1040.51	1211.93											
15	Año 3 - Mes 9	1.61	5069.09	4541.20		0.98	11.63	11.71	0.77	1115.73	1299.36											
16	Año 3 - Mes 10	1.61	5069.09	4541.20		0.98	11.63	11.71	0.77	1115.73	1299.36											
17	Año 3 - Mes 11	1.61	5069.09	4541.20		0.98	11.63	11.71	0.77	1115.73	1299.36											
18	Año 3 - Mes 12	1.61	5069.09	4541.20		0.98	11.63	11.71	0.77	1115.73	1299.36											
19	Año 4 - Mes 1	1.61	5069.09	4541.20		0.98	11.63	11.71	0.77	1115.73	1299.36											
20	Año 4 - Mes 2	1.61	5069.09	4541.20		0.98	11.63	11.71	0.77	1115.73	1299.36											
21	Año 4 - Mes 3	1.76	5442.17	4844.85		1.21	10.12	9.50	0.77	1115.73	1299.36											
22	Año 4 - Mes 4	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72	0.77	1115.73	1299.36											
23	Año 4 - Mes 5	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72	0.76	1229.04	1474.16											
24	Año 4 - Mes 6	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72	0.77	1262.90	1471.19											
25	Año 4 - Mes 7	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72	0.77	1262.90	1471.19											
26	Año 4 - Mes 8	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72	0.78	1273.93	1465.26											
27	Año 4 - Mes 9	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72	0.78	1273.93	1465.26											
28	Año 4 - Mes 10	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72	0.78	1273.93	1465.26											
29	Año 4 - Mes 11	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72	0.78	1273.93	1465.26											
30	Año 4 - Mes 12	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72	0.78	1273.93	1465.26											
31	Año 5 - Mes 1	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72	0.78	1273.93	1465.26											
32	Año 5 - Mes 2	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72	0.78	1273.93	1465.26											
33	Año 5 - Mes 3	0.59	2902.16	4355.30		1.46	7.17	6.42	0.77	1391.27	1617.26											
34	Año 5 - Mes 4	0.37	2500.63	3680.28		1.51	8.13	7.33	0.77	1391.27	1617.26											
35	Año 5 - Mes 5	0.47	1957.16	4334.66		1.11	7.18	6.90	0.79	1388.73	1593.45											
36	Año 5 - Mes 6	0.49	1891.45	3894.12		1.13	7.42	7.09	0.79	1388.73	1593.45											
37	Año 5 - Mes 7	0.49	1891.45	3894.12		1.13	7.42	7.09	0.80	1400.84	1599.49											
38	Año 5 - Mes 8	0.49	1891.45	3894.12		1.13	7.42	7.09	0.81	1405.69	1579.61											
39	Año 5 - Mes 9	0.49	1891.45	3894.12		1.13	7.42	7.09	0.81	1405.69	1579.61											
40	Año 5 - Mes 10	0.49	1891.45	3894.12		1.13	7.42	7.09	0.82	1426.06	1589.37											
41	Año 5 - Mes 11	0.50	2017.99	4000.94		1.15	7.72	7.35	0.82	1426.06	1589.37											
42	Año 5 - Mes 12	0.50	2017.99	4000.94		1.15	7.72	7.35	0.84	1397.09	1529.60											
43	Año 6 - Mes 1	0.50	2017.99	4000.94		1.15	7.72	7.35	0.84	1397.09	1529.60											
44	Año 6 - Mes 2	0.50	2017.99	4000.94		1.15	7.72	7.35	0.84	1397.09	1529.60											
45	Año 6 - Mes 3	0.50	2017.99	4000.94		1.15	7.72	7.35	0.84	1397.09	1529.60											
46	Año 6 - Mes 4	0.50	2017.99	4000.94		1.15	7.72	7.35	0.85	1418.70	1543.39											
47	Año 6 - Mes 5	0.52	2081.95	3829.24		1.03	7.72	7.62	0.80	1353.00	1534.99											
48	Año 6 - Mes 6	0.52	2081.95	3829.24		1.03	7.72	7.62	0.80	1353.00	1534.99											
49	Año 6 - Mes 7	0.52	2081.95	3829.24		1.03	7.72	7.62	0.80	1353.00	1534.99											
50	Año 6 - Mes 8	0.52	2081.95	3829.24		1.03	7.72	7.62	0.80	1401.21	1598.72											
51	Año 6 - Mes 9	0.52	2081.95	3829.24		1.03	7.72	7.62	0.81	1375.13	1542.36											
52	Año 6 - Mes 10	0.52	2081.95	3829.24		1.03	7.72	7.62	0.82	1323.32	1475.23											
53	Año 6 - Mes 11	0.53	2233.92	4026.93		1.06	7.56	7.39	0.83	1330.21	1472.49											
54	Año 6 - Mes 12	0.53	2233.92	4026.93		1.06	7.56	7.39	0.83	1330.21	1472.49											
55	Año 7 - Mes 1	0.53	2233.92	4026.93		1.06	7.56	7.39	0.83	1330.21	1472.49											
56	Año 7 - Mes 2	0.54	2312.83	4044.50		1.07	7.81	7.60	0.83	1330.21	1472.49											
57	Año 7 - Mes 3	0.56	2250.34	3775.87		1.10	7.75	7.48	0.84	1332.60	1460.71											
58	Año 7 - Mes 4	0.56	2250.34	3775.87		1.10	7.75	7.48	0.84	1332.60	1460.71											
59	Año 7 - Mes 5	0.56	2250.34	3775.87		1.10	7.75	7.48	0.84	1332.60	1460.71											
60	Año 7 - Mes 6	0.57	2284.94	3719.53		1.11	7.98	7.68	0.84	1332.60	1460.71											
61	Año 7 - Mes 7	0.58	2226.94	3506.54		1.13	7.67	7.34	0.84	1332.60	1460.71											
62	Año 7 - Mes 8	0.58	2226.94	3506.54		1.13	7.67	7.34	0.85	1302.76	1417.36											
63	Año 7 - Mes 9	0.58	2226.94	3506.54		1.13	7.67	7.34	0.85	1302.76	1417.36											
64	Año 7 - Mes 10	0.59	2288.90	3530.54		1.14	7.88	7.52	0.85	1302.76	1417.36											
65	Año 7 - Mes 11	0.59	2288.90	3530.54		1.14	7.88	7.52	0.85	1302.76	1417.36											
66	Año 7 - Mes 12	0.59	2288.90	3530.54		1.14	7.88	7.52	0.85	1302.76	1417.36											
Real Año 7 - Mes 12			0.59	2288.90	3530.54	1.14	7.88	7.52	0.85	1302.76	1417.36	1.13	3.32	3.19								
Error Goodness of Fit			-34.10%	-27.71%	0.81%	69.73%	10.46%	-9.38%	-12.99%	-11.70%	2.89%	11.24%	0.25%	9.34%	-0.07%	-0.50%	-2.06%					
Pronósticos			Pronósticos	Pronósticos	Fórmula	Pronósticos	Pronósticos	Pronósticos	Fórmula	Pronósticos	Pronósticos	Pronósticos	Fórmula	Pronósticos	Pronósticos	Pronósticos	Fórmula					
Año 7 - Mes 1			0.39	1654.54	3558.97	5992.52	1.26	7.14	6.55	6.64	0.87	1449.23	1420.96	1540.77	1.13	3.32	3.12					
Año 7 - Mes 2			0.37	1618.77	3499.04	6577.08	1.26	7.11	6.48	6.60	0.87	1457.98	1424.56	1565.37	1.13	3.32	3.17					
Año 7 - Mes 3			0.36	1626.29	3484.35	6585.07	1.26	7.11	6.48	6.61	0.87	1450.19	1424.56	1566.31	1.13	3.32	3.18					
MODELO			0.36	1474.16	3332.81	6762.58	1.34	6.98	6.22	6.41	0.88	1509.71	1434.70	1607.52								

Ayuda en la



Cálculo de
Pronósticos
Clásicos de
series temporales

Ver en la Web Programa- Cálculo de Pronósticos Clásicos de series temporales.

Este programa en Excel permite el cálculo de pronósticos con los modelos clásicos, para lo cual existen muchos y diversos programas para AR.I.MA y clásicos como *Centurion Statgraphics XV*, *Forecast Pro*, *Vanguard Decision Making*, *Logarex*, *Forecast Expert trial*, *Minitab*, etc., que permiten cálculos muy exactos de pronósticos, con errores de un dígito en promedio.

Retomando el tema de CMD, se sugieren algunos análisis complementarios, para lograr predicciones ajustadas a la realidad futura:

15.2.7 En confiabilidad

- Estadística descriptiva y presentación gráfica de la información.
- Diagramas de Pareto.
- Histogramas.
- Tendencias y comportamientos de parámetros, evaluados como series temporales con pronósticos.
- Test actuarial, para obtener la curva de tasa de fallas.
- Test de confiabilidad, para determinar los equipos más críticos en C.
- Test no paramétricos de Mann y Proskan-Pyke, para determinar el comportamiento presente y futuro de la tasa de fallas.
- Construcción de leyes, mediante el estudio de probabilidades, la utilización del modelo universal que se presenta en la segunda parte con el apoyo de todas las distribuciones ya citadas y las pruebas estadísticas y de bondad de ajuste mencionadas en secciones anteriores.

Para mantenibilidad se recomienda la construcción y determinación de leyes a partir de su evaluación con el modelo universal CMD propuesto, el uso de distribuciones, y demás parámetros ya establecidos.

Para disponibilidad se propone usar la estadística descriptiva junto con la determinación de leyes que permitan su constante medición, interpretación y análisis para definir tácticas y estrategias adecuadas de mantenimiento y producción (Díaz, 1992).



Para mantenibilidad se recomienda la construcción y determinación de leyes a partir de su evaluación con el modelo universal CMD propuesto, el uso de distribuciones, y demás parámetros ya establecidos.

Para disponibilidad se propone usar la estadística descriptiva junto con la determinación de leyes que permitan su constante medición, interpretación y análisis para definir tácticas y estrategias adecuadas de mantenimiento y producción.

CAPÍTULO 16

DIFERENTES NIVELES DE CÁLCULO PARA EL CMD FASES

El cálculo y la estimación del CMD se desarrollan en niveles, y lo habitual es que en su orden sean inicialmente casos sencillos de elementos individuales con evaluación mediante promedios numéricos aritméticos simples. Una vez se domina esto se procede con cálculos basados en las distribuciones descritas en las partes anteriores.

Luego de superar esta etapa se pasa a la estimación de conjuntos de elementos, es decir, sistemas o máquinas complejas. Igual que en el anterior, se cubre en primera instancia con promedios matemáticos simples, y en seguida se procede a un nivel superior mediante cálculos con distribuciones. Se parte de la premisa de que se reconocen sólo dos posibles estados (falla SoFa o funcionamiento SoFu) para los elementos o las máquinas (Lewis, 1995).

Un estrato superior de análisis CMD da la posibilidad de hacer estudios CMD mediante la asunción de múltiples estados posibles de ocurrir en un sistema entre falla (*SoFa*), y operación normal (*SoFu*) y la evaluación de sus probabilidades de transición entre estos estados, bajo modelos de Markov y toda su evaluación. También es factible evaluar los parámetros del CMD mediante las técnicas de simulaciones de Montecarlo (Díaz, 1992).

Por último, en los análisis de las diferentes distribuciones hasta ahora citadas, se trabaja solamente en una fase de la curva de la bañera o de la tasa de fallas. Conviene precisar que existen alternativas de análisis con otras distribuciones que evalúan dos y tres fases.

El estudio de la vida útil integral mediante la evaluación completa de las tres fases o parcial con la revisión de dos fases, toma acentuado interés en el mundo actual en los autores especializados en el tema CMD.



Para disponibilidad se propone usar la estadística descriptiva junto con la determinación de leyes que permitan su constante medición, interpretación y análisis para definir tácticas y estrategias adecuadas de mantenimiento y producción.

El cálculo y la estimación del CMD se desarrollan en niveles, y lo habitual es que en su orden sean inicialmente casos sencillos de elementos individuales con evaluación mediante promedios numéricos aritméticos simples.

16.1 DISTRIBUCIÓN DE HASTINGS DE DOS FASES

Entre las distribuciones factibles de cubrir dos etapas de la curva de tasa de fallas está Hastings, la cual se deriva de la adición en el tiempo de dos funciones de tasa de fallas de la distribución de Weibull, que en la primera etapa (izquierda) trabaja con dos parámetros y en la fase final (derecha) trabaja con tres.

► ECUACIÓN 16.1 - Distribución de Hastings

$$\begin{aligned} \text{Tasa de Fallas} &= \text{Lambda}(t) = k \cdot \lambda * C \cdot t^{C-1} + (1 - k) \cdot b \cdot t^{b-1} \cdot \beta \cdot \exp^{\beta \cdot t^b} \\ \text{Función de confiabilidad} &= R(t) = \exp(-k \cdot \lambda \cdot t^C - (1 - k) \cdot (\exp b \cdot t^b - 1)) \end{aligned}$$

con sus características definidas como:

Beta y Lambda son los factores de escala.

b y C son factores de forma

C, β y $\lambda > 0$

k está entre 0 y 1

Hastings tiene algunos casos especiales, cuando:

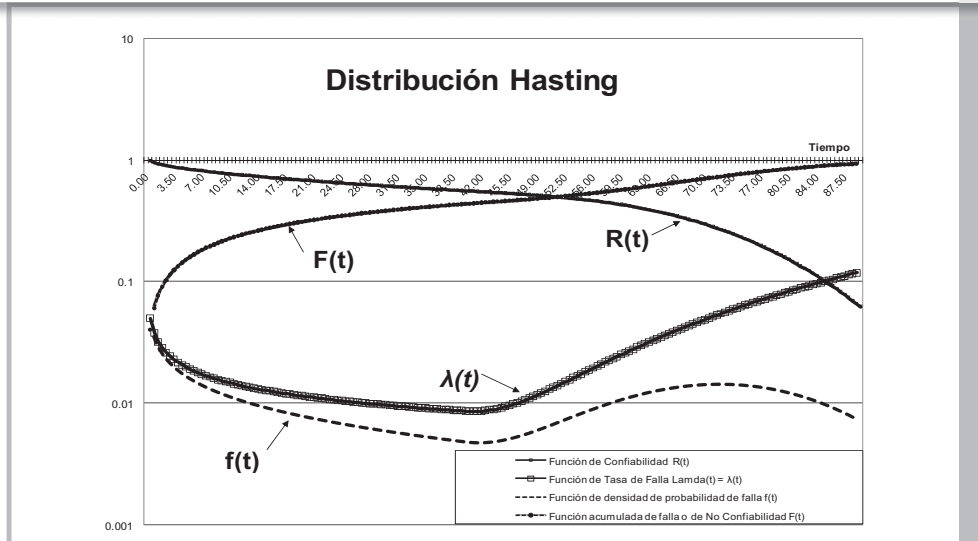
$k=1$ es Weibull

$k=0$ y $b=1$ se trata de la distribución de valores extremos

$C=0,5$ y $b=1$ es una curva de la bañera (Ramakumar, 1996).

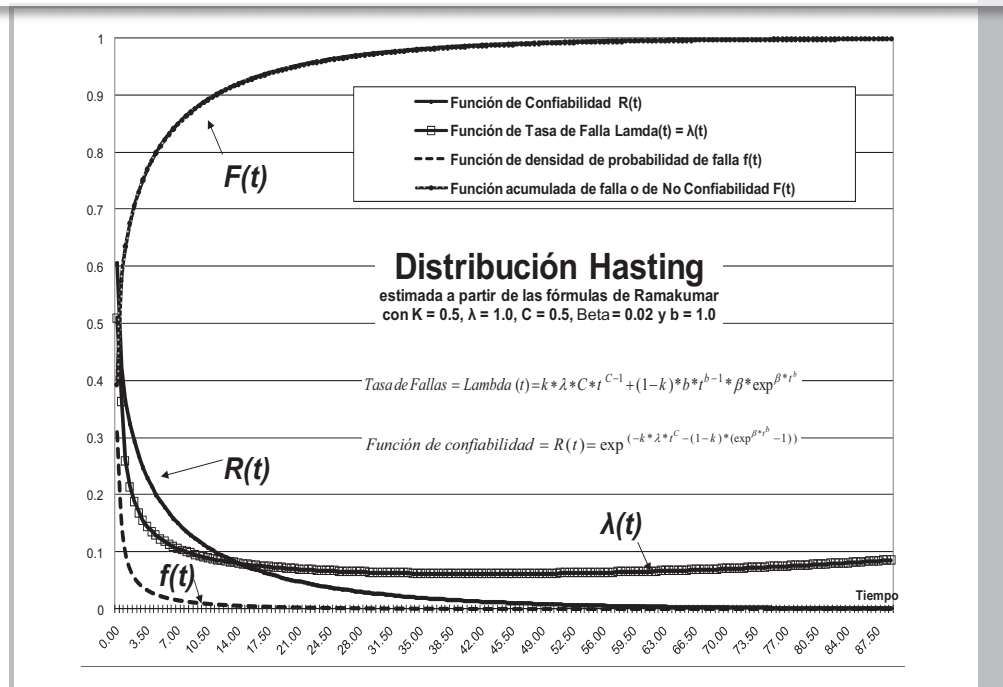
Ejemplo de curvas características de la distribución de Hastings de dos fases, basada en Weibull de 2 y 3 parámetros.

GRÁFICO 16.1



Ejemplo de curvas características de la distribución de Hastings con fórmulas de Ramakumar.

GRÁFICO 16.2



16.2 DISTRIBUCIÓN DE HJORTH DE TRES FASES

El cálculo estadístico de las funciones de falla utiliza además otras distribuciones de mayor complejidad que empiezan a tomar mayor relevancia. Dos de éstas son la función *Increasing Decreasing Bathtub .IDB*, propuesta por Hjorth y la distribución general. En ambos casos se tiene un cubrimiento total del ciclo de vida del sistema o elemento que se evalúa, al tener las tres fases de la tasa de fallas con alguna de estas distribuciones, o con otras que tengan características similares.

El modelo que presenta Hjorth reconoce que ninguna de las distribuciones normalmente mencionadas proporciona realmente funciones de riesgo en forma de curva de la bañera, por lo cual él sugiere el uso de una distribución *IDB* (Knezevic, 1996). La distribución de Hjorth representa el ciclo integral de vida útil del equipo en sus tres fases.

► ECUACIÓN 16.2 - Función de densidad de Hjorth

$$f(t) = [1 + s * t]^{\frac{f}{s}} * \exp\left[-\frac{\left(\frac{t}{m}\right)^2}{2}\right] * \left(\left[\frac{t}{m}\right]^2 + \frac{f}{(1 + s * t)}\right)$$

Donde:

m es el parámetro de posición de la distribución Hjorth, s es el parámetro de vida característica y f es el parámetro de forma.

Con los argumentos de los siguientes vectores:

t es de respuesta

q es de quantiles

p es de probabilidades

m es de parámetros de situación

s es de parámetros de la vida característica

f es de parámetros de forma

Con un número n de valores para realizar (Hjorth@, 2005).

La distribución general, por su parte, trabaja con cuatro parámetros: dos de escala (β, λ) y dos de forma (b, c). Con la selección apropiada de estos cuatro parámetros, la distribución puede modelar el comportamiento de muchos componentes. Cuando $c = 0,5$ y $b = 1$ adquiere la forma de la curva de la bañera (Ramakumar, 1996), para cubrir de esta manera el ciclo total de vida esperada de un elemento o sistema.

RESUMEN

Aplicación CMD. Estrategias y acciones

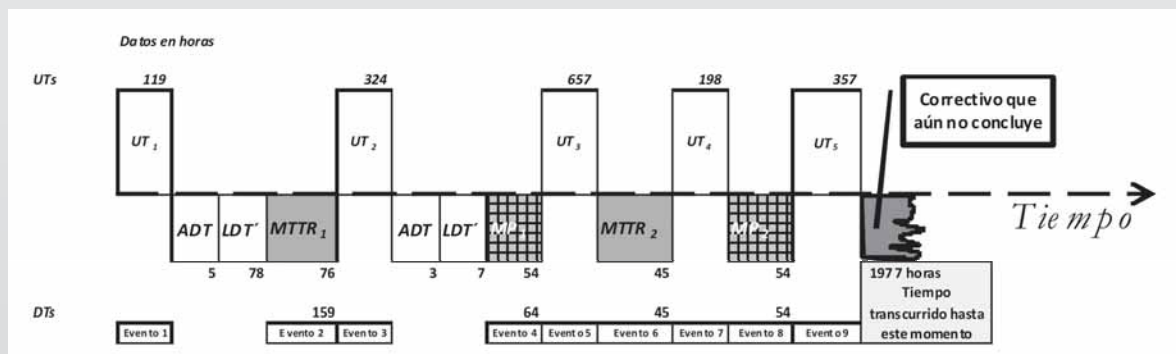
Esta cuarta parte muestra diferentes aplicaciones reales e integrales de una predicción CMD, bajo la metodología puntual, de distribuciones y con series temporales, que cubren totalmente la promesa de la metodología propuesta universal de CMD. Muestra, a su vez, otras distribuciones especiales que complementan el conocimiento de las diferentes opciones de ellas, con sistemas más complejos.

PREGUNTAS, DESARROLLOS, FOROS Y EJERCICIOS

- Explique en qué principio se fundamenta el cálculo de valores futuros de los CMD, a partir de los conceptos de MTBMC y MTBMP para disponibilidades alcanzada, operacional y operacional generalizada.
- ¿Cómo se estiman y se grafican los valores futuros para disponibilidades genérica e inherente?
- Explique los criterios de la curva de la bañera, por medio de los cuales en un cálculo por distribuciones los valores de los Betas de $MTBMC$, $MTBMP$, $MTTR$ y M_p , deben estar entre ciertos rangos de valor, para que el ejercicio se acepte como válido y coherente. Use la curva de la bañera o de Davies para su explicación y fundamentación técnica.
- Describa la metodología en la cual las predicciones de series temporales se apoyan en el método científico, para su fundamentación y desarrollo de pronósticos confiables.
- Defina al menos tres diferencias entre los modelos clásicos de previsiones y los Modelos AR.I.MA.
- ¿Cuáles son las principales características de la distribución de Hastings para dos y tres fases? ¿En qué valores de c y b la distribución de Hastings se comporta como la curva de la bañera?
- ¿Qué otras herramientas y análisis complementarios recomendaría usted para el cálculo, la estimación, la predicción y graficación de valores y parámetros CMD, en confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad? Describa técnicamente cada recomendación.
- Explique al menos tres ventajas y limitaciones de realizar cálculos CMD, después de cada evento, analizando los diferentes valores y parámetros frente al método integral total.

Integral de la cuarta parte

EJERCICIO 16.1



Problema 1 - Esquematice los mapas no planeado (correctivo y/o modificativo) y planeado (preventivos y/o predictivos).

Problema 2 - Realice los cálculos puntuales de $MTBF$, $MTTR$ y de la disponibilidad.

Problema 3 - Seleccione la disponibilidad más apropiada y calcule todos los valores correspondientes con el método puntual, compare con la anterior y explique el porqué de la diferencia.

Problema 4 - Con la disponibilidad más apropiada, calcule, en cada uno de los eventos, todos los parámetros y los valores correspondientes con el método de distribuciones, utilizando los métodos i-kaésimo, tabla de rango de medianas, Benard de rango de medianas y Kaplan-Meier. Utilice el método de Excel de regresión para el cálculo en la alineación, determine β y η en cada caso. Calcule los valores necesarios de disponibilidad y establezca el porqué de las diferencias con los procesos anteriores. Examine los valores de Beta para $MTBM_C$, $MTBM_p$, $MTTR$, M_p y verifique que estén en la zona correcta de la curva de la bañera. Realice las predicciones futuras en horas de $MTBM_C$, $MTBM_p$, $MTTR$ y M_p , tanto para el cálculo con distribuciones como para el método puntual, para el 10% del tiempo actual, como mínimo.

Problema 5 - Grafique los valores de $MTBM_C$, $MTBM_p$, $MTTR$ y M_p , los Betas, los Etas (η), $MTBM$, M promedio, ajuste, error, R , R^2 , bondad de ajuste, etc., para cada uno de los eventos individuales y para el grupal. Ilustre cada parámetro para observar sus tendencias futuras.

Ayuda en la



Cálculo de CMD,
parámetros, curvas
y bondad de ajuste

Problema 6 - Calcule los valores de $MTBM_C$, $MTBM_p$, $MTTR$ y M_p , mediante diferentes distribuciones y métodos de parametrización y alineación con el Programa - Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste de la Web. Analice los diferentes resultados obtenidos de cada evento, grafique cada una de las curvas de los valores CMD y de sus parámetros, y comente su ubicación estratégica con la curva de Davies o de la bañera, defina las tácticas y acciones por realizar en cada caso, de acuerdo con los futuros establecidos y calculados.

NIVEL INSTRUMENTAL

QUINTA PARTE

OBJETIVOS

Diferenciar los elementos e instrumentos fundamentales de mantenimiento, para que el departamento o área pueda operar, de tal modo que se establezcan los principios y diferencias básicas de cada división (básico, avanzado de orden genérico, avanzado específico y avanzado específico de orden técnico de mantenimiento). Con el fin de poder correlacionar este nivel instrumental con los demás y saber los grados de desarrollo mínimos requeridos, para poder implementar total o parcialmente el nivel operativo y/o táctico y/o estratégico; como también las influencias del nivel instrumental en todos los campos y tareas del mantenimiento industrial (véase *Gráfico 2.10*, “Enfoque sistémico integral kantiano de mantenimiento estratégico) – Nivel 2 – Comprender – Escala de Bloom, Barret y Gagné (Gagné@, y otros, 2008).

INTRODUCCIÓN

Mediante un ejemplo real, la cuarta parte muestra una aplicación integral con todos y cada uno de los pasos mínimos requeridos para predecir el comportamiento CMD, con la utilización y el refuerzo de todos los conceptos desarrollados en las partes segunda y tercera, para pronosticar el comportamiento futuro del mantenimiento y de la operación de las máquinas, líneas de producción o fábricas.

El desarrollo del *nivel instrumental*, que consta de todos los elementos reales y mentales requeridos para que el área de mantenimiento funcione, expone que el grado de evolución en el área de mantenimiento y producción está enmarcado en los cuatro niveles descritos en el *Gráfico 3.7 - Elementos estructurales de ingeniería de fábricas*, según el cual cada empresa avanza en forma vertical ascendente en las diferentes etapas.

Normalmente, el grado de desarrollo implica que la organización se ubique en especial en el momento por el que atraviesa, en uno de los cuatro niveles (instrumental, operativo, táctico o estratégico), aunque puede generar desarrollos puntuales de los niveles superiores.

A manera de ejemplo, puede existir una compañía que en su momento actual se encuentre en el proceso de consolidar sus acciones de mantenimiento, mediante el entendimiento y la diferenciación de las tareas planeadas (preventivas y/o predictivas) frente a las acciones imprevistas (correctivas y/o modificativas). Lo cual se tipifica con actividades de organización, planeación y ejecución de acciones de mantenimiento.

También, y en forma simultánea, puede incursionar en los pasos básicos de implementación de una táctica como el *TPM* o el *RCM* y, eventualmente, tener algunos controles incipientes o avanzados de CMD y/o *LCC*¹.

CONOCIMIENTOS PREVIOS REQUERIDOS

Se deben dominar los conceptos básicos de mantenimiento y producción tratados en las partes primera y segunda, y de manejo de CMD. También se requiere contar con alguna experiencia real, académica o laboral, en el campo del mantenimiento empresarial, con el fin de visualizar y aplicar de una manera más fluida los conceptos. Se debe tener un buen nivel de asociación entre los conceptos de esta parte y los fundamentos de los otros tres niveles, para facilitar el desarrollo de acciones coherentes con los niveles superiores de operación, táctica y estrategia.

1 *LCC*, Costo del ciclo de vida.

CAPÍTULO 17

FUNDAMENTOS DEL NIVEL INSTRUMENTAL

17.1 NIVELES INSTRUMENTALES

El estado natural de cada empresa en particular tiene un desarrollo asociado con alguno de los cuatro niveles, y en paralelo puede incursionar en un nivel superior o consolidar uno inferior.

Se trata de suministrar los criterios básicos y los fundamentos relevantes para tomar decisiones acertadas, en cuanto a la selección de elementos vitales de los diferentes niveles de mantenimiento que se desean desarrollar. De tal forma que las disposiciones sean coherentes con la estrategia que se quiere implementar en el futuro.

La experiencia de muchos autores muestra que lo tradicional en las compañías es ir desarrollando cada nivel en forma independiente, históricamente acorde con las situaciones del momento y del entorno circunstancial de la empresa, lo cual implica, en muchas ocasiones, devolverse de nivel.

Las empresas que están en la fase de implementación de alguna táctica se dan cuenta de que en la fase operativa no conformaron un adecuado grupo cazafallas, GCF. O no implementaron la metodología *FMECA*, lo cual las obliga a retroceder en su proceso evolutivo al nivel anterior para consolidar lo no realizado, pues, a manera de ejemplo, el análisis de fallas es vital en la mayoría de las tácticas como el *TPM*, *PMO*, *RCM* y *TPM* o *RCM*.

Otro caso es cuando se alcanza el nivel cuatro estratégico, en el que hay que medir, lo cual, posteriormente, da cuenta de que el nivel I instrumental no cuenta con un sistema de información en tiempo real que provea costos reales, o que permita tomar los tiempos de fallas o reparaciones para calcular el CMD.



El estado natural de cada empresa en particular tiene un desarrollo asociado con alguno de los cuatro niveles, y en paralelo puede incursionar en un nivel superior o consolidar uno inferior.



Lo correcto es hacer desde el inicio una planeación estratégica simultánea de los cuatro niveles, acorde con la misión, visión de la empresa y circunstancias actuales y futuras de la organización.

Hacer una medición CMD de los principales equipos y líneas de la empresa permite identificar las curvas de no confiabilidad y de mantenibilidad de las máquinas más relevantes y, por ende, de la compañía.

Una vez conocida la ubicación en la curva de la bañera, se puede decidir el manejo de los instrumentos o elementos de la empresa, el tipo de capacitación del recurso humano, el *software* más adecuado, los niveles de inventarios más acertados, el tipo de acciones planeadas o no de mantenimiento que se lleven a cabo, etc.

17.2 TÁCTICAS

En otras ocasiones, los directivos de mantenimiento y/o producción conocen a profundidad tácticas, como *TPM*, *RCM*, *Proactivo*, *PMO*, *World Class* u otra. Y en forma acelerada pretenden su implementación a como dé lugar en su empresa, sin auscultar los niveles inferiores (instrumental y operativo) y mucho menos evaluar los indicadores CMD de cuarto nivel en su organización. Normalmente esto deteriora lo que ya estaba funcionando y se termina desvirtuando la función específica de la táctica seleccionada, lo cual induce a la desorganización total y a que se presenten comentarios como que la táctica X o Y no sirve, etc.

Lo correcto parece ser, entonces, hacer desde el inicio o en el momento más adecuado una planeación estratégica (acorde con la misión, la visión de la empresa y las circunstancias actuales y futuras de la organización) simultánea de los cuatro niveles. O, en su defecto, se debe mantener una constante revisión de todos los niveles, de tal forma que haya una estructura lógica y coherente ente ellos (Mora, 2007c).

La recomendación es hacer inicialmente una medición CMD de los principales equipos y líneas de producción de la empresa. Eso permite identificar las curvas de no confiabilidad y de mantenibilidad de las máquinas más relevantes y, por ende, de la compañía.

Una vez conocida la ubicación en la curva de la bañera, se puede decidir el manejo de los instrumentos o elementos de la empresa, el tipo de capacitación del recurso humano, el *software* más adecuado, los niveles de inventarios más acertados, el tipo de acciones planeadas o no de mantenimiento que se lleven a cabo, la táctica más adecuada y el nivel de costos *LCC* más apropiado para los indicadores CMD calculados de la empresa y de sus líneas de producción relevantes.

La identificación de los aspectos integrales en forma simultánea se logra con la aplicación de técnicas de rediseño de procesos, como el *Balanced ScoreCard* o el de *Quantum Performance*. Eso se debe realizar en paralelo con la medición CMD. De tal forma que identifique una metodología integral de la empresa y una planeación estratégica global de corto, de mediano y de largo plazos para el mantenimiento de la compañía que se revisa (Mora, 1995), que ayude a decidir el grado de desarrollo ideal en cada nivel y, más aun, lo que debe tener el nivel anterior para llegar al cuarto nivel estratégico.

Las recomendaciones presentadas en los siguientes capítulos, más que ahondar en los conocimientos que ya existen en la amplia literatura mundial sobre mantenimiento, pretenden ayudar a conformar estrategias coherentes en los cuatro niveles de mantenimiento.

Por lo tanto, los conceptos que se presentan se van asociando permanentemente a los valores CMD y a las características de los diferentes elementos de mantenimiento en cada nivel.

Elementos del nivel instrumental en mantenimiento.

CUADRO 17.1

- * Sistema de información
- * Recursos humanos talento
- * Herramientas
- * Repuestos
- * Insumos
- * Capital de trabajo
- * Espacio físico
- * Tecnología
- * Maquinaria
- * Recursos naturales
- * Poder de negociación
- * Recursos humanos carga laboral
- * Planeación
- * Proveedores
- * Terceros y subcontratación
- * Otros

El nivel instrumental está compuesto por los elementos reales necesarios para que el área de mantenimiento funcione. Dichos elementos, denominados instrumentos de mantenimiento, son de orden real y entre los más relevantes se pueden enunciar los básicos y los avanzados.

CAPÍTULO 18

INSTRUMENTOS BÁSICOS - FACTORES PRODUCTIVOS DE MANTENIMIENTO - NIVEL INSTRUMENTAL

Los instrumentos básicos, factores productivos de mantenimiento y nivel instrumental, son los factores productivos que se manejan en forma habitual en mantenimiento para llevar a cabo las tareas básicas de mantenimiento, las cuales son mantener la funcionalidad de los equipos que se usan para la producción o para la prestación de los diferentes servicios en la empresa, ya sea mediante las reparaciones o mediante las tareas proactivas con mantenimientos planeados.

En cada uno de ellos existen muchos aspectos relevantes que inciden en los niveles superiores. Es decir, se requieren ciertas características de manejo y operación de cada elemento para que se adecue a las necesidades de los niveles superiores. Por ejemplo, el entrenamiento de grupos reactivos de recursos humanos de mantenimiento en el nivel II de mantenimiento requiere cierta selección, determinado entrenamiento y un especial manejo del personal apropiado para ello.

Un grupo reactivo es muy pertinente en las tácticas proactiva o reactiva, y eso está altamente asociado a los valores CMD en empresas donde los valores del MTTR son superiores a los del MTBM. O donde la cantidad de trabajos de reparaciones supera ampliamente a los planeados. En síntesis, se debe ir definiendo cada uno de los elementos reales del nivel instrumental, de acuerdo con lo que se desea o se tiene previsto para los niveles superiores.



El nivel instrumental está compuesto por los elementos reales necesarios para que el área de mantenimiento funcione. Dichos elementos, denominados instrumentos de mantenimiento, son de orden real y entre los más relevantes se pueden enunciar los básicos y los avanzados.



Un grupo reactivo es muy pertinente en las tácticas proactiva o reactiva, y eso está altamente asociado a los valores CMD en empresas donde los valores del *MTTR* son superiores a los del *MTBM*, o donde la cantidad de trabajos de reparaciones supera ampliamente a los planeados.

La información es el epicentro de mantenimiento, y es necesaria para determinar todos los signos vitales que ocurren para consolidar una estrategia adecuada de mantenimiento.

18.1 SISTEMA DE INFORMACIÓN

La información es el epicentro de mantenimiento, y es necesaria para determinar todos los signos vitales que ocurren para consolidar una estrategia adecuada de mantenimiento.

Entre la información que se debe manejar en tiempo real desde el inicio, sobresalen algunos tópicos, como:

- Registro de todos los equipos, partes y componentes, al menos hasta tres niveles.
 - Generación y control de todas las órdenes de trabajo.
 - Desarrollo de solicitudes de trabajos de mantenimientos tanto por usuarios de producción, como por parte de determinado funcionario de la empresa con rangos de validación.
 - Planes de mantenimiento de corto, de mediano y de largo plazos.
 - Inventarios y gestión de repuestos e insumos.
 - Históricos de consumos, de reparaciones y cambios.
 - Solicitudes automáticas de compra, cuando se rompa el inventario mínimo, de cualquier repuesto o insumo.
 - Generación de pedidos *Push* o *Pull*, cuando así se requieran, de acuerdo con las mejores prácticas internacionales.
 - Salarios e historia de todos los empleados y trabajadores del área.
 - Costos de todos los recursos de mantenimiento y producción.
 - Costos fijos, variables, financieros y de no confiabilidad de todas las órdenes de trabajo y equipos.
-
- Registros históricos minuto a minuto de operación y mantenimiento de equipos, de tiempos de fallas y reparaciones, de tiempos administrativos y de demora, tiempos de suministros, tiempos de *Ready Time*, o de cualquier otro tiempo pertinente para el cálculo del CMD.
 - Costos de operación, de sustitución, de alistamiento y de mantenimiento de equipos, entre otros.
 - Índices, rendimientos e indicadores propios y/o internacionales de mantenimiento, operación o ingeniería de fábricas, entre otros.
 - Fácil comunicación con el sistema central de información, con otro tipo de *software* de la compañía o de la organización.
 - Bases de datos de todos los tópicos señalados.
 - Pronósticos de datos, tiempos, repuestos, materias primas o insumos.
 - Registro de todos los análisis de fallas, su proceso evolutivo, sus avances y toda la información conexas pertinente.

- Sistemas de cálculo *RPN*, *CMD*, *TPM*, *RCM*, etc.
- Sistemas de administración, registro, evaluación y gestión de proveedores y de terceros en la operación y gestión de mantenimiento y producción.
- Otros que puedan ser relevantes de la empresa en particular.

El sistema de información debe ser flexible y actualizado con el sistema que se desarrolla en general. Y debe permitir su fácil acceso a través de redes o sistemas a distancia de comunicaciones. Es importante dimensionar desde el principio la magnitud del *software* y del *hardware* para no tener los futuros inconvenientes de traslados de sistemas o transporte de información. Se le debe apuntar desde el inicio a un sistema fuerte que por lo menos soporte el crecimiento de la empresa al menos durante unos quince años.

También se debe entender como una herramienta de apoyo al sistema logístico de mantenimiento. Pero en sí no puede ser el todo, pues es necesario tener un proceso sistémico debidamente organizado en los cuatro niveles. Y después seleccionar el sistema de información que se va a trabajar para soportar el desarrollo natural de la operación y la gestión de mantenimiento; pero no a la inversa. Es decir, no es recomendable supeditar todo el sistema de mantenimiento y/o producción a las condiciones del sistema de información.

En cuanto a las acciones de mantenimiento y su relación con el CMMS¹, debe tener las características de tiempo real como de información veraz en cuanto a insumos, personal y costos, tanto para reparaciones como para actividades planeadas. Por otro lado, en cuanto a las tácticas posibles de mantenimiento, en general, es muy recomendable contar con un sistema de información para la gestión y la operación de mantenimiento bastante desarrollado, antes de iniciar la implementación táctica y mucho más al momento de establecer la estrategia integral de mantenimiento (Mora, 1999).

La elección de un software de mantenimiento exige mucho más análisis del que normalmente parece requerir, pues su sofisticación y alternativas en el mercado dificultan la selección. Los dos factores que más han contribuido al desarrollo del software de mantenimiento son: la industria de computación ha madurado lo suficiente para estar a la vanguardia de lo ofrecido y, por otra parte, el gran desarrollo tecnológico verificado en las empresas de los clientes ha obligado a las empresas productoras de CMMS a ofrecer paquetes muy avanzados.

Hoy en día se cuenta con bases de datos fáciles de manejar, flexibles, compatibles y rápidas, del mismo modo que los diversos tipos de software son compatibles con tecnologías masivas como Microsoft.



El sistema de información debe ser flexible y actualizado con el sistema que se desarrolla en general. Y debe permitir su fácil acceso a través de redes o sistemas a distancia de comunicaciones.

La elección de un software de mantenimiento exige mucho más análisis del que normalmente parece requerir, pues su sofisticación y alternativas en el mercado dificultan la selección.

Hoy día se cuenta con bases de datos fáciles de manejar, flexibles, compatibles y rápidas, del mismo modo que los diversos tipos de software son compatibles con tecnologías masivas como Microsoft.

1 CMMS, Sistema de información integral de gestión y operación de mantenimiento y producción.

Los pasos requeridos para seleccionar e implementar programas informáticos de mantenimiento son:

- Definir la magnitud de trabajos, funciones, actividades, equipos, indicadores, flujos cálculos, etc., que se necesita controlar en la empresa.
- Determinar los tipos de informes y reportes que se necesitan.
- Mirar qué tipos de ellos ofrecen los CMMS existentes.
- Examinar si el software deseado entra en red y es compatible con los sistemas ya instalados en la empresa.
- Concretar con la firma vendedora los entrenamientos requeridos para el personal y la asesoría, durante la implementación y la puesta en marcha del programa.
- Evaluar las características de expansión de su CMMS preferido, en relación con sus necesidades futuras.

Las garantías, ampliaciones y las futuras asesorías son primordiales a la hora de seleccionar un sistema de información en mantenimiento. Los CMMS proporcionan un soporte gerencial ideal para establecer programas de gestión y control de mantenimiento. Otros criterios que deben influenciar la compra son: experiencia de la casa productora y vendedora, plan estructural de lo que desarrolla el CMMS, el tiempo de entrenamiento e instalación, confiabilidad y servicio (Weiss, 1998). La gran automatización industrial y de las actividades de mantenimiento se debe soportar en sistemas CMMS (Langan, 1995).



El personal operativo y administrativo es la piedra angular de mantenimiento, ya que como tal en el enfoque kantiano es uno de los tres elementos básicos del sistema de mantenimiento - máquina - producción y está presente en ambas unidades.

18.2 RECURSOS HUMANOS. TALENTO

El personal operativo y administrativo es la piedra angular de mantenimiento, ya que como tal en el enfoque kantiano es uno de los tres elementos básicos² del sistema de mantenimiento - máquina - producción y está presente en ambas unidades³.

Entre algunos de los aspectos relevantes que se han de tener en cuenta en el factor humano se destacan:

- Búsqueda en escuelas, universidades, centros técnicos, etc., y sitios especializados.
- Selección.
- Enganche.
- Entrenamiento.
- Crecimiento personal.

² Personas, Objetos, Variables.

³ Producción y mantenimiento.

- Desarrollo.
- Formación para labores específicas correctivas o planeadas.
- Adquisición de habilidades para formar parte de grupos reactivos, cazafallas o proactivos.
- Remuneración.
- Subcontratación.
- Liderazgo.
- Adiestramiento en una táctica en particular: *TPM*, *RCM*, combinada, proactiva, reactiva, *World Class*, etc.
- Sustitución.
- Habilidades y competencias.
- Análisis e interpretación de indicadores y resultados.
- Otros aspectos pertinentes.

En especial, es importante resaltar que cada uno de los pasos es fundamental dependiendo de la estrategia, la táctica y las acciones planeadas o no que se deseen en la empresa. Lo ideal es el proceso inverso, el cual consiste en definir los niveles superiores estratégico, táctico y operativo. Y dependiendo de esto, entonces sí empezar a desarrollar una serie de tareas coordinadas con el personal en los aspectos relevantes enunciados anteriormente, pero siempre a la luz de lo definido en la planeación integral.

18.3 HERRAMIENTAS, REPUESTOS E INSUMOS

Todos éstos son los elementos básicos para llevar a cabo las tareas correctivas o proactivas de mantenimiento que deben acomodarse a la estrategia y a la táctica seleccionadas. Su manejo debe ser coherente con la política general de gestión y manejo de inventarios. En los insumos y repuestos debe haber un grado de desarrollo avanzado, antes de emprender la realización de procedimientos de mantenimientos planeados y, en especial, en forma previa a la implementación de la táctica que se desea utilizar.

Los costos asociados a repuestos e insumos son un rubro importante dentro de la inversión y de los gastos habituales de mantenimiento. Se considera que las empresas que desarrollan políticas de manejo de inventarios pueden alcanzar ahorros superiores al treinta por ciento mensual en el capital destinado a ello.



Herramientas, repuestos e insumos son los elementos básicos para llevar a cabo las tareas correctivas o proactivas de mantenimiento que deben acomodarse a la estrategia y a la táctica seleccionadas. Su manejo debe ser coherente con la política general de gestión y manejo de inventarios.

Los costos de repuestos e insumos son un rubro importante dentro de la inversión y de los gastos habituales de mantenimiento. Se considera que las empresas que desarrollan políticas de manejo de inventarios pueden alcanzar ahorros superiores al treinta por ciento mensual en el capital destinado a ello.

Capital de trabajo, espacio físico, tecnología, maquinaria, recursos naturales, poder de negociación, recursos humanos, planeación, son considerados factores básicos requeridos para lograr la función primaria del departamento de mantenimiento, en las empresas de servicio o producción.

18.4 CAPITAL DE TRABAJO, ESPACIO FÍSICO, TECNOLOGÍA, MAQUINARIA, RECURSOS NATURALES, PODER DE NEGOCIACIÓN, RECURSOS HUMANOS, CARGA LABORAL, PLANEACIÓN

Se consideran los factores básicos requeridos para lograr la función primaria del departamento de mantenimiento en las empresas de servicio o producción. Fundamentalmente, es una entidad de servicio que se diferencia de las de operación, debido a que otorga un apoyo logístico para que las áreas productivas puedan cumplir su función de agregar valor a los procesos de servicio o producción de bienes tangibles. La forma como se utilicen y se manejen los factores productivos permite medir el grado de calificación en cuanto a eficacia, eficiencia y efectividad del mantenimiento. A su vez, todo esto define los niveles de productividad de mantenimiento y los de competitividad de la empresa donde se estructura el área de mantenimiento.



La relación entre mantenimiento y producción en aras de las máquinas se gobierna en buena medida por las reglas que se definen en la *función macroeconómica de la producción*, establecida por David Ricardo en el siglo XVIII.

La evolución estratégica de mantenimiento depende de su origen, el cual es el área de producción. Su inicio data desde la operación (manufactura) y en esta idea se apoya todo el desarrollo de su actividad.

Cada tipo de empresa requerirá un servicio de mantenimiento adecuado a su producción, pero en ningún caso separado de él.

La relación entre mantenimiento y producción en aras de las máquinas se gobierna en buena medida por las reglas que se definen en la *función macroeconómica de la producción*, establecida por David Ricardo en el siglo XVIII y en la cual se definen las normas que rigen el accionar entre las dos áreas y las de la gestión de cada una de ellas (Ricardo, 1817 y Clement y otros, 1984).

18.5 MANTENIMIENTO: FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN

La evolución estratégica de mantenimiento depende de su origen, el cual es el área de producción. Su inicio data desde la operación (manufactura) y en esta idea se apoya todo el desarrollo de su actividad, por lo cual es necesario revisar el tema de la función macroeconómica de la producción que es la que gobierna todas las actividades de la operación.

La estructura básica de manufactura se basa en la teoría de los factores productivos de David Ricardo, en el cual se enuncian los principios que gobiernan la función de producción. Navarro y otros autores refieren que "...cada tipo de empresa requerirá un servicio de mantenimiento adecuado a su producción, pero en ningún caso separado de él..." (Navarro y otros, 1997).

La revisión investigativa e histórica en las empresas revela las diferencias entre los diseñadores de equipos (ingeniería de diseño), los usuarios AOD, aprovisionamiento y/o operación y/o distribución, producción y los encargados de sostenerlos (mantenimiento). Pero coincide en que todos deben buscar su máxima eficiencia y disponibilidad. La clara relación entre ambos departamentos se concreta en la disponibilidad de los equipos.

El objetivo de mantenimiento frente a producción es claro, y consiste en mantener en óptimo estado el parque industrial. Si por producir se entiende como la máxima explotación de los equipos para cumplir los planes de manufactura, por mantenimiento se debe pensar como la máxima funcionalidad y disponibilidad de las máquinas.

La fabricación y el mantenimiento son actividades duales y complementarias, lo cual se conceptúa por la alta relación entre ellas (Sourís, 1992). El servicio de mantenimiento está enmarcado en una empresa en la función de producción, la cual logra la más alta productividad mediante el uso eficaz de los factores productivos (Rey, 1996).

18.5.1 Función macroeconómica de la producción

La forma como se utilicen y se combinen los factores productivos incide en la eficiencia y la eficacia de la generación de bienes y servicios. David Ricardo diferencia las etapas de esta combinación de factores productivos, determinando tres zonas básicas: marginal creciente, marginal decreciente y de ineficiencia.

18.5.2 Cantidad de servicios (o de productos), servicios promedio y productividad

La relación de uso de un factor está condicionada a su productividad y al producto promedio en determinado instante, por el comportamiento del *Gráfico 18.1*. Se debe entender productos promedio, PP, o servicios promedio, SP, como una medida puntual y estática en el tiempo, a diferencia de la productividad que relaciona dos estados del tiempo y, por ende, se considera una medida dinámica mucho más importante que el SP o el PP (Ricardo, 1817).



El servicio de mantenimiento está enmarcado en una empresa en la función de producción, la cual logra la más alta productividad mediante el uso eficaz de los factores productivos.

El cómo se utilicen y se combinen los factores productivos incide en la eficiencia y la eficacia de la generación de bienes y servicios. David Ricardo diferencia las etapas de esta combinación de factores productivos, determinando tres zonas básicas: marginal creciente, marginal decreciente y de ineficiencia.

► ECUACIÓN 18.1 - Cantidad de servicios, servicios promedio y productividad de servicios para entidades de servicios de mantenimiento

CS = Cantidad de servicios de mantenimiento realizados

*FP = Cantidad de factores productivos usados para realizar un volumen determinado
CS de tareas correctivas o proactivas de mantenimiento*

$$\text{Servicios Promedio} = SP = \frac{\text{Cantidad de servicios de mantenimientos realizados}}{\text{Cantidad de factores usados}} = \frac{CS}{FP}$$

$$\text{Servicios Promedio es la primera derivada de cantidad de servicios contra los Factores Productivos } SP = \frac{dCS}{dFP}$$

Productividad en servicios es la relación entre el incremento logrado en la cantidad de servicios de mantenimiento realizado, y el incremento específico en la cantidad de los factores productivos utilizados para generar esos servicios de mantenimiento (Mora, 1999) en dos estados subsecuentes de tiempo (t_f estado final de referencia y t_i estado de referencia inicial).

$$\text{Productividad de servicios} = \frac{\Delta_f^j \text{ Cantidad de servicios}}{\Delta_i^j \text{ Cantidad de factores usados productivos}} = \frac{CS_f - CS_i}{FP_f - FP_i} = \frac{dSP}{dFP}$$

es la segunda derivada de la cantidad de servicios promedios realizados contra los Factores Productivos usados en esas tareas de mantenimiento

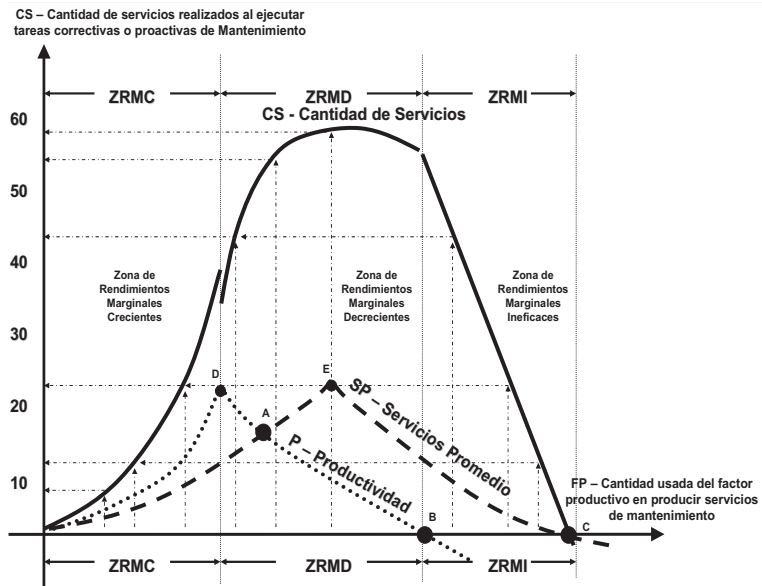
$$\text{Productividad de servicios} = \frac{d^2 CS}{d^2 FP}$$



Productividad en servicios es la relación entre el incremento logrado en la cantidad de servicios de mantenimiento realizado y el incremento específico en la cantidad de los factores productivos utilizados para generar esos servicios de mantenimiento.

Curvas de cantidad de servicios, servicios promedio y productividad para un FP

GRÁFICO 18.1



En la ZRMC cada factor productivo que ingresa produce más servicios que el anterior, lo cual se debe a la especialización del trabajo. Luego, en la segunda zona de ZRMD cada factor productivo que se adiciona genera menos servicios que el anterior, pero de todas formas la CS se incrementa. Y por último, en la ZRMI cada FP adicional hace que disminuya la cantidad de servicios, algo así como consumirse el inventario en producción.

La curva de servicios promedio, SP, se vuelve máxima (punto E) cuando CS está en el punto de producción máxima de servicios, y se vuelve mínima (punto C) cuando CS es cero; es decir, en el mínimo nivel de servicio.

La productividad, P, toma como valores máximo y mínimo, respectivamente, los dos puntos correspondientes a los cambios de curvatura de CS, que ocurren entre las dos fronteras de las tres zonas. Así: en el punto D (cuando CS pasa de creciente a cóncava, entre las zonas ZRMC y ZRMD) y en el punto B (al pasar CS de cóncava a curva de pendiente negativa en ZRMI, entre las zonas ZRMD y ZRMI), los valores de referencia de los cambios de curvatura de las tres curvas (Clement y otros, 1984 y Bohan, 2003).



En la ZRMC cada factor productivo que ingresa produce más servicios que el anterior, lo cual se debe a la especialización del trabajo.

18.6 ¿CUÁL ES LA CANTIDAD ÓPTIMA POR USAR EN UN FACTOR PRODUCTIVO?

Para seleccionar el punto ideal de la cantidad de FP por usar, para realizar las tareas correctivas y proactivas de mantenimiento, se deben considerar los siguientes puntos en cada una de las zonas:

- La ZRMI se descarta, dada su condición de productividad negativa y la tendencia de SP a cero.
- Es indudable que parece ser que la mejor zona es la ZRMC, pero ésta a pesar de que cuenta con la productividad P más alta, no alcanza el mayor SP y la CS llega a un tope máximo de servicios, por lo cual se descarta.
- Ya que en la ZRMD es posible lograr cantidades de servicio CS más altas que en la ZRMC, a pesar de que en la ZRMD al introducir más FP se reduce la cantidad de servicios CS marginales con relación al anterior FP, el total de CS aumenta. De donde se deduce que el punto ideal está ubicado en la ZRMD en donde al incrementar la cantidad del factor productivo FP se logra que el producto total CS aumente.
- En esta zona la curva de productividad, P, empieza a descender y la SP asciende. Aquel punto en donde el incremento de la productividad sea igual al servicio promedio, SP, es el punto ideal de la cantidad por usar de FP para lograr la CS deseada, el cual se da en el punto A del *Gráfico 18.1*.

De lo anterior se desprende que el punto ideal es aquel en donde se cumple que:

► ECUACIÓN 18.2 - Punto ideal donde servicios promedio sea similar a productividad

$$\text{Servicios Promedio} \cong P \cong \frac{d \text{ CS}}{d \text{ FP}} \cong \frac{d \text{ SP}}{d \text{ FP}} \cong \text{Productividad para el mismo Factor Productivo}$$



El sitio óptimo donde se deben usar los factores productivos en forma individual, es cuando se cruzan las curvas de productividad, P, y servicio promedio, SP.

El sitio óptimo en donde se deben usar los factores productivos en forma individual, es cuando se cruzan las curvas de productividad, P, y servicio promedio, SP. Esto ocurre cuando el último incremento del factor productivo aumenta la cantidad total de servicios de mantenimiento en la misma medida del servicio promedio que se tiene en ese instante. Es decir, cuando el último trabajador que ingresa (de izquierda a derecha, si se trata del factor productivo recurso humano-carga laboral) incrementa la producción total de servicios en el mismo nivel del promedio que se tiene.

En todo instante se debe conservar la productividad, P, por encima del servicio promedio, SP, y el punto máximo permisible es cuando son iguales.

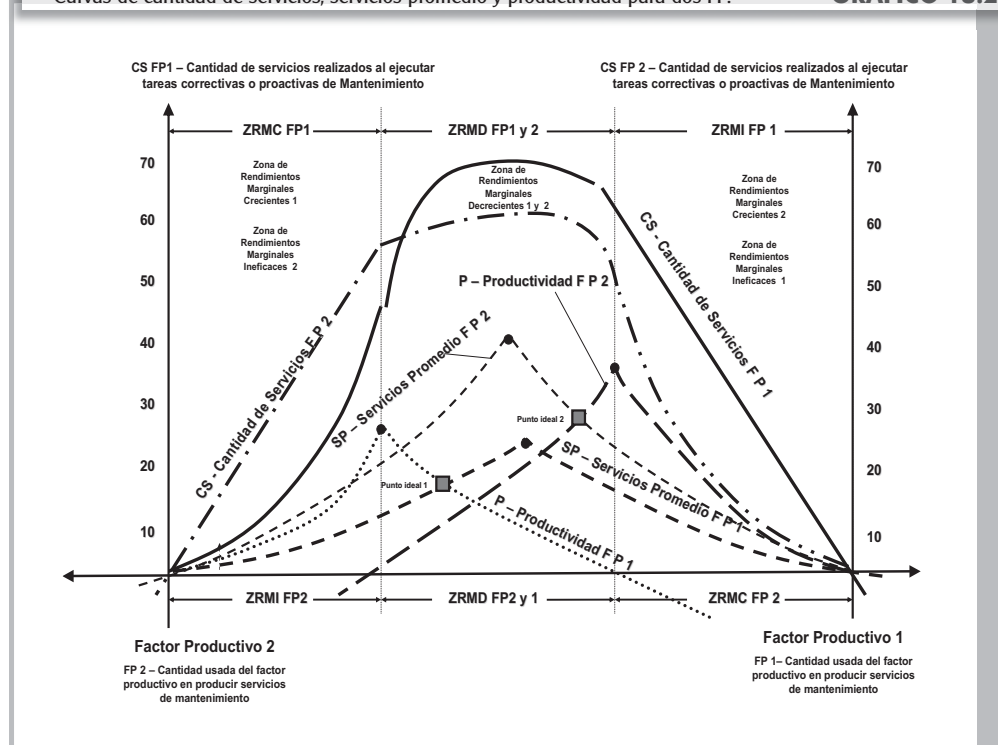
18.7 PARÁMETROS DE MANEJO CUANDO SE UTILIZA MÁS DE UN FACTOR PRODUCTIVO

La construcción de las curvas de CS, SP y P se logra en forma similar al de un factor, sólo que en dos se esbozan en dirección contraria (uno de izquierda a derecha y el otro a la inversa de derecha a izquierda).

En el *Gráfico 18.2* se denota que en ambos casos de FP1 y FP2, el punto óptimo se encuentra en la zona de rendimientos marginales decrecientes ZRMD. De donde se desprende que para encontrar la combinación óptima de factores productivos en la prestación de servicios correctivos o proactivos de mantenimiento se deben acercar los puntos ideales de FP1 y de FP2, de tal forma que se cumplan las siguientes aproximaciones:

Curvas de cantidad de servicios, servicios promedio y productividad para dos FP.

GRÁFICO 18.2



ECUACIÓN 18.3 - Punto óptimo de gestión de mantenimiento instrumental para dos factores productivos FP1 y FP2

$$\text{Servicios Promedio} \cong P \cong \frac{d \text{ CS}}{d \text{ FP}} \cong \frac{d \text{ SP}}{d \text{ FP}} \cong \text{Productividad para el mismo Factor Productivo}$$

Al igual si se extrapola a varios factores productivos, se obtienen aproximaciones similares:

ECUACIÓN 18.4 - Punto óptimo de gestión de mantenimiento instrumental para dos factores productivos FP1 y FP2

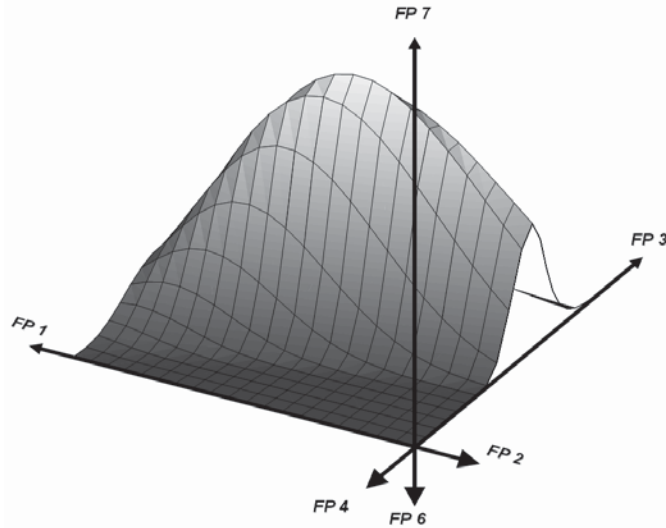
$$\begin{aligned} \text{Servicios Promedio FP1} &\cong \text{SPFP2} \cong \text{SP FP3} \cong \dots = \text{SPFPn} \cong \\ \text{Productividad FP1} &\cong \text{FP2} \cong \dots \cong \text{FPn} \end{aligned}$$

En los casos de múltiples factores productivos se forma lo que se denomina la superficie macroeconómica de la producción o el servicio, bajo las leyes de David Ricardo.

Manejo de múltiples factores productivos para generar servicios de mantenimiento. **GRÁFICO 18.3**



En los casos de múltiples factores productivos se forma lo que se denomina la superficie macroeconómica de la producción o el servicio, bajo las leyes de David Ricardo.



Fuente: El autor.

Cuando se manejan varios FP se logra que la productividad de cada uno de ellos sea similar entre sí, y aproximadamente idénticas a cada uno de los servicios promedio en cada uno de los FP. Del análisis de la función macroeconómica de la producción aplicada a servicios se desprende que se debe procurar un manejo similar y adecuado en cada uno de los diversos factores productivos que se manipulen. Especialmente en mantenimiento se debe tener un equilibrio en el manejo productivo de ello, y en la productividad individual que tienen y en la grupal que genera el manejo integral de todos ellos.

Todos los conceptos revisados para la generación de servicios son válidos y exactamente iguales para la producción de bienes tangibles. De esta forma se dejan conceptualmente explicados los fundamentos que priman, las reglas que imperan y el comportamiento habitual de las funciones de mantenimiento y producción. Todo enmarcado en el enfoque sistémico kantiano y siguiendo los principios básicos de la productividad y de la función macroeconómica de la producción.

Esta conducta se puede extrapolar a los tres factores productivos enunciados por Ricardo. Es evidente que en los siglos XVII y XVIII en Inglaterra, cuando él vive, el mundo industrial no tiene la gran complejidad y dimensión de los parámetros que influyen directamente en la producción de una empresa y del producto bruto total de

un país. Lo cual indica que para actualizar dichos conceptos se deben ampliar los factores productivos.

La productividad en el mantenimiento está más asociada a indicar el número de servicios prestados por unidad de tiempo. Por lo cual han de tenerse en cuenta no sólo los parámetros de recursos humanos y la duración de los trabajos, sino que es indispensable darle una mayor dimensión teniendo en cuenta otros indicadores de productividad, como disponibilidad del parque industrial, costos integrales de mantenimiento por servicio y el número de cumplimientos de los servicios.

En general, se deben constituir indicadores de medición para definir los niveles deseados y reales de productividad que se aspira a obtener (Mora, 1999). Entre otros factores productivos por medir permanentemente, se deben presentar: disponibilidad, fiabilidad, calidad de los trabajos, paradas ocasionadas por fallas en las refacciones, rapidez, seguridad, motivación del personal, responsabilidad (Navarro y otros, 1997).

18.8 FACTORES PRODUCTIVOS MODERNOS (PARA MANTENIMIENTO Y PRODUCCIÓN)

La circunstancia de que Ricardo, con sus tres factores productivos, no cubre conceptualmente las labores modernas de mantenimiento ni de producción, obliga a ampliar esta gama de elementos, de tal forma que permitan un estudio más desagregado y profundo de la actividad de mantenimiento.

Los factores productivos ampliados cubren una mayor dimensión posible de las actividades inherentes a la gestión de producción y mantenimiento. Es de anotar que debe manejarse cada uno de ellos por separado y en conjunto con las directrices de productividad, eficacia y eficiencia conocidas.

Entre los recursos básicos, especializados, genéricos y avanzados (Porter, 1999) se pueden describir:

K - Capital: Se refiere a todos los recursos económicos necesarios para adquirir insumos, equipos, herramientas, tecnologías, documentos, etc., y pagar los costos variables de todos los factores, sufragar los costos fijos de la organización. Denota todos los recursos financieros utilizados en la producción o el mantenimiento.

N - Recursos humanos o talento humano: Es el capital más valioso de la gestión de mantenimiento y está asociado con todas las personas de alto, medio y bajo nivel que laboran en el área. Incluye nivel salarial, motivación, entrenamiento, capacitación, conocimientos, habilidades y competencias,



Entre otros factores productivos por medir

permanentemente se deben presentar:

disponibilidad, fiabilidad, calidad de los trabajos, paradas ocasionadas por fallas en las refacciones, rapidez, seguridad, motivación del personal, responsabilidad.

Los factores productivos ampliados cubren una mayor dimensión posible de las actividades inherentes a la gestión de producción y mantenimiento.



Talento humano es el capital más valioso de la gestión de mantenimiento y está asociado con todas las personas de alto, medio y bajo nivel que laboran en el área; incluye nivel salarial, motivación, capacitación, conocimientos, y competencias.

La técnica ha permitido sustituir tareas de producción que habitualmente realizaban las personas, por procesos automáticos.

su actuación en grupo y demás variables relacionadas con todos los funcionarios pensantes y laborales de mantenimiento.

Navarro y otros citan que "...la técnica ha permitido sustituir tareas de producción que habitualmente realizaban las personas, por procesos automáticos. Es muy importante el trabajo en equipo y las funciones matriciales por procesos en el trabajo humano de mantenimiento. En mantenimiento, sin embargo, la técnica no ha podido eliminar al mismo nivel la componente humana en reparaciones..." (Navarro y otros, 1997)⁴.

RN - Recursos naturales: Son los recursos que se tienen a la mano en las cercanías físicas y geográficas de la empresa. Este ítem genera muchas oportunidades competitivas cuando se dispone de ellos en forma natural o cuando hay que conducirlos hasta la fábrica. Incluye leyes de contaminación, conservación ecológica, manejo del agua y la luz, energía, etc.

T - Tecnología: Es el conjunto de conocimientos técnicos, habilidades y competencias desarrollados por mantenimiento y la empresa. Incluye los adquiridos por compra o por franquicia, denota la capacitación y el grado de evolución intelectual de la organización, sus competencias y productos esenciales y

todo lo relativo a la actividad científica de mantenimiento con las demás divisiones de la compañía.

P - Planeación: Es la capacidad que tienen mantenimiento y la organización para diseñar su futuro y alcanzarlo. Está referida a las metas, a los deseos que se anhela lograr en el presente y en el futuro.

PN - Poder de negociación: Es el nivel o grado que alcanza la empresa para llevar a cabo negocios con sus clientes internos, externos, con sus proveedores intrínsecos o exógenos. En síntesis, es la capacidad para relacionarse como organización con sus entornos interno y externo.

V - Espacio físico - volumen: Es la dimensión física de las instalaciones donde interactúa mantenimiento con los equipos y servicios que desarrolla, para sus clientes internos o externos.

⁴ Se recalca la relevancia de este factor productivo en la gestión de mantenimiento; sus grandes cambios obligan a profesionalizar cada día más el recurso humano.

I - Informática o sistemas de información: Es el manejo estructurado de la información y de los datos que administra sobre equipos, elementos, repuestos, servicios, planos, datos técnicos en general, CMMS, etc., propios o relativos a sus clientes, proveedores o de su entorno (Mora, 1990c).

La forma como se manejen y operen los ocho factores productivos precisan los niveles de eficacia, eficiencia y efectividad de los instrumentos básicos de mantenimiento, al igual que se definen los niveles de productividad y competitividad que se pueden alcanzar, de acuerdo con la gestión y operación realizada en la fase instrumental del enfoque kantiano de mantenimiento (Mora, 1990, 1998a y Porter, 1999).

Términos de medidas básicas del nivel instrumental de mantenimiento

La gestión y la operación de mantenimiento se rigen por normas y evaluaciones, que en ocasiones se confunden por su significado similar. Por eso es necesario identificar algunos significados de estas medidas básicas de la fase instrumental de mantenimiento.

La forma como se administren los instrumentos básicos y avanzados de mantenimiento está definida por el alcance de sus metas y por los recursos requeridos para alcanzarlas. De aquí que es relevante definir en términos de mantenimiento (adaptadas de Enrique De Miguel) (De Miguel, 1990):

- *Eficacia:* Realizar las tareas correctivas o proactivas de mantenimiento.
- *Eficiencia:* Alcanzar las metas definidas como tareas de reparaciones o de mantenimientos planeados, mediante el empleo de los recursos o factores productivos asignados (en cantidad limitada), para ello.
- *Efectividad:* Se define como obtener las diferentes metas propuestas, con los recursos productivos asignados para tal fin, en el menor tiempo permisible, con la mayor oportunidad y rapidez. Al menor costo posible, con la máxima calidad y competitividad, alcanzando la mayor satisfacción del cliente. Con la más alta productividad, logrando la máxima rentabilidad, con los mayores CMD posibles, acercándose a los estándares internacionales, etc. En síntesis, es la medición del éxito integral de alcanzar una meta.

Los diferentes niveles de medidas se clasifican en categorías, como:

- *Índices:* Se refiere a indicio o señal de algo. Se define como la evolución de una cantidad. Indicio denota la señal o signo aparente y probable de existencia de algo real o supuesto, seña o vestigio de algo, definido como la relación entre varios números calificativos de algo (Grijalbo, 2000). Se podría aproximar a la valoración con un número o valor en sí, que revela la señal o comportamiento de algo.



La gestión y la operación de mantenimiento se rigen por normas y evaluaciones, que en ocasiones se confunden por su significado similar, por lo cual es necesario identificar algunos significados de estas medidas básicas de la fase instrumental de mantenimiento.



Un proceso empresarial requiere el reconocimiento de un sistema que utiliza un modelo de dirección y de gestión del rendimiento, como la forma de medir su grado de éxito de la función o misión que desempeña.

Actividad es algo que hacen uno o varios seres humanos sobre un objeto o proceso. Es la unidad más elemental y simple de una empresa.

Proceso es un conjunto secuencial, lógico y organizado de actividades, con un fin muy preciso.

Macroproceso es un grupo orgánico de procesos, ligados entre sí por una meta o una característica particular.

- **Rendimientos:** Un sistema o un proceso empresarial requiere el reconocimiento de un sistema que utiliza un modelo de dirección y de gestión del rendimiento, como la forma de medir su grado de éxito de la función o misión que desempeña. El rendimiento empresarial (*performance*) de la organización está ligado al producto, bien, servicio o utilidad que genera su intervención. Está influenciado básicamente por dos factores: El acierto que se asocia a la eficacia estratégica en términos de referencia empresarial (mercadeo, recursos humanos y físicos, etc.) y la capacidad como la correcta orientación de las disponibilidades productivas internas sobre los clientes que se atienden y que se convierten en valor agregado competitivo y no comparativo. Rendimiento es la eficiencia de sus procesos y subprocesos internos.

- **Indicadores:** Es una magnitud o expresión cuantitativa del comportamiento de varias variables o de los atributos de un producto o servicio en proceso de una organización. La magnitud del indicador sirve para compararla con un valor o nivel de referencia, según sea el caso. Mide un conjunto de variables y se asocia a organización o conjunto de empresas o procesos.

Desde el punto de vista de la realización de acciones de reparación o tareas proactivas, en mantenimiento, se deben precisar los conceptos de:

- **Actividad:** Es algo que hacen uno o varios seres humanos sobre un objeto o proceso. Es la unidad más elemental y simple de una empresa, por ejemplo, una tarea de mantenimiento como soldar dos metales, o una función básica de producción como transportar un producto.
- **Proceso:** Es un conjunto secuencial, lógico y organizado de actividades, con un fin muy preciso.
- **Macroproceso u organización:** Es un grupo orgánico de procesos, ligados entre sí por una meta o característica particular.

El nivel de desarrollo de mantenimiento o producción (o de una empresa) se puede medir en términos de espacio y de tiempo (enfoque kantiano), así:

Productividad: Es la valoración que permite establecer si las metas propuestas se han logrado en el transcurrir del tiempo (es una medición consigo mismo), en referencia de tiempos diferentes en el mismo espacio.

Competitividad: Es la comparación evaluativa del logro de las metas con otras entidades (locales, regionales, nacionales o mundiales) en el mismo tiempo, pero en diferentes espacios.

Correspondencia y analogía entre los diferentes parámetros de medición de la gestión y operación de mantenimiento (de producción o de una empresa).

CUADRO 18.1

Aspecto	Analogía, correspondencia y similitud vertical		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Clasificación	Índice	Rendimiento	Indicador
Función macroeconómica de la productividad	CS-Cantidad de servicio	SP-Servicios promedio	P-Productividad o competitividad
Medición	Eficacia	Eficiencia	Efectividad
Empresarial	Actividad	Proceso	Macroproceso u organización empresarial

La utilización de cada categoría posible de evaluar, depende en sí de lo que se desee medir. Lo que sí se debe tener en cuenta en el vocablo y en el argot que se use es la correspondencia entre ellas, lo cual permite diferenciar y aclarar especialmente los parámetros correctos por evaluar.

Existen procedimientos que se apoyan en los instrumentos básicos de mantenimiento, fundamentalmente utilizados para eliminar las fallas, para mejorar los procesos de reparaciones o de mantenimientos planeados, para optimizar los factores productivos, para minimizar costos de manejo y operación, y para jerarquizar y priorizar las actividades de mantenimiento y/o producción, etc. A estos instrumentos se les considera como metodologías con un grado de desarrollo más alto dentro del nivel instrumental, bajo una estructura sistémica y kantiana de mantenimiento.



Competitividad es la comparación evaluativa del logro de las metas con otras entidades (locales, regionales, nacionales o mundiales) en el mismo tiempo, pero en diferentes espacios.

CAPÍTULO 19

INSTRUMENTOS AVANZADOS GENÉRICOS DE MANTENIMIENTO, NIVEL INSTRUMENTAL

19.1 INSTRUMENTOS AVANZADOS GENÉRICOS

Las herramientas especiales utilizadas en forma habitual en mantenimiento, para mejorar las técnicas de manejo de los instrumentos básicos, como de los factores productivos, oscilan alrededor de los objetos básicos de estudio y del tratamiento de mantenimiento en cuanto a fallas y reparaciones (o mantenimientos planeados).

Para la presentación, se clasifican los instrumentos avanzados de mantenimiento en dos niveles: unos genéricos de aplicación ilimitada y otros específicos para usos más especiales.

Instrumentos básicos y avanzados.

GRÁFICO 19.1





Los instrumentos avanzados de mantenimiento se clasifican en dos niveles: unos genéricos de aplicación ilimitada y otros específicos para usos más especiales.

Es muy importante el rol que juegan las herramientas avanzadas de mantenimiento en los niveles superiores de mantenimiento, bajo el enfoque sistémico kantiano, ya que son las bases de algunas acciones y tácticas particulares de calidad en la operación de mantenimiento.

Los instrumentos avanzados de mantenimiento se pueden analizar bajo varios puntos de vista como, por ejemplo, desde la óptica de los efectos que las fallas ocasionan en los bienes y servicios que se elaboran, en el proceso de fabricación y en los equipos de producción.

Existen técnicas y herramientas avanzadas genéricas que se usan actualmente en la gestión y operación del mantenimiento, como también se aplican otras más específicas. Así es como, por ejemplo, el análisis de fallas *FMECA* se centra en el control de calidad para la erradicación de ellas, lo mismo que la gestión de *stocks*¹; el manejo de inventarios de repuestos e insumos de mantenimiento se preocupa por los materiales que se requieren en las reparaciones (y/o en las tareas proactivas).

Así mismo, las 5S procuran mejorar las acciones de la reparación y optimización de los utensilios que se usan en mantenimiento, de la misma manera que el *TQM* y el *TQC*² propenden hacia la calidad integral tanto en los bienes y servicios que se generan en producción como en las condiciones de los equipos que los fabrican, como también el *RPN* procura jerarquizar las tareas proactivas y de reparaciones.

En general, es muy importante el rol que juegan las herramientas avanzadas de mantenimiento en los niveles superiores (operacional, táctico y estratégico) de mantenimiento, bajo el enfoque sistémico kantiano, ya que son las bases de algunas acciones y tácticas particulares de calidad en la operación de mantenimiento.

Si la función de mantenimiento tiene como objetivo garantizar la disponibilidad de los equipos industriales cuando éstos sean requeridos, dicha función adquiere dos dimensiones: una en términos de que los elementos físicos que conformen el cuerpo de la máquina se mantengan en buen estado (tratando de contrarrestar la acción del uso, desgaste o envejecimiento) y la otra consiste en que el conjunto de elementos que conforman el equipo cumplan cada uno y en grupo la función para la cual fueron diseñados.

Los instrumentos avanzados de mantenimiento se pueden analizar bajo varios puntos de vista como, por ejemplo, desde la óptica de los efectos que las fallas ocasionan en los bienes y servicios que se elaboran, en el proceso de fabricación y en los equipos de producción y, por otro lado, desde la visión del tratamiento de la falla en sí para su ulterior control o eliminación.

Los efectos de las fallas en los procesos de fabricación se pueden estudiar desde el impacto de la calidad en el mantenimiento y en la producción. La calidad se convierte en una excelente estrategia para aumentar la productividad, la rentabilidad y la competitividad de las empresas. De ahí la importancia del rol que desempeña mantenimiento en la calidad.

De otra parte, dado el incremento en los procesos de automatización, robotización y mecanización en los equipos, se puede afirmar que las

1 Stock, cantidad almacenada.

2 *TQM*, gestión total de la calidad. *TQC*, control de calidad total.

acciones de mantenimiento en este campo se evidencian en tres aspectos: cantidad, calidad y costos.

Las actuaciones de mantenimiento están asociadas a la calidad misma de los trabajos que realizan y al impacto en las características físicas y funcionales de los equipos que se mantienen. A su vez, éstas inciden en la disponibilidad, que es el indicador máximo de la relación producción-máquina-mantenimiento.

También es conveniente resaltar que las acciones de mantenimiento inciden directamente en la calidad de los productos que se fabrican y de los servicios que se presta. (Por ejemplo, el equipo de un hospital en la sección de cuidados intensivos tiene un alto impacto en el cuidado de los pacientes y es muy importante para la calidad del servicio de salud prestado).

La función primaria de producción es generar bienes y servicios, como también una de sus funciones secundarias es demandar los servicios de mantenimiento para los equipos; esta función secundaria de producción es la función primaria de mantenimiento. Ambas entidades operan en paralelo en un sistema empresarial, por lo cual los esfuerzos de mantenimiento afectan directamente la producción en cuanto a calidad y cantidad. Ello pone de manifiesto la importancia de tratar de establecer la estructura que relaciona a mantenimiento y calidad y, por ende, su influencia en la producción de bienes y servicios, bajo el enfoque sistémico.



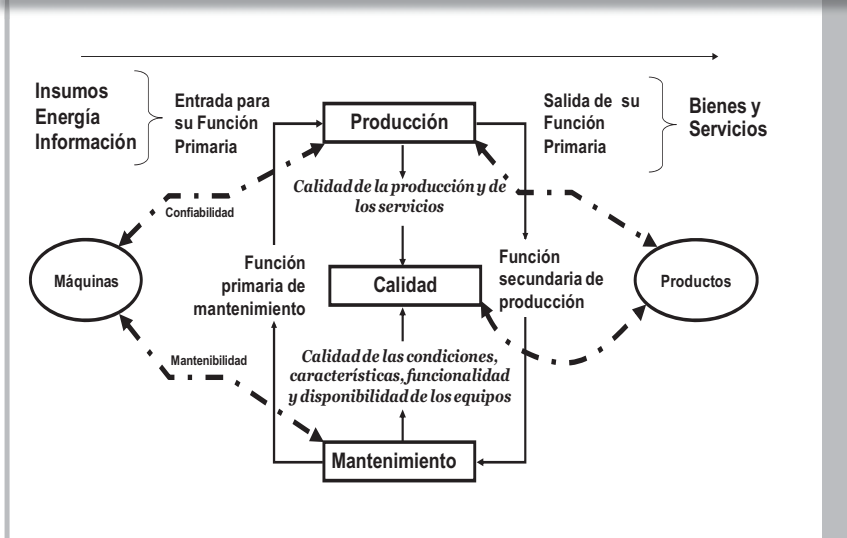
Los efectos de las fallas en los procesos de fabricación se pueden estudiar desde el impacto de la calidad en el mantenimiento y en la producción. La calidad se convierte en una excelente estrategia para aumentar la productividad, la rentabilidad y la competitividad.

Es conveniente resaltar que las acciones de mantenimiento inciden directamente en la calidad de los productos que se fabrican y de los servicios que se prestan.

La función primaria de producción es generar bienes y servicios, como también una de sus funciones secundarias es demandar los servicios de mantenimiento para los equipos. Esta función secundaria de producción es la función primaria de mantenimiento.

Relación entre mantenimiento, calidad y producción.

GRÁFICO 19.2





Cuanto más avanza la automatización de los equipos, más influencia tiene el modelo PQCDMS (producción, calidad, costos, demoras, seguridad y motivación) sobre la disponibilidad de los equipos.

La calidad en el mantenimiento exige tres pasos: fiabilidad, habilidades y competencias, y disponibilidad.

Los autores Ben-Dayay y Duffuaa presentan dos modelos posibles para relacionar mantenimiento con calidad:

- Modelo de la imperfección de mantenimiento
- Modelo de la aproximación de Taguchi

El primero de ellos se basa en el concepto de la imperfección del mantenimiento, el cual consiste en que después de cada intervención de una tarea planeada de mantenimiento (preventiva y/o predictiva) la tasa de fallas se altera³, lo que afecta directamente la calidad de los productos y las inspecciones por realizar. De esta forma, la integración de las áreas producción - mantenimiento - calidad se logra a través de planes de mantenimientos planeados y su influencia en la calidad de los productos (Duffuaa, y otros, 1995).

El segundo modelo está basado en las aproximaciones de calidad de Taguchi, según el cual las desviaciones de calidad en las características de los servicios generados y productos desarrollados (frente al estándar) se ven afectadas por las tareas proactivas de mantenimiento. Taguchi desarrolla modelos que simulan estas situaciones y permiten optimizar los recursos de calidad-mantenimiento-producción, en términos de la minimización de las pérdidas de calidad sufrida por los bienes y servicios creados durante la operación fabril como consecuencia de las tareas de mantenimiento (Taguchi y otros, 1989 y Duffuaa y otros, 1995), lo cual maximiza la disponibilidad de las máquinas.

Cuanto más avanza la automatización de los equipos, más influencia tiene el modelo PQCDMS (producción, calidad, costos, demoras, seguridad y motivación) sobre la disponibilidad de los equipos. Los diferentes modelos japoneses, más que metodologías que involucren tecnologías avanzadas, son técnicas que procuran hacer bien las tareas básicas y los principios fundamentales de todos los procesos productivos, con un alto dominio del conocimiento y de los pasos requeridos para el éxito en términos de calidad, producción y mantenimiento. El objetivo primordial de la calidad en el mantenimiento es asegurar la disponibilidad (Mora, 1999).

La utilización de los conceptos, parámetros y métodos de calidad para elevar el nivel de servicio al cliente en mantenimiento involucran el uso de términos como la terotecnología, calidad integral, metodologías modernas de fabricación, justo a tiempo, *lead production and lean production*⁴, entre otros (Rey, 1996).

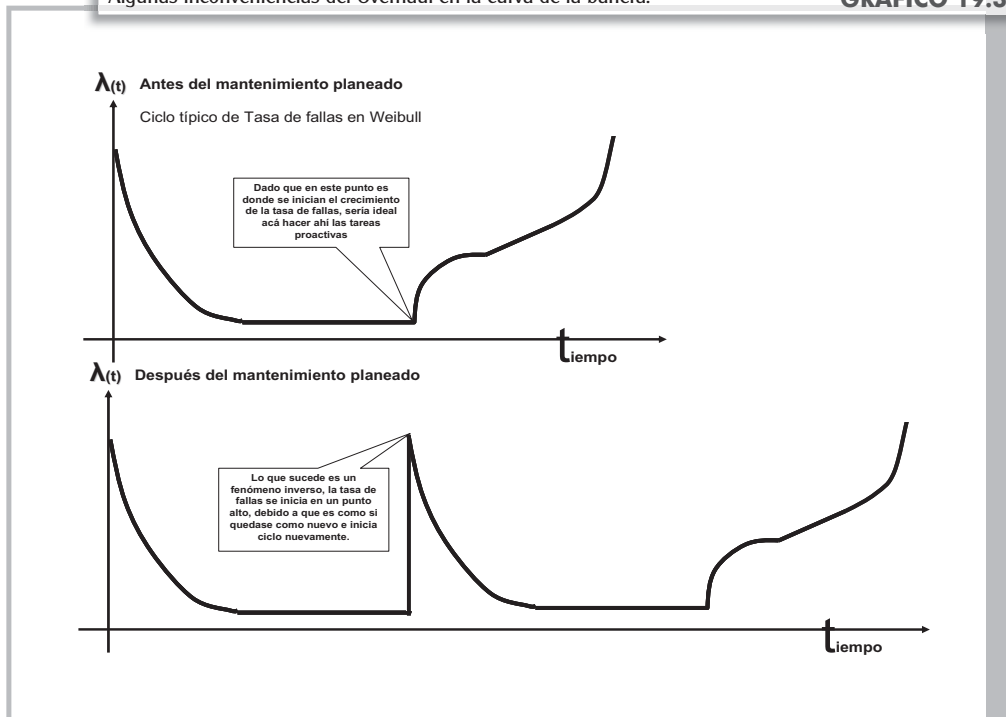
3 No siempre es considerado como una ventaja, ya que en ocasiones es más perjudicial realizar acciones de mantenimiento planeado, dependiendo del momento en que se encuentre el ciclo de vida acorde con la tasa de fallas, pues en vez de disminuir la tasa de fallas aumenta. Se presentan dos casos siguiente *Gráfico 19.3 - Algunas inconveniencias del Overhaul en la curva de la bañera*.

4 Producción en términos de tiempos de espera de los insumos por parte de proveedores, y Producción ajustada a las cantidades requeridas por los clientes.

La AFNOR (Asociación Francesa de Normas Técnicas) define la calidad en mantenimiento como el sistema de gestión que procura buscar y eliminar la causa de las averías, las anomalías y errores. La calidad en el mantenimiento exige tres pasos: fiabilidad, habilidades y competencias y disponibilidad. Los instrumentos de calidad son perfectamente aplicables al mantenimiento como, por ejemplo, la lista de verificación, la clasificación, el esquema gráfico de gestión y el método de Pareto. El mensaje, en síntesis, es procurar cero averías y máxima disponibilidad para optimizar la calidad (Souris, 1992).

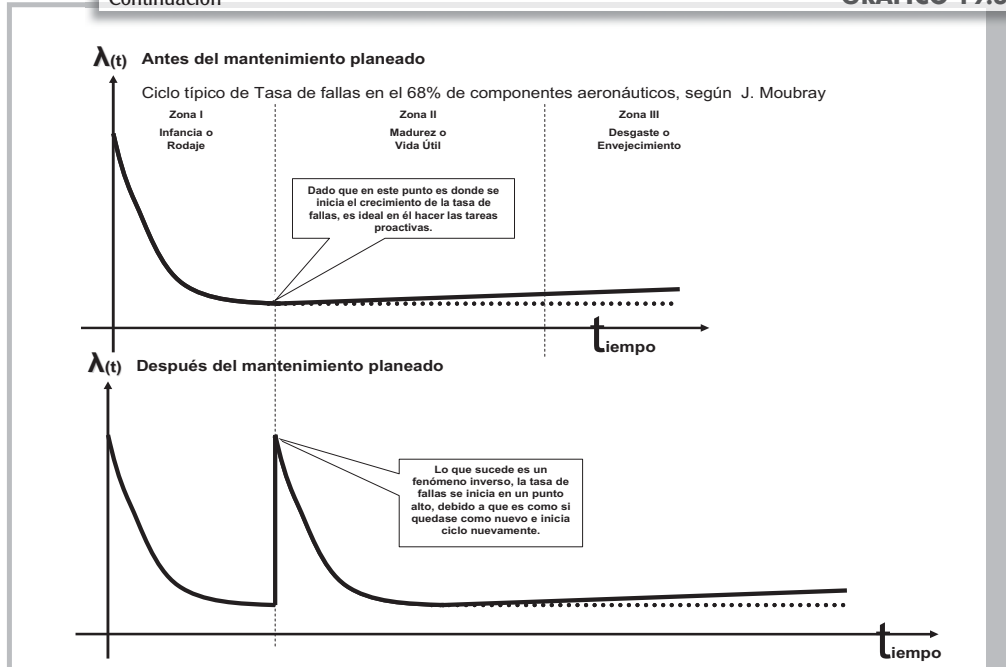
Algunas inconveniencias del Overhaul en la curva de la bañera.

GRÁFICO 19.3



Continuación

GRÁFICO 19.3



Total Quality Control o control de calidad total es el método integrador y organizador de todas las actividades relacionadas con los niveles instrumental, operativo y táctico de mantenimiento.

En la actualidad existe una perfecta simbiosis entre mantenimiento y *TQM*, ya que muchas de las técnicas que este último involucra conducen a mejoras en los diferentes niveles de mantenimiento.

TQC

Total Quality Control o control de calidad total es el método integrador y organizador de todas las actividades relacionadas con los niveles instrumental, operativo y táctico de mantenimiento (Wilson y otros, 1993). De tal forma que garantiza el mejoramiento continuo (*Kaizen*) sobre la calidad de todas las personas, los procesos y los macroprocesos involucrados en un esfuerzo totalmente integrado hacia el *Kaizen* en cada una de las etapas. El *TQC* es uno de los objetivos básicos de la táctica *TPM*.

TQM

Total Quality Management o manufactura de calidad total, también denominado manejo de la calidad total. La táctica *TPM* asume algunas de las características básicas del *TQM*, entre ellas:

- Compromiso total de las altas directivos de la organización donde se aplica.
- El personal que se involucra en los cambios posee plena autorización para ello, delegada de los niveles jerárquicos superiores.
- La planeación del proceso *TQM* es a largo plazo.

- El TQM requiere un cambio estructural, filosofal y organizacional de la empresa y de las personas involucradas.

El TQM es consecuencia de la integración que logra desarrollar W. Edwards Deming's en Japón, después de la Segunda Guerra Mundial, con los conceptos de análisis estadísticos para controlar la calidad de los productos elaborados y/o servicios entregados, y los estudios de proceso y la ética personal del pueblo japonés. Con ellos logra concebir e implementar un nuevo estilo de vida industrial y una nueva cultura de manejo eficaz y efectivo de las empresas, lo que posteriormente da lugar al *Total Quality Management* (Nakajima y otros, 1991).

En la actualidad existe una perfecta simbiosis entre mantenimiento y TQM, ya que muchas de las técnicas que este último involucra conducen a mejoras en los diferentes niveles de mantenimiento, con lo cual se eleva la productividad y la calidad de procesos como de los productos fabricados y/o de los servicios elaborados.

El TQM, el TQC y las 5S son herramientas aplicables a todas las operaciones, tácticas y estrategias de mantenimiento, totalmente válidas de usar en cualquiera de los niveles dos, tres y cuatro de mantenimiento. Aunque se asocian normalmente a la táctica TPM no son exclusivas de ésta, pues su aplicación es independiente de la táctica en que se encuentre involucrada la empresa (Wilson y otros, 1993).

Las 5S

Las 5S son instrumentos avanzados que permiten elevar la productividad y mejorar el ambiente de trabajo, tanto en mantenimiento como en producción. Una de sus ventajas estriba en que se constituyen en la base fundamental de toda operación y táctica.

Es ideal aplicar este instrumento en empresas que han superado el nivel operativo y se preparan a implementar una táctica en el nivel tres de mantenimiento, pues permite cohesionar y aglutinar el personal de producción con el recurso humano de mantenimiento alrededor de las máquinas que se evalúan. De esta forma se construyen las bases para aplicar una determinada táctica y, por ende, la posterior implementación de la estrategia integral de mantenimiento.

El Programa de las 5S, *Power Point - Presentación de Sistemas Visuales-5S*, consiste en actividades de orden y limpieza en el lugar de trabajo, las cuales por su sencillez permiten la participación de pequeños grupos a lo largo y ancho de la compañía. Se basan en la creencia de que cada individuo del grupo puede contribuir con el mejoramiento de su lugar de trabajo, en donde permanece gran parte de su tiempo.



El TQM, el TQC y las 5S son herramientas aplicables a

todas las operaciones, tácticas y estrategias de mantenimiento, totalmente válidas de usar en cualquiera de los niveles dos, tres y cuatro de mantenimiento.

Las 5S son instrumentos avanzados que permiten elevar la productividad y mejorar el ambiente de trabajo, tanto en mantenimiento como en producción. Una de sus ventajas estriba en que se constituyen en la base fundamental de toda operación y táctica.

El programa de las 5S consiste en actividades de orden y limpieza en el lugar de trabajo, que por su sencillez permiten la participación de pequeños grupos a lo largo y ancho de la compañía.

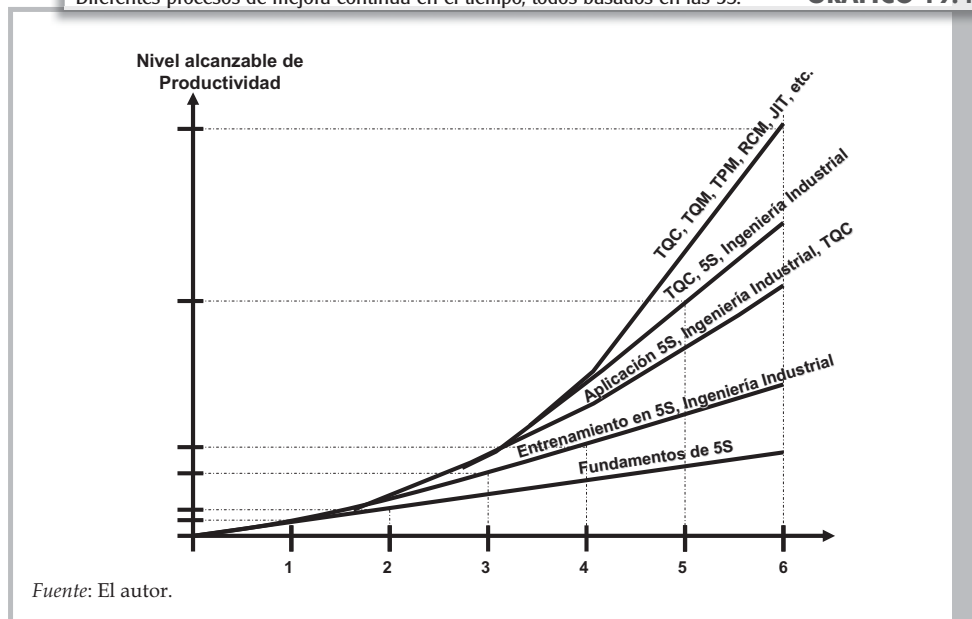
Ayuda en la



Power Point -
Presentación
de Sistemas
Visuales - 5S

Diferentes procesos de mejora continua en el tiempo, todos basados en las 5S.

GRÁFICO 19.4



Las 5S son un conjunto de cinco palabras japonesas que inician con la letra S:



Las 5S son un conjunto de cinco palabras japonesas que inician con la letra S: *Seiri*: seleccionar; *Seiton*: ordenar; *Seiso*: limpiar; *Seiketsu*: estandarizar; *Shitsuke*: autodisciplinar.

Significado y acciones de cada una de las 5S.

GRÁFICO 19.5

SEIRI	SELECCIONAR	: Separar, descartar, despejar
SEITON.....	ORDENAR	: Acomodar, ordenar
SEISO	LIMPIAR	: Limpiar inspeccionando
SEIKETSU	ESTANDARIZAR	: Mantener, uniformar, mejorar
SHITSUKE.....	AUTODISCIPLINA	: Entrenamiento y disciplina

La clave de éxito en la implementación de las 5S consiste en mantener siempre presentes los siguientes principios:

- Compromiso de todas las personas de mantenimiento y producción.
- Capacitación y entrenamiento permanente.

- Involucrar a todo el recurso humano de la organización, en especial a mantenimiento - producción - calidad.
- Reforzar y monitorear permanentemente el proceso reiniciándolo periódicamente, para mantener y superar los niveles alcanzados en cada una de las 5S.
- El sitio de trabajo debe mantenerse como una sala de recibo.
- 5S aumenta la seguridad en el puesto de trabajo.

Las ventajas de aplicar las 5S, se pueden condensar en los siguientes beneficios que se logran al desarrollar su implementación:

- Mejora la eficiencia en el trabajo y reduce los costos de operación.
- Mejora la productividad en el puesto de trabajo.
- Reduce la ocurrencia de accidentes de trabajo mediante la eliminación de pisos aceitosos y resbalosos, ambientes sucios, ropa inadecuada y operaciones inseguras.
- Incrementa la confiabilidad de las máquinas y se mantienen sus funciones.
- Se descubren funciones defectuosas en cada parte de la máquina (sobrecalentamiento, vibraciones, ruidos, anormales pequeñas grietas o roturas, etc.).
- Reduce los defectos y estabiliza la calidad de los productos.
- Fortalece la confianza de los clientes en la organización y mejora las ventas.
- Contribuye a que las entregas se hagan a tiempo.
- Fortalece la cultura del mejoramiento continuo.

En general, las 5S se catalogan dentro de las mejores prácticas (Benítez, 2007). Y se constituyen en una herramienta avanzada de mantenimiento, fundamental para la posterior aplicación de las operaciones (correctivas, modificativas, preventivas y/o predictivas) y tácticas mediante una estrategia integral de mantenimiento.



En general, las 5S se catalogan dentro de las mejores prácticas y se constituyen en una herramienta avanzada de mantenimiento, fundamental para la posterior aplicación de las operaciones correctivas, modificativas, preventivas y/o predictivas y tácticas.

Objetivos y propósitos de las 5S.

CUADRO 19.1

5S	Significado	Finalidad
SEIRI Seleccionar	Se basa en seleccionar los objetos innecesarios en el lugar de trabajo y descartarlos; lo que no sirve se debe eliminar o donarlo. De una forma similar debe actuar en las actitudes mentales, dejando de lado todas las actitudes negativas que no permiten crecer, como son: prejuicios, malas intenciones, comentarios innecesarios, falta de respeto, dudas, temores.	* Hacer el trabajo más fácil al eliminar obstáculos. * Prescindir de cuidar cosas innecesarias y evitar las pérdidas de los objetos. * Prevenir operaciones erróneas o fallas causadas por cosas innecesarias.
SEITON Ordenar SEISO	Consiste en organizar los objetos necesarios de tal forma que sean fácilmente asequibles para su uso: * Un lugar para cada cosa. * Cada cosa en su lugar. Permite la organización de los objetos y utensilios de una forma sistémica permite reducir los tiempos administrativos y logísticos de mantenimiento y producción, haciendo más visible su ubicación. También se aplica a la forma de actuar y de comportamiento social humano en el trabajo, sirve para reglamentar y estandarizar las normas de vida y conducta.	* Prevenir las pérdidas de tiempo en la ubicación y traslado de objetos, las cuales son actividades que no generan valor agregado y producen retrasos en los tiempos de mantenimiento y producción, evitando demoras en ambos procesos. * Asegurar que lo que entra primero sale primero, base de la prevención de pérdidas por deterioro, debido a la vida útil de algunas materias primas para la producción. Aquí es recomendable aplicar un término de la contabilidad, los inventarios FIFO <i>First in first out</i>, lo primero en entrar debe ser lo primero en salir). * Establecer procedimientos e instrucciones que faciliten la ejecución de las operaciones, actividades y procesos de mantenimiento y operación.
SEISO Limpiar	Procura limpiar completamente el lugar de trabajo para que no haya elementos exógenos al proceso, disminuyendo los problemas de averías de las máquinas, contaminación, inicio de fallas, etc.	* Implantar sistemas de control visual que permitan tanto a nivel del personal de la empresa como a nivel externo, ubicar fácilmente los lugares y los objetos, que permitan un fácil entendimiento de los procesos y los procedimientos de producción y mantenimiento. * Facilitar la elaboración de productos de calidad. * Combinar la limpieza con la inspección, con el fin de detectar fallas potenciales antes de que se inicien. * Hacer del lugar de trabajo un sitio seguro y confortable.
SEIKETSU Estandarizar	Mantiene en orden y limpio el sitio de trabajo y los utensilios de mantenimiento y producción. Se preocupa por el mantenimiento del ambiente de trabajo, logrando así mejorar el aspecto laboral, reducir la contaminación, disminuir los accidentes y los costos de mantenimiento, calidad y producción. Trata de mantener los niveles alcanzados en términos de estandarización de actividades y procesos.	* Mantener los niveles logrados de SEIRI, SEITON y SEISO. * Eliminar las causas que provocan la suciedad y un ambiente de trabajo no confortable. * Proteger al trabajador de condiciones peligrosas. * Estandarizar y visualizar los procedimientos de operación y mantenimiento diario. * Permitir que las personas de mantenimiento y producción desarrollen y muestren su talento y creatividad.
SHITSUKE Autodisciplina	Entrena a las personas para que mantengan disciplina, autonomía, buenas prácticas de orden y limpieza. El recurso humano reconoce la bondad de la aplicación de las 5S para el beneficio colectivo e individual. Es un proceso que requiere tiempo, pero sobre todo mucho esfuerzo y constancia de quienes son responsables del proceso de implantación.	* Hacer a las personas más disciplinadas y con buenos modales, en otras palabras se necesita fomentar nuevas costumbres y valores dentro de la empresa, hace énfasis en descartar los paradigmas antiguos y adquirir otros más productivos. * Cumplir con las reglas de la empresa y de la sociedad. * Tener un personal más proactivo.

Fuente: El autor.

Ver Programa -Power Point - Presentación de Sistemas visuales - 5S.

Ayuda en la



Power Point -
Presentación de
Sistemas visuales - 5S.

19.2 MEJORAMIENTO CONTINUO

Consiste en tratar de optimizar el uso de los factores básicos de producción y mantenimiento por medio del análisis permanente de actividades, procesos y macroprocesos. Con el fin de eliminar tiempos de demora, controlar y erradicar fallas, reducir costos, elevar niveles de servicio, mejorar la productividad, incrementar la rentabilidad y aumentar la competitividad de la empresa, sobre todo en las áreas de mantenimiento, calidad y producción.

Dentro de la filosofía de mejoramiento continuo son muy importantes aspectos como el enfoque de mantenimiento hacia el servicio centrado en el cliente, las 5S, el TPM, y la calidad total, la cultura del cambio permanente, buscando mejores prácticas, asesoría al cliente interno, etc. (Benítez, 2007).

Existen diversos métodos que procuran el mejoramiento continuo en cierta forma aplicables a la gestión de mantenimiento. Entre ellos sobresalen el *Kobetsu-Kaizen* que se fundamenta en la superación individual y grupal permanente y el *PM* (con P de *Physique*, física, M de *Machine*, máquina y *Matières*, materiales, en francés), que consiste en estudios frecuentes de procesos de materias primas, máquinas, energía y señales. Los cinco pasos del *PM* con los cuales mantenimiento aborda la solución de averías en la máquina antes de que repercuta sobre los productos, con el fin de obtener la mejor calidad en ellos, son:

- Cumplir las condiciones básicas (limpieza, engrasados, ajuste, etc.).
- Respetar las condiciones de utilización.
- Reparar todas las degradaciones observadas.
- Mejorar las deficiencias de diseño.
- Mejorar las condiciones de operación, producción y mantenimiento.

Asociado a los conceptos de mejoramiento continuo, a las 5S, a la calidad total, se encuentra el Kaizen. Es una filosofía, un modo de vida que busca mejorar cada día lo hecho el día anterior. No se trata de dar enormes saltos para obtener grandes cambios. Se trata de un lograr un mejoramiento lento y seguro, con el establecimiento de estándares que se deben ir superando continuamente.

La esencia del Kaizen es sencilla y directa: Kaizen significa mejoramiento.



El mejoramiento continuo consiste en tratar de optimizar el uso de los factores básicos de producción y mantenimiento a través del análisis permanente de actividades, procesos y macroprocesos.

El Kaizen es una filosofía, un modo de vida que busca mejorar cada día lo hecho el día anterior. No se trata de dar enormes saltos para obtener grandes cambios, sino de lograr un mejoramiento lento y seguro, con el establecimiento de estándares que se deben ir superando poco a poco.



La esencia del Kaizen es sencilla y directa: Kaizen

significa mejoramiento.

Más aun, significa mejoramiento progresivo, continuo, que involucra a todos en la organización.

Kaizen es un enfoque humanista, porque espera que todos participen en él.

El mensaje de la filosofía

Kaizen es que no debe pasar un día sin que se haya hecho alguna clase de mejoramiento, en algún lugar de la compañía.

No habrá progreso alguno si se continúan haciendo las cosas de la misma manera todo el tiempo.

Más aun, significa mejoramiento progresivo, continuo, que involucra a todos en la organización.

Kaizen es un enfoque humanista, porque espera que todos participen en él.

El mensaje de la filosofía Kaizen es que no debe pasar un día sin que se haya hecho alguna clase de mejoramiento, en algún lugar de la compañía. A los ingenieros de las plantas japonesas con frecuencia se les previene con mensajes como, "...no habrá progreso alguno si ustedes continúan haciendo las cosas de la misma manera todo el tiempo..." (Benítez, 2007).

En relación con el TPM y concretamente con uno de sus pilares básicos, como es el mantenimiento autónomo, es importante resaltar sus objetivos: el mantenimiento autónomo está compuesto por un conjunto de actividades que se realizan diariamente por todos los trabajadores. Incluye inspección, lubricación, limpieza, cambio de herramientas y piezas, estudio de posibles mejoras, análisis y solución de problemas del equipo y acciones que conduzcan a mantenerlo en las mejores condiciones de funcionamiento.

Estas actividades se deben realizar siguiendo estándares previamente preparados con la colaboración de los operarios. Los operarios deben ser entrenados y deben contar con los conocimientos necesarios para dominar el equipo que operan.

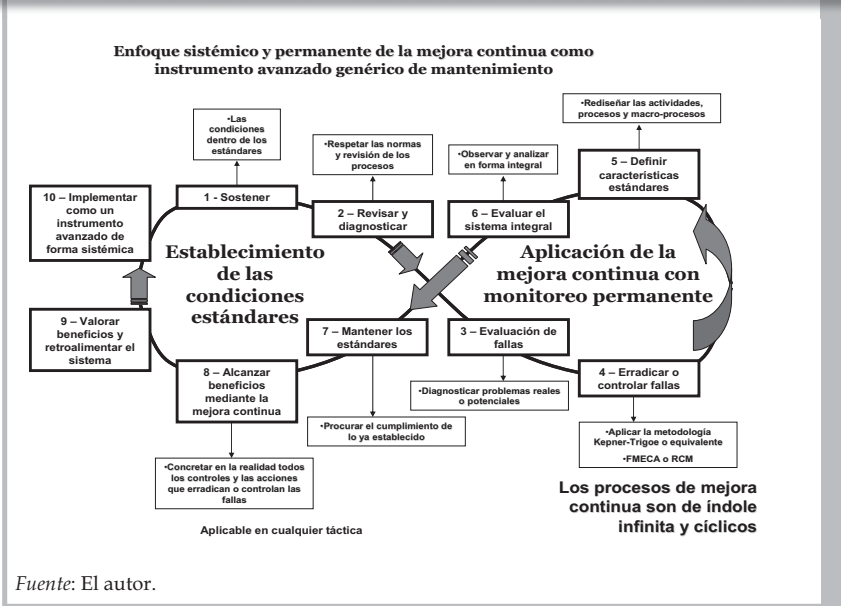
Algunos de los propósitos del mantenimiento autónomo (Benítez, 2007) son:

- Emplear el equipo como instrumento para el aprendizaje y la adquisición de conocimiento.
- Desarrollar nuevas habilidades para el análisis de problemas y creación de un nuevo pensamiento sobre el trabajo.
- Evitar el deterioro del equipo mediante la operación correcta y la verificación permanente, de acuerdo con los estándares establecidos para ello.
- Mejorar el funcionamiento del equipo con el aporte creativo del operador.
- Construir y mantener las condiciones necesarias para que el equipo funcione sin averías y rendimiento pleno.
- Mejorar la seguridad en el trabajo.
- Lograr un total sentido de pertenencia y responsabilidad del trabajador.
- Mejora de la moral en el trabajo.

Es importante recordar que el mantenimiento autónomo funciona donde no se trabaja con tecnologías demasiado avanzadas o de punta, es decir, tiene cabida en empresas de tecnologías medias o incipientes (Mora, 2007a).

Desarrollo del mejoramiento continuo en mantenimiento.

GRÁFICO 19.6



Es importante recordar que el mantenimiento autónomo funciona donde no se trabaja con tecnologías demasiado avanzadas o de punta, es decir, tiene cabida en empresas de tecnologías medias o incipientes.

La utilización de las prácticas de mejoramiento debe tener siempre parámetros de medición, mediante el uso de índices, rendimientos o indicadores de actividades, procesos o macroprocesos, tales como CMD, LCC, entre otros.

La utilización de las prácticas de mejoramiento debe tener siempre parámetros de medición, mediante el uso de índices, rendimientos o indicadores de actividades, procesos o macroprocesos, tales como CMD, LCC, etc., con el fin de evaluar si verdaderamente existe mejora en los procesos o en las actividades que se rediseñan o intervienen, ya que el solo hecho de verbalizar los conceptos del mejoramiento continuo no constituyen el método.

19.3 HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS

El análisis exhaustivo y completo de los datos obtenidos de procesos de mantenimiento y producción mediante las herramientas estadísticas, genera instrumentos avanzados de mantenimiento que ayudan a encontrar fallas para su eliminación o control, causas de productos y servicios defectuosos para su erradicación, fundamentos cuantitativos para la selección o mejora de acciones - táctica - estrategia de mantenimiento y/o producción, elementos básicos para una mejor toma de decisiones sobre el manejo y



El análisis exhaustivo y completo de los datos obtenidos de procesos de mantenimiento y producción, mediante las herramientas estadísticas, genera instrumentos avanzados de mantenimiento que ayudan a encontrar fallas para su eliminación o control.

operación de los instrumentos básicos de mantenimiento – producción – calidad, índices para el mejor control de los procesos, etc.

La desviación de los estándares establecidos como óptimos es la causa de los servicios (reparaciones o tareas proactivas) inadecuados de mantenimiento y/o producción. Esta variación se puede encontrar en cuatro fuentes:

- Materiales de la misma calidad y con idénticas especificaciones técnicas.
- Máquinas, herramientas, utensilios y repuestos adecuados.
- Métodos y procedimientos estándar, normalizados y reglamentados de trabajo.
- Verificaciones de calidad de las acciones y procesos de trabajos realizados, similares en todas las inspecciones.

Cuando algunas de estas características varían de los estándares establecidos se producen errores en las acciones, tácticas o estrategias de mantenimiento; la estadística provee las herramientas básicas para su análisis y control.

Las causas pueden ser innumerables, pero sólo algunas de ellas generan una gran cantidad de fallas y productos, como servicios defectuosos con características fuera del estándar.

La estrategia para encontrar las causas de fallas y de servicios defectuosos requiere varios elementos básicos: el primero es la actitud de las personas hacia el cambio para encontrar las fuentes de errores. El segundo es el grado de entrenamiento para el desarrollo de habilidades y competencias del personal analítico de producción y mantenimiento para realizar los estudios y dedicar gran parte del tiempo a la captura de las causas de las desviaciones. Un tercer elemento lo constituyen las herramientas estadísticas, pero es importante aclarar que estas últimas por sí solas no solucionan los problemas de variación; requiere los tres elementos simultáneos y de muchos otros menos relevantes.

19.4 DIAGNÓSTICO, CONTROL Y REDISEÑO DE PROCESOS DE MANTENIMIENTO Y PRODUCCIÓN

El control y el rediseño de proceso se puede considerar un instrumento avanzado de mantenimiento, dado que permite revisar todas las actividades y elementos estructurales de un proceso, y su análisis detallado permite encontrar situaciones fuera del estándar. Por medio de estos métodos se puede establecer un proceso coherente, lógico y organizado de todos los recursos y acciones de mantenimiento y producción.

En el medio sobresalen dos metodologías: *Vital Signs - Performance* (signos vitales del *Quantum Performance*) (Hronec, 1995), en las que se establece un control total, detallado e interrelacionado del sistema de mantenimiento⁵ o producción en tiempo real. Con participación de todos los empleados y trabajadores de la empresa (Mora, 2007a). Y últimamente se trabaja también con *Balanced ScoreCard*⁶ (Cuadros y Tableros de Control) (Kaplan, y otros, 1997), que ha sido aplicado a la táctica de mantenimiento RCM por varios autores, en los últimos tiempos.

La metodología *signos vitales* permite analizar todas las actividades, los procesos y los macroprocesos que se dan en un sistema empresarial. Y es muy útil para evaluar los cuatro niveles de mantenimiento: instrumental, operativo, táctico y estratégico.

Se basa en conceptos de medición y estudio logístico del tiempo, costo y calidad de las acciones operativas de un determinado proceso. Usa una metodología sistémica para su desarrollo, involucra a todo el personal directo e indirecto de una organización desde los proveedores de los suplidores, hasta los consumidores de los clientes directos. E involucra entidades financieras y logísticas que apoyan en el proceso a la empresa que se estudia. Genera bienestar en las personas y mejora notoriamente el clima organizacional. Eleva el nivel de compromisos e involucra en su máximo grado a todo el recurso humano.

El *Vital Signs*, en suma, es una metodología que enseña una forma sencilla de empoderamiento a empleados y trabajadores. Permite el fácil reconocimiento y entendimiento de todas las actividades y procesos por parte de los miembros de la organización. Propende hacia la organización por procesos más que por funciones. Procura satisfacer a los clientes externos e internos de la compañía. Permite medir el grado de aplicación real de visión-misión-valores-estrategia-comunicación, etc., en todas las personas internas y externas de la empresa.

La aplicación correcta de metodología signos vitales logra el equilibrio entre los intereses personales y empresariales. Divulga y sustenta los métodos de medición y evaluación de todos los miembros de la organización, etc. En fin, son innumerables los beneficios de corto, de mediano y de largo plazos que este método implica al revisar en una forma integral y específica el área de mantenimiento (Mora y otros, 2003 y Hronec, 1995).



La metodología *signos vitales* permite analizar todas las actividades, los procesos y los macroprocesos que se dan en un sistema empresarial y es muy útil para evaluar los cuatro niveles de mantenimiento: instrumental, operativo, táctico y estratégico.

El *Vital Signs* es una metodología que enseña una forma sencilla de empoderamiento a empleados y trabajadores, y permite el fácil reconocimiento y entendimiento de todas las actividades y procesos por parte de los miembros de la organización.

Los métodos de *Balanced ScoreCard* como *Vital Signs* persiguen fines equivalentes y usan metodologías similares, por lo que ambos son recomendables para los propósitos fundamentales de una empresa u organización.

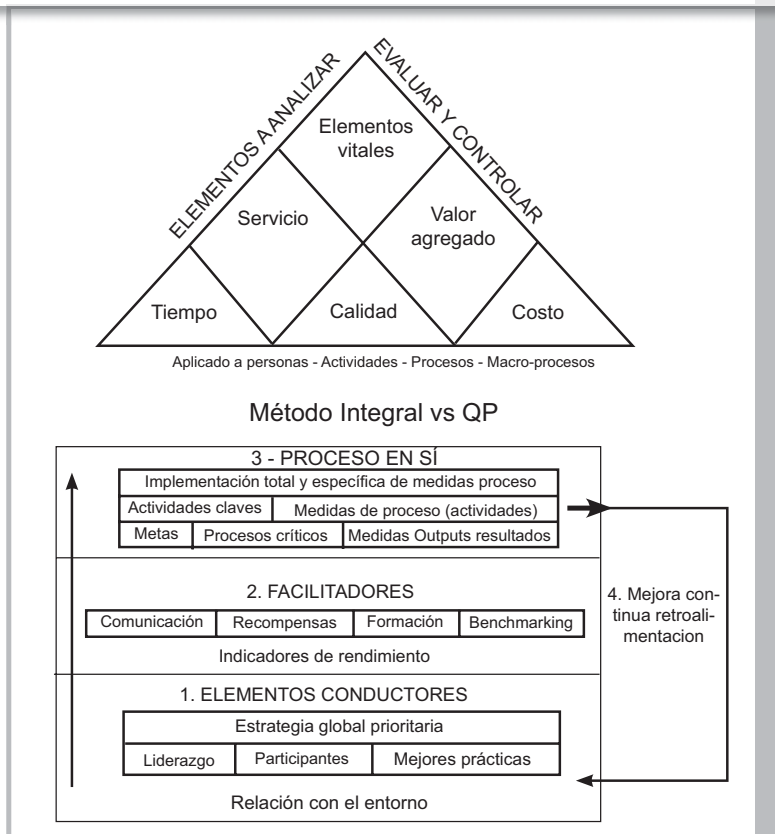
5 La metodología de Hronec no sólo es propia de mantenimiento; también es aplicable a todo sistema bajo el esquema kantiano.

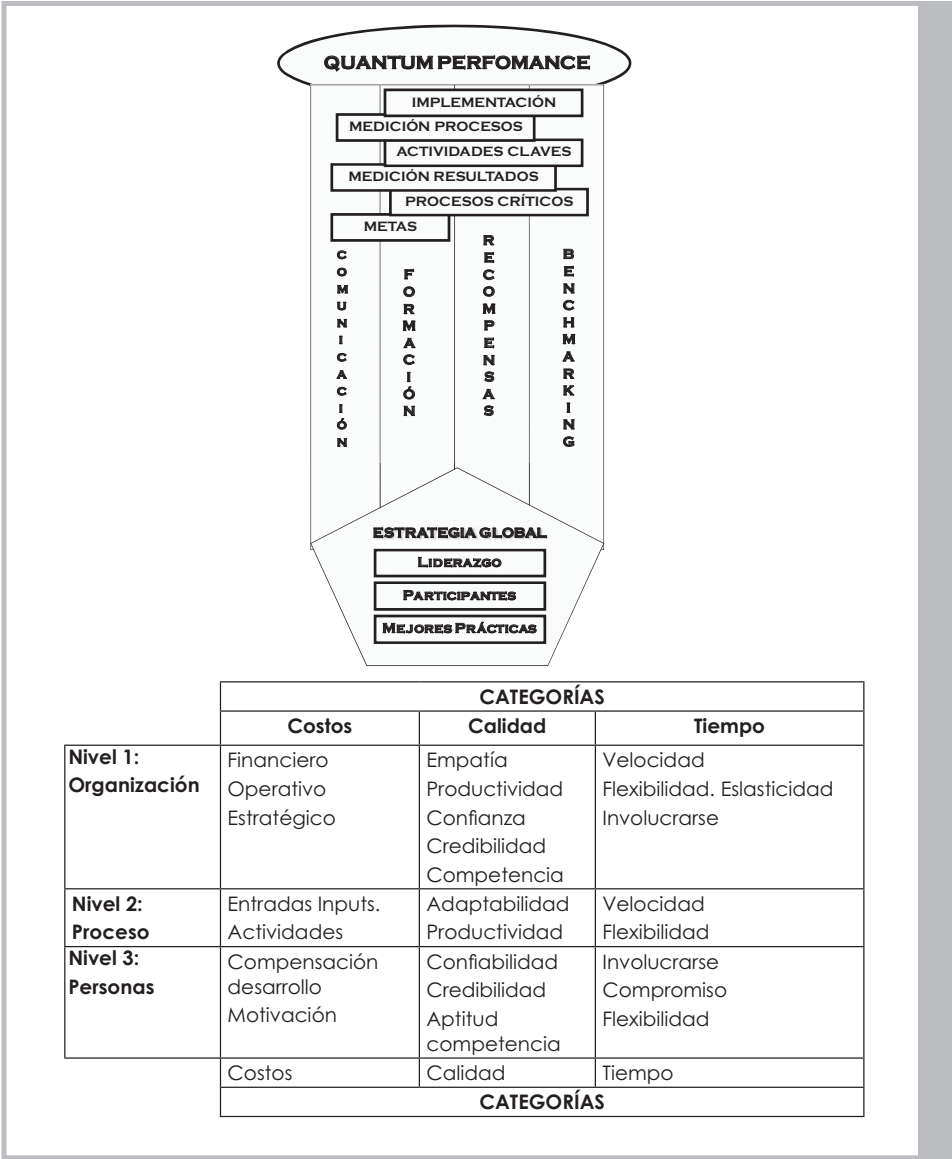
6 El modelo ARARMA, de Parzen, permite mejorar el espectro de la estacionariedad (centramiento de la media y eliminación del ruido o aleatoriedad o desviación estándar) de la metodología de Box-Jenkins con el operador diferencia, a la vez que amplía el uso de Box-Jenkins y facilita la aplicación más generalizada de los modelos modernos de series temporales.

Los métodos de *Balanced ScoreCard* como *Vital Signs* persiguen fines equivalentes y usan metodologías similares, por lo que ambos son recomendables para los propósitos enunciados anteriormente.

Elementos, sistema y conceptos básicos del *Vital Signs* y *Performance de Hronec*.

GRÁFICO 19.7





La estadística alcanza el nivel de instrumento avanzado de mantenimiento y producción, ya que es la base en el manejo de los factores productivos de ambas áreas. También sirve para el manejo y el control de las operaciones en el nivel dos de mantenimiento, y de igual forma es la herramienta con la cual se analizan los distintos elementos CMD y asociados para decidir la mejor táctica.



La estadística alcanza el nivel de instrumento avanzado de mantenimiento y producción, ya que es la base en el manejo de los factores productivos de ambas áreas.

En todo proceso de manejo de información es clave tener un objetivo claro y alcanzable.

Para cada propósito de cualquiera de los cuatro niveles de mantenimiento se establecen objetivos y, por ende, la información requerida que permita su análisis, su comparación, su estratificación y su grado de dispersión frente al propósito deseado.

Sirve, además, como metodología para dimensionar el éxito alcanzado en el nivel cuatro (estratégico) de mantenimiento, con el fin de calcular y establecer los diferentes índices, rendimientos e indicadores.

Entre los elementos básicos y los métodos fundamentales de la estadística, sobresalen:

19.4.1 Obtención y manejo de los datos

Desde el nivel básico de mantenimiento, el instrumental, es necesaria la recolección exhaustiva de datos, como tiempos de fallas y reparaciones, unidades de horas útiles sin fallas, medidas de tiempo de retrasos y demoras en la realización de los mantenimientos y adquisición de suministros. Así mismo, registros de unidades en inventarios, como consumos y entradas, historia de repuestos y reparaciones realizadas, costos de las órdenes de trabajo realizadas, modificaciones a equipos, y demás información pertinente que proporcione las bases para avanzar a los niveles superiores de mantenimiento.

En la recolección de información se pueden establecer tres objetivos importantes:

- Control y monitoreo del proceso integral y específico de mantenimiento.
- Análisis de todo lo que esté fuera del estándar.
- Inspecciones de los servicios de mantenimiento realizados.

Lo primero que debe tener todo proceso de manejo de datos e información es un objetivo claro y alcanzable. Para cada propósito de cualquiera de los cuatro niveles de mantenimiento se establecen objetivos y, por ende, la información requerida que permita su análisis, su comparación, su estratificación y su grado de dispersión frente al propósito deseado, con el fin de proveer la argumentación necesaria frente a la toma de decisiones.

El segundo aspecto que se tiene en cuenta es la validez y la oportunidad del registro de información. Es necesario validar mediante dos o más metodologías la información adquirida y debe ser registrada por personas debidamente entrenadas para ello. De igual manera, la información se obtiene en tiempo real con el fin de decidir oportunamente toda acción de mantenimiento requerida.

Los formatos y hojas físicas (o digitales) de registro deben ser cuidadosamente elaboradas con el fin de establecer la cantidad básica, de tal forma que no se vaya a caer en el exceso de información. El sistema de información debe proveer la debida arquitectura para el registro, el manipulación y el análisis de los datos en tiempo real (Kume, 1992).

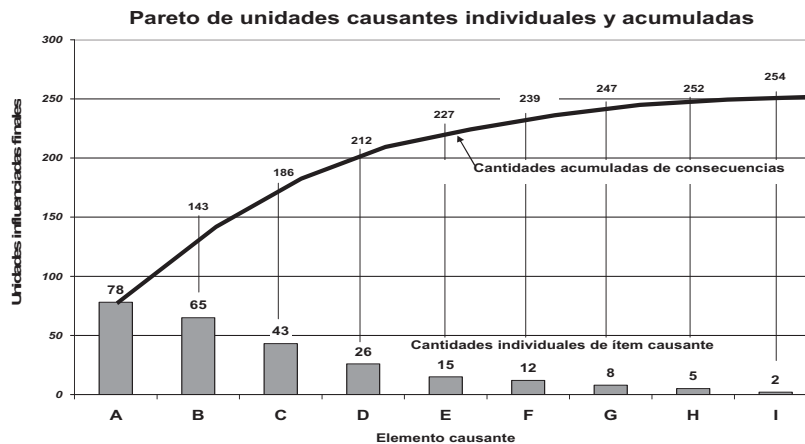
19.4.2 Análisis y diagramas de Pareto

Es una metodología que permite ver el grado de influencia de unos pocos elementos en el total de los resultados obtenidos. Es notoria su bondad en el sentido de que puede registrar la influencia de unos cuantos elementos en un gran porcentaje del fenómeno final. Permite descartar la influencia de muchos elementos triviales en la consecuencia de una actividad o falla.

Gráfico y diagrama de Pareto.

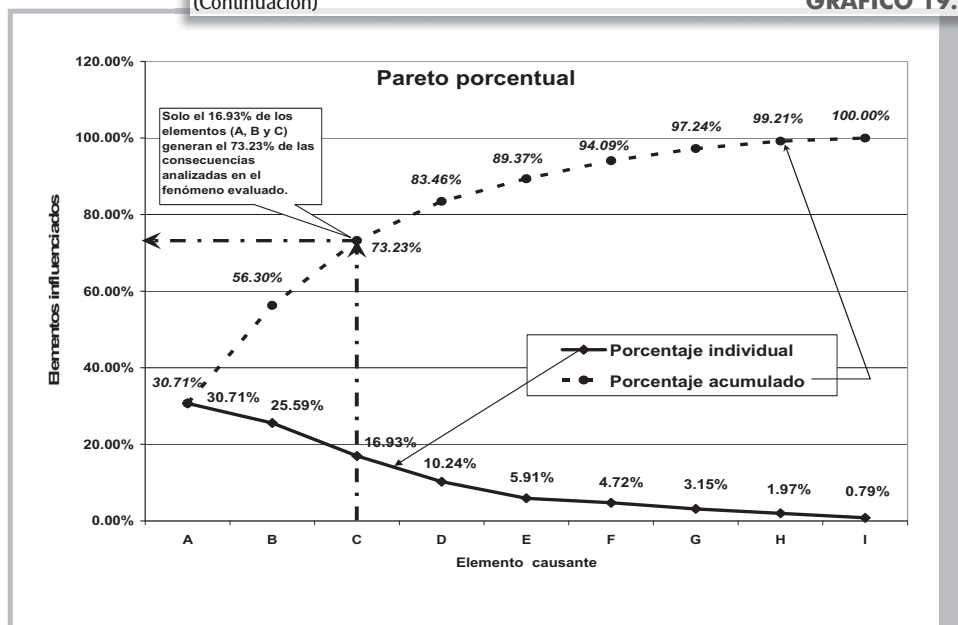
GRÁFICO 19.8

Pareto		Fenómeno final evaluado			
Ítem	Elementos causantes	Consecuencias individuales	Consecuencias acumuladas	Porcentaje individual	Porcentaje acumulado
A	Elemento 1	78	78	30,71	30,71
B	Elemento 2	65	143	25,59	56,30
C	Elemento 3	43	186	16,93	73,23
D		26	212	10,24	83,46
E	Elemento n	15	227	5,91	89,37
F	Elemento n+1	12	239	4,72	94,09
G	Elemento n+2	8	247	3,15	97,24
H	Elemento n+....	5	252	1,97	99,21
I	Elemento final	2	254	0,79	100,00
	Gran total	254		100,00	



(Continuación)

GRÁFICO 19.8

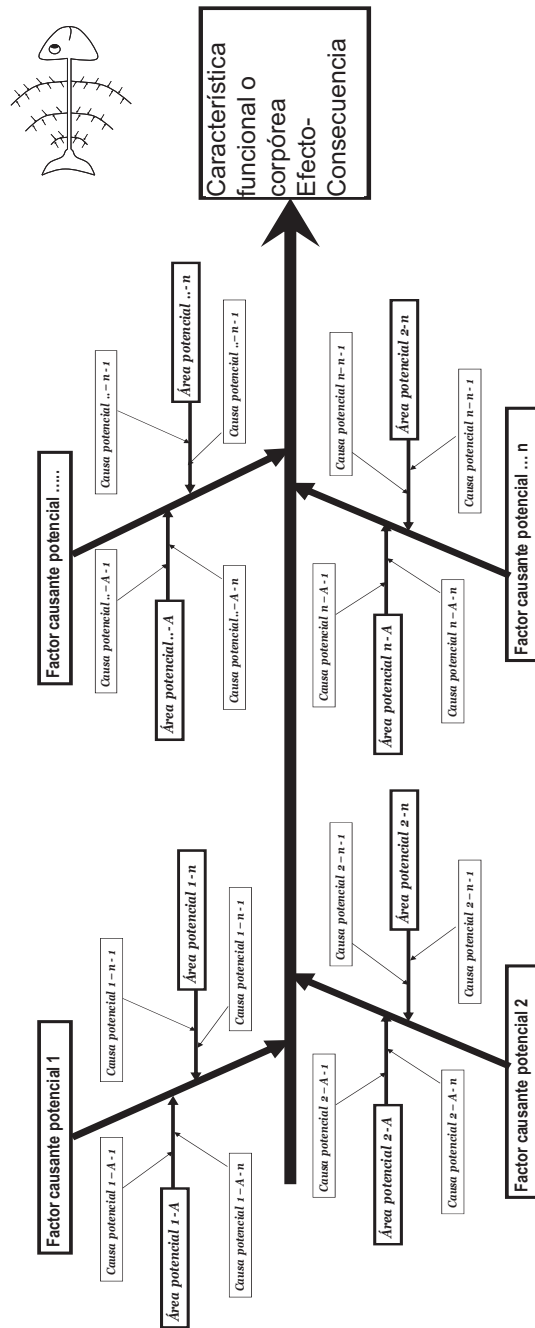


19.4.3 Diagramas causa-efecto

Los instrumentos avanzados de mantenimiento pueden contar con una herramienta vital en los procesos de causas de fallas o productos y/o servicios defectuosos, la cual es el diagrama causa-efecto, desarrollado en Japón por Kaoru Ishikawa en 1953 (Ishikawa, 1985); el método también aplica a cualquier análisis de los cuatro niveles de mantenimiento.

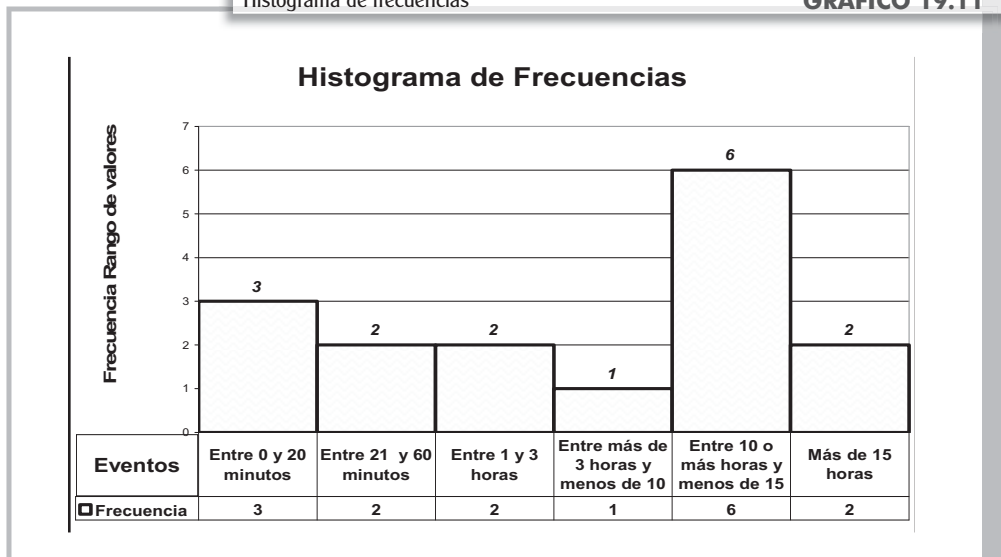
GRÁFICO 19.9

Diagrama causa-efecto de Ishikawa.



Histograma de frecuencias

GRÁFICO 19.11



Las medidas de posición: moda, el evento que más se repite es 10,0 horas y la mediana que es el número del medio donde la mitad de los números del conjunto está por encima de ella y la otra mitad por debajo es 9,50 horas.

La media aritmética de los eventos de no funcionalidad tomados independientemente es de 8,49 horas.

19.4.5 Distribuciones

La representación numérica y gráfica de eventos de mantenimiento y/o producción, mediante el uso de distribuciones, es un instrumento avanzado de mantenimiento útil para el análisis, el estudio, la comprensión y la toma de decisiones en cualquiera de los cuatro niveles de mantenimiento. Su aplicación permite observar el comportamiento en el tiempo de cualquier fenómeno.

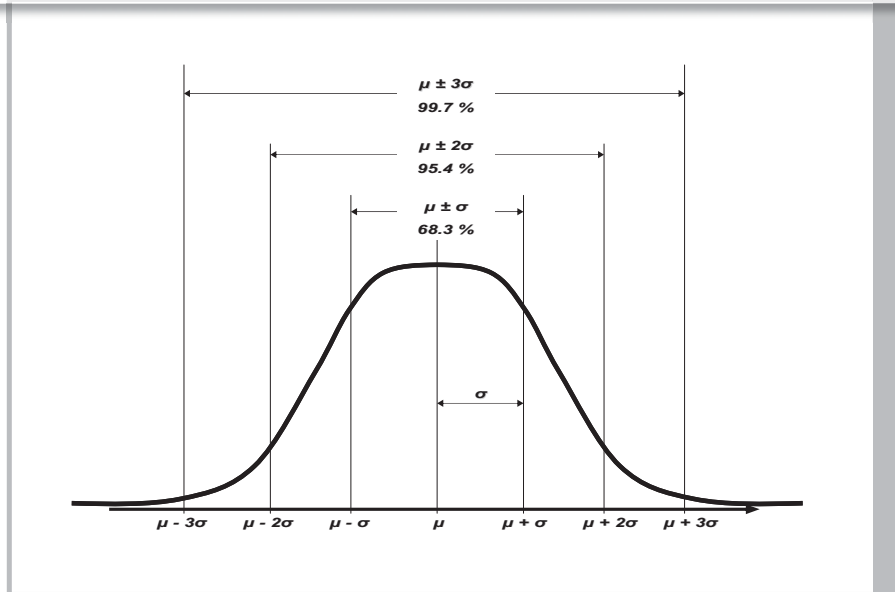
En las partes anteriores se presentan diferentes distribuciones y sus análisis, desde la óptica del CMD, entre las cuales, para el método de distribuciones se distinguen: Normal, LogNormal, Weibull y Gamma. Para la valoración de indicadores y parámetros CMD se pueden utilizar los conceptos desarrollados precedentemente para cualquier otra utilización. Para trabajar con los parámetros de cada una de las distribuciones, *ver* las partes anteriores correspondientes.



La representación numérica y gráfica de eventos de mantenimiento y/o producción mediante el uso de *distribuciones* es un instrumento avanzado de mantenimiento, útil para el análisis, el estudio, la comprensión y la toma de decisiones en cualquiera de los cuatro niveles de mantenimiento.

Distribución normal con sus parámetros μ , σ y su probabilidad⁷

GRÁFICO 19.12



La probabilidad de una distribución normal, para control de procesos estadísticos, se realiza a partir del uso de la tabla de distribución normal y de la estandarización de la distribución, así:

► ECUACIÓN 19.1 - Estandarización en distribución normal, mediante la transformación de una variable aleatoria x en:

$$u = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Donde: la medida estándar u , se distribuye como una distribución normal.

La probabilidad de que una variable aleatoria x caiga dentro de los límites $\mu \pm u \cdot \sigma$, se describe en tres opciones en el Gráfico 19.12. Técnicamente una variable normal puede tomar valores entre $-\infty$ y $+\infty$. En el gráfico descrito se observa que para una probabilidad del 99,7%, u vale 3, lo cual en la práctica describe que la posibilidad de que x caiga fuera de los límites de $\mu \pm 3\sigma$ es despreciable. Este hecho se denomina la *regla de 3 sigma* y es fundamental en los análisis estadísticos de hojas de control de procesos.

La lectura de las probabilidades se puede obtener directamente del *Excel de Microsoft Office*. Tiene dos posibilidades: Dado un valor de z , encuentra la probabilidad

⁷ Conocida también como campana de Gauss-Laplace.

asignada por la distribución normal, mediante la utilización del argumento de función DIST.NORM.ESTAND.INV (z), y obtiene de esta manera la probabilidad con un z conocido. O el caso inverso en el que se tiene la probabilidad y se desea conocer la z correspondiente, entonces se usa el argumento de función de Excel DISTR.NORM.ESTAND (probabilidad). Para esto puede usar en la Web, *Distribución Normal Z y probabilidades*, que se encuentra en la sección *Software* (Gráfico 19.13).

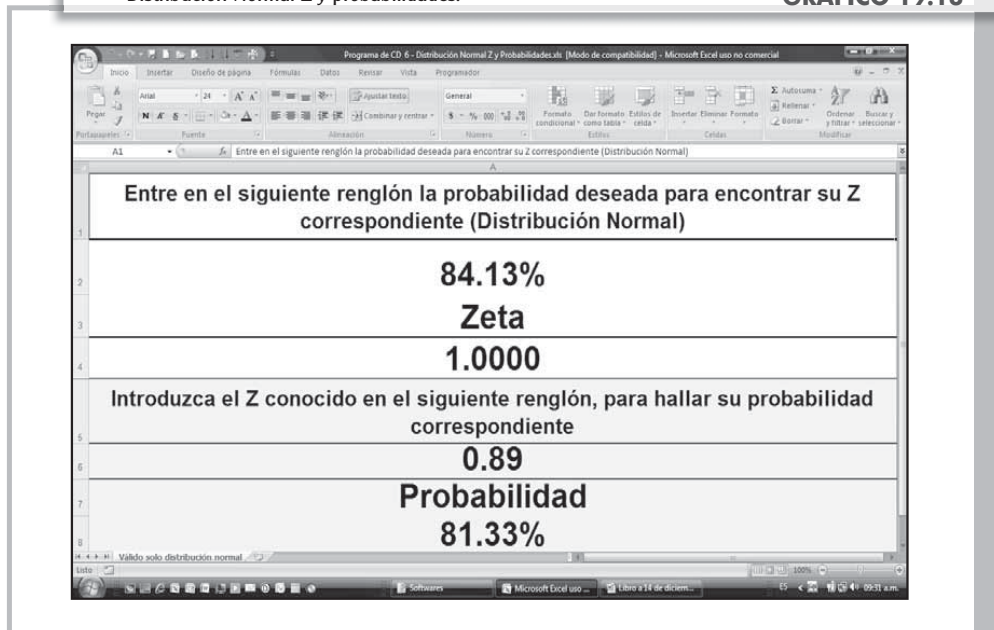
Ayuda en la



Distribución
Normal Z y
probabilidades

Distribución Normal Z y probabilidades.

GRÁFICO 19.13



19.5 DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN, CORRELACIÓN Y REGRESIÓN LINEAL

La relación entre dos variables, la influencia de una en la otra o viceversa, la concentración entre pares de datos de dos variables, la ecuación que las relaciona, etc., se pueden lograr con la construcción de los diagramas de dispersión, mediante la medición del grado de correlación de las dos variables y con la determinación de una ecuación por el método de regresión lineal que cuantifique la relación y dependencia entre ambas variables. Las dos variables pueden ser una característica de mantenimiento y un factor de causa, dos características o dos factores asociados a una característica.

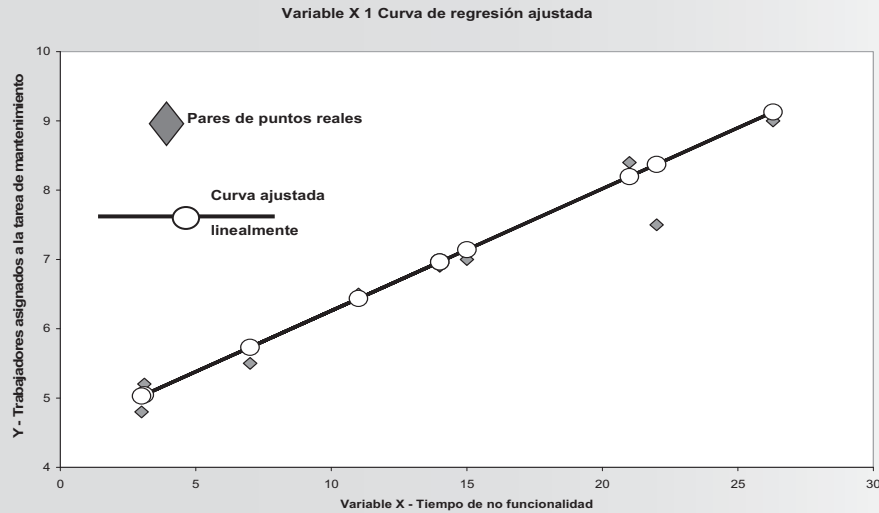
A manera de ejemplo, se desea conocer la relación entre los pares de datos de tiempos de no funcionalidad (en horas), y el número de trabajadores asignados a esa reparación o mantenimiento planeado.

EJEMPLO 19.3

Diagramas de dispersión, correlación y regresión lineal

	Variable X	Variable Y
Ítem	Tiempo de no funcionalidad	Número de trabajadores
1	3,1	5,2
2	14	7
3	15	7
4	26,3	9
5	22	7,5
6	21	8,4
7	3	4,8
8	14	6,9
9	7	5,5
10	11	6,5

$Ajuste = \sum Y_j - \hat{Y}_j = 0.000$	Ajuste	Coefficiente de determinación muestral r^2 ajustado	0.9463
$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N - 2}} = 0.3120$	Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico	r^2 ajustado debe ser mayor a 0.90	
$r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y}_j)^2} = 0.9523$	Coefficiente de Determinación Muestral	Coefficiente de Correlación Múltiple $r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_j - \bar{X}) * (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_j - \bar{X})^2 * \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9758$	



En general, la dispersión tiene un buen ajuste con el método de regresión lineal y las cinco pruebas cumplen relativamente bien, en especial la de correlación en cuanto al signo + (positivo) el cual denota que mientras una variable crece, la otra también, pero si fuese negativo sería a la inversa. Para mayores detalles de correlación, regresión lineal y pruebas de verificación, véase sección 3.4 Uso del método de regresión lineal con mínimos cuadrados para alinear la función de probabilidad de fallas (de no confiabilidad) o de mantenibilidad, para obtener parámetro.

19.5.1 Gráficas de control

Son un instrumento avanzado de mantenimiento aplicable en los cuatro niveles; por medio de él se establecen límites (superior e inferior), con el fin de valorar si el proceso está dentro de lo aceptable. La gráfica puede ser de valores continuos o discretos, y en cualquiera de ellos los límites se definen con la regla de 3 sigma:



La dispersión tiene un buen ajuste con el método de regresión lineal y las cinco pruebas cumplen relativamente bien, en especial la de correlación en cuanto al signo + (positivo), el cual denota que mientras una variable crece, la otra también, pero si fuese negativo sería a la inversa.

Las gráficas de control son un instrumento avanzado de mantenimiento aplicable en los cuatro niveles; por medio de él se establecen límites (superior e inferior), con el fin de valorar si el proceso está dentro de lo aceptable.

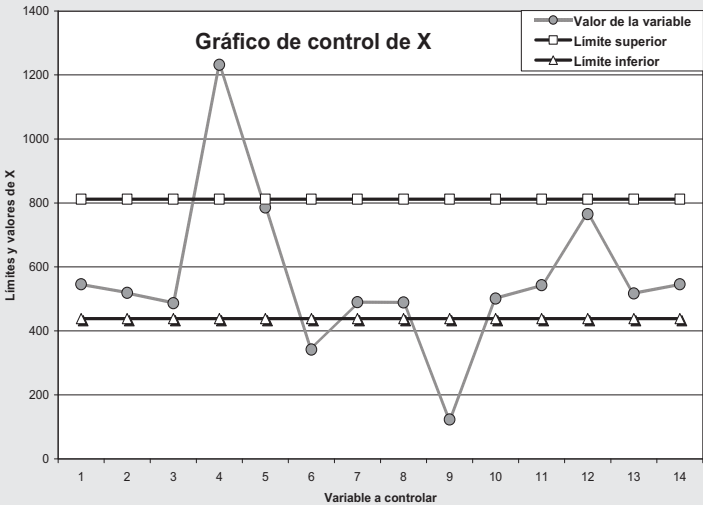
ECUACIÓN 19.2 - Límites para gráficos de control de procesos de mantenimiento

Límites = valor promedio (μ) $\pm$ 3 * desviación estándar (σ)

Gráfica de control de proceso.

GRÁFICO 19.14

Valor de la variable	Límite superior	Límite inferior	Control
546	812.2819851	438.7875789	ok
519	812.2819851	438.7875789	ok
487	812.2819851	438.7875789	ok
1232	812.2819851	438.7875789	Fuera de control
786	812.2819851	438.7875789	ok
342	812.2819851	438.7875789	Fuera de control
490	812.2819851	438.7875789	ok
489	812.2819851	438.7875789	ok
123	812.2819851	438.7875789	Fuera de control
501	812.2819851	438.7875789	ok
543	812.2819851	438.7875789	ok
765	812.2819851	438.7875789	ok
517	812.2819851	438.7875789	ok
546	812.2819851	438.7875789	ok



Tipos de gráficos de control de procesos de mantenimiento.

CUADRO 19.2

Valor característico	Nombre
Valor continuo	Gráfica $\bar{x}$ - R (Valor promedio y rango) Gráfica $\bar{x}$ (Variable de medida)
Valor discreto	Gráfica pn (Número de fallas o servicios defectuosos) Gráfica p (Fracción porcentual de fallas o servicios defectuosos) Gráfica c (Número de defectos) Gráfica u (Número de defectos por falla o por servicio de mantenimiento)

19.5.2 Tamaños muestrales de la población para medias. Números aleatorios

En ocasiones, cuando se desea tomar una muestra de un universo o población de máquinas (o elementos) lo suficientemente grande, se requiere aplicar algunas metodologías estadísticas. Sin pretender profundizar en el tema, se muestra a continuación un ejemplo que permite aplicar las fórmulas pertinentes, para estimar el tamaño muestral y obtener un adecuado valor de la media del fenómeno por estudiar, con validez estadística.

Esto sucede a menudo en inspecciones de mantenimientos planeados o predictivos, para estudiar el comportamiento de algún elemento o determinar una causa de falla, o decidir sobre un tiempo medio de falla o reparación, como también en múltiples aplicaciones en los cuatro niveles de mantenimiento.

ECUACIÓN 19.3 - Fórmulas para determinar el tamaño muestral en medias de proporciones o valores.

Para valores, n se expresa así:

Para población infinita

$$n = \frac{Z^2 * \sigma^2}{(\bar{X} - \mu)^2}$$

y para finita

$$n = \frac{\sigma^2}{\frac{(\bar{X} - \mu)^2}{Z^2} + \frac{\sigma^2}{N}}$$

Donde:

n es el tamaño muestral por determinar, N es el tamaño poblacional (o universal), σ es la desviación estándar de la muestra de 31 o más elementos, requerida para aplicar las fórmulas; se realiza en forma previa a la estimación final de n (es decir, se requiere para estimar n , y se recomienda que sea tomada al azar con los números aleatorios), con $(\bar{X} - \mu)$ como el error de precisión (se recomienda que no sea superior al 5%) deseado, donde $\bar{X}$ es la media de la muestra de 31 elementos o más elementos y μ es la media poblacional (del universo) esperada; Z es el nivel de confianza por obtener con la distribución normal con una probabilidad de 100% menos $(\bar{X} - \mu)$.

Para proporciones, n se determina con las fórmulas:

Para población infinita

$$n = \frac{Z^2 * (p * q)}{(p - \pi)^2}$$

y para finita

$$n = \frac{p * q}{\frac{(p - \pi)^2}{Z^2} + \frac{p * q}{N}}$$

Donde:

n es el tamaño muestral por determinar, N es el tamaño poblacional (o universal), p es la proporción positiva de elementos (que tienen la característica solicitada) de la muestra de 31 elementos o más (tomada antes de estimar el n final), π es la proporción positiva de elementos de la población que tienen la característica que se evalúa, $1 - \pi$ es la proporción negativa de la población que no tiene la característica que se revisa, con $(P - \pi)$ como el error de precisión deseado; Z es el nivel de confianza por obtener con la distribución normal con una probabilidad de 100% menos $(p - \pi)$.

Tanto para valores como para proporciones de media, se debe cumplir que n de población infinita sea igual o mayor al 5% de la población total N ; en su defecto se aplica el cálculo con población finita, es decir, primero se calcula n con infinita y luego con la finita.

Determinación del tamaño muestral para calcular medias

EJEMPLO 19.4

Se tienen 1.289 rodamientos en diferentes máquinas de una empresa, y se desea hacer muestreo para ver el estado en general de dichos elementos, y para decidir cuánta cantidad mínima de rodamientos hay que medir para concluir sobre el estado general de ellos, usando técnicas predictivas de vibraciones.

Resultados de la muestra			Proporcional
Ítem muestral	Elementos muestreados al azar (#)	Cumple (1) o no (0) el buen estado	
1	290	0	
2	841	1	
3	954	0	
4	245	1	
5	131	1	
6	1059	0	
7	522	0	
8	970	0	
9	345	0	
10	1034	0	
11	525	0	
12	212	1	
13	968	1	
14	1187	1	
15	20	1	
16	126	0	
17	29	1	
18	1207	1	
19	946	1	
20	422	1	
21	50	0	
22	1082	1	
23	772	0	
24	981	1	
25	357	1	
26	701	1	
27	949	0	
28	835	0	
29	971	1	
30	656	1	
31	1015	1	

Numérica	
Valor de una variable cualquiera medida en vibraciones	
273.27	
454.86	
615.88	
406.88	
606.60	
106.62	
208.79	
930.55	
989.82	
601.31	
983.47	
674.12	
432.00	
769.30	
946.17	
642.00	
379.89	
441.82	
360.60	
665.71	
31.75	
983.58	
902.98	
122.48	
692.96	
216.39	
724.85	
908.94	
229.83	
196.76	
838.71	

Cálculos para la determinación muestral de tamaño n de la prueba final		
Media	0.5806	559.3187
Desviación estándar σ de la muestra	0.502	297.279
Proporción positiva	58.06%	
Proporción negativa	41.94%	
Población o Universo	1289	1289
Error de precisión máximo deseado	5%	67.118
Rango de error permisible más o menos		559.32 más o menos 67.12
Probabilidad (distribución normal)	12%	94%
Nivel Z deseado	-1.1750	1.5548
n con población infinita	134	47
Validación de si n es igual o mayor al 5%	No cumple la n de infinita	Cumple la n de infinita
n con población finita	122	46
n final estimada	Proporciones	Valores
	Se toma finita con n igual a	Se toma infinita con n igual a
	122	47
En este caso particular se toma la n mayor de las dos características 122		

Entonces, para terminar la verificación general y concluir sobre el estado de los rodamientos, se deben analizar un total de 122 rodamientos (se pueden descontar los 31 que ya se tienen con medición de la muestra al azar). Es decir, se requiere evaluar 91 rodamientos adicionales a los de la muestra de 31 elementos realizada previamente. Para usar esta herramienta en la Web abra el *Programa - Determinación de tamaño muestral para medias*.

Para seleccionar los rodamientos por muestrear se pueden usar los números aleatorios, que tienen la particularidad de que la probabilidad de ser seleccionados en una muestra es la misma para todos una vez se completan N muestras. Además de que la forma como se van tomando y seleccionando no debe cumplir con función matemática alguna, ni distribución, ni relación formal establecida, de modo que esta última particularidad es su gran ventaja, pues la muestra nunca es sesgada.

Para ello se pueden usar los argumentos de función del Excel de Microsoft Office: ALEATORIO.ENTRE (mínimo valor deseado, máximo valor requerido), (que sirve para rangos de valores o cuando se desean números enteros), o ALEATORIO () que es útil para valores puntuales o números con decimales. También para determinar los números aleatorios se pueden usar las tablas de estos valores de libros de estadística o afines.

El tamaño mínimo muestral usado en el ejemplo anterior es 31 elementos con el fin de cumplir con el mínimo muestral del teorema del límite central (Kume, 1992 y Levin, 1996). También se asume en todo lo expuesto sobre tamaños muestrales que el comportamiento de las variables medidas se asimila a una distribución normal.

Ayuda en la



Determinación de
tamaño muestral
para medias

Tabla de distribución normal para probabilidades y Z.

CUADRO 19.3

Segunda cifra decimal del valor de Z										
Z	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.00	50.00%	50.40%	50.80%	51.20%	51.60%	51.99%	52.39%	52.79%	53.19%	53.59%
0.10	53.98%	54.38%	54.78%	55.17%	55.57%	55.96%	56.36%	56.75%	57.14%	57.53%
0.20	57.93%	58.32%	58.71%	59.10%	59.48%	59.87%	60.26%	60.64%	61.03%	61.41%
0.30	61.79%	62.17%	62.55%	62.93%	63.31%	63.68%	64.06%	64.43%	64.80%	65.17%
0.40	65.54%	65.91%	66.28%	66.64%	67.00%	67.36%	67.72%	68.08%	68.44%	68.79%
0.50	69.15%	69.50%	69.85%	70.19%	70.54%	70.88%	71.23%	71.57%	71.90%	72.24%
0.60	72.57%	72.91%	73.24%	73.57%	73.89%	74.22%	74.54%	74.86%	75.17%	75.49%
0.70	75.80%	76.11%	76.42%	76.73%	77.04%	77.34%	77.64%	77.94%	78.23%	78.52%
0.80	78.81%	79.10%	79.39%	79.67%	79.95%	80.23%	80.51%	80.78%	81.06%	81.33%
0.90	81.59%	81.86%	82.12%	82.38%	82.64%	82.89%	83.15%	83.40%	83.65%	83.89%
1.00	84.13%	84.38%	84.61%	84.85%	85.08%	85.31%	85.54%	85.77%	85.99%	86.21%
1.10	86.43%	86.65%	86.86%	87.08%	87.29%	87.49%	87.70%	87.90%	88.10%	88.30%
1.20	88.49%	88.69%	88.88%	89.07%	89.25%	89.44%	89.62%	89.80%	89.97%	90.15%
1.30	90.32%	90.49%	90.66%	90.82%	90.99%	91.15%	91.31%	91.47%	91.62%	91.77%
1.40	91.92%	92.07%	92.22%	92.36%	92.51%	92.65%	92.79%	92.92%	93.06%	93.19%
1.50	93.32%	93.45%	93.57%	93.70%	93.82%	93.94%	94.06%	94.18%	94.29%	94.41%
1.60	94.52%	94.63%	94.74%	94.84%	94.95%	95.05%	95.15%	95.25%	95.35%	95.45%
1.70	95.54%	95.64%	95.73%	95.82%	95.91%	95.99%	96.08%	96.16%	96.25%	96.33%
1.80	96.41%	96.49%	96.56%	96.64%	96.71%	96.78%	96.86%	96.93%	96.99%	97.06%
1.90	97.13%	97.19%	97.26%	97.32%	97.38%	97.44%	97.50%	97.56%	97.61%	97.67%
2.00	97.72%	97.78%	97.83%	97.88%	97.93%	97.98%	98.03%	98.08%	98.12%	98.17%
2.10	98.21%	98.26%	98.30%	98.34%	98.38%	98.42%	98.46%	98.50%	98.54%	98.57%
2.20	98.61%	98.64%	98.68%	98.71%	98.75%	98.78%	98.81%	98.84%	98.87%	98.90%
2.30	98.93%	98.96%	98.98%	99.01%	99.04%	99.06%	99.09%	99.11%	99.13%	99.16%
2.40	99.18%	99.20%	99.22%	99.25%	99.27%	99.29%	99.31%	99.32%	99.34%	99.36%
2.50	99.38%	99.40%	99.41%	99.43%	99.45%	99.46%	99.48%	99.49%	99.51%	99.52%
2.60	99.53%	99.55%	99.56%	99.57%	99.59%	99.60%	99.61%	99.62%	99.63%	99.64%
2.70	99.65%	99.66%	99.67%	99.68%	99.69%	99.70%	99.71%	99.72%	99.73%	99.74%
2.80	99.74%	99.75%	99.76%	99.77%	99.77%	99.78%	99.79%	99.79%	99.80%	99.81%
2.90	99.81%	99.82%	99.82%	99.83%	99.84%	99.84%	99.85%	99.85%	99.86%	99.86%
3.00	99.87%	99.87%	99.87%	99.88%	99.88%	99.89%	99.89%	99.89%	99.90%	99.90%
3.10	99.90%	99.91%	99.91%	99.91%	99.92%	99.92%	99.92%	99.92%	99.93%	99.93%
3.20	99.93%	99.93%	99.94%	99.94%	99.94%	99.94%	99.94%	99.95%	99.95%	99.95%
3.30	99.95%	99.95%	99.95%	99.96%	99.96%	99.96%	99.96%	99.96%	99.96%	99.97%
3.40	99.97%	99.97%	99.97%	99.97%	99.97%	99.97%	99.97%	99.97%	99.97%	99.98%
3.50	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%
3.60	99.98%	99.98%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%
3.70	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%
3.80	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%
Por ejemplo el Z para una probabilidad del 98.30% es 2.10										

Para calcular el Z y/o la probabilidad en la distribución Z se puede usar el programa en Excel en la Web adjunto que se encuentra en *Programa - Distribución Normal Z y probabilidades*, o usar la función del Excel descrita como DISTR.NORM.ESTAND.INV (introduzca probabilidad en porcentaje), para calcular el Z a partir de la probabilidad⁸, como también puede calcular la probabilidad a partir de un Z dado, con la función de Excel DISTR.NORM.ESTAND (introduzca aquí el Z).

Ayuda en la

Distribución
Normal Z y
probabilidades

19.5.3 Otras herramientas estadísticas

En las secciones anteriores no se pretende ahondar en las herramientas estadísticas, ya que existe suficiente bibliografía que trata ese tema con profundidad y rigurosidad. Sin embargo, es conveniente nombrarlas con el fin de resaltar su gran utilidad en las decisiones que se toman con los factores productivos, las acciones, las tácticas y las estrategias de mantenimiento.

Hay otras herramientas estadísticas consideradas como instrumentos avanzados, tales como: análisis de varianza y covarianza, tabulaciones (simples, cruzadas, de valores medios, etc.), pruebas de hipótesis, pruebas *t* de medias, pruebas *f*, correlaciones (de rangos, lineales, otros), validaciones con el *coeficiente alfa de Cronbach*, análisis de regresiones múltiples, análisis discriminantes múltiples, redes neuronales, análisis de clasificación múltiple, análisis de componentes principales (*eigen-value* y *eigen-vector*), análisis factorial de correspondencias, análisis de grupos (*cluster analysis*) AID (*Automatic Interaction Detection*).

Existen muchas (Santesmases, 2003) más que se pueden consultar en libros especializados, y aplicarlas perfectamente en todos los cuatro niveles de mantenimiento y producción, como también en aspectos asociados con la calidad de los servicios prestados o bienes tangibles producidos.



Hay otras herramientas estadísticas consideradas como instrumentos avanzados: análisis de varianza y covarianza, tabulaciones, pruebas de hipótesis, pruebas *t* de medias, pruebas *f*, correlaciones, validaciones con el *coeficiente alfa de Cronbach*, análisis de regresiones múltiples, entre otros.

⁸ Con el programa de la Web o con el Excel, cuando la probabilidad es inferior al 50% le debe sumar 50%.

CAPÍTULO 20

INSTRUMENTOS AVANZADOS ESPECÍFICOS DE MANTENIMIENTO, NIVEL INSTRUMENTAL

A pesar de que el uso de las herramientas avanzadas de que se dispone en mantenimiento puede extenderse a otros campos del conocimiento, es más usual que su aplicación sea específica y concreta en el campo de la ingeniería de fábricas, trátase de mantenimiento, confiabilidad, calidad, producción, ingeniería o de cualquiera de las áreas afines.

20.1 ANÁLISIS DE FALLAS - FMECA, RCFA Y RPN¹

Los métodos para ahorrar recursos en mantenimiento pueden ser varios, pero sobresalen dos: uno que consiste en ampliar los períodos entre mantenimientos planeados (esto se puede lograr mediante el control de los parámetros CMD, Beta y asociados, con el fin de que no se incrementen las fallas conocidas ni aparezcan nuevas en estos períodos de expansión entre tareas proactivas). Y el segundo método, y quizá el más exitoso para lograr grandes ahorros en mantenimiento, es el análisis de fallas que sirve para erradicar o controlar fallas reales o potenciales en los elementos o equipos.

La metodología de análisis de fallas se constituye por sí misma en uno de los instrumentos avanzados de mantenimiento más útiles y usados en los niveles 2, 3 y 4. Tanto el *TPM* como el *RCM* la aplican, aunque es independiente de ellos, y se aplica indiferentemente del nivel en que se encuentre la empresa, y no pertenece a ninguna de las tácticas conocidas.

El *FMECA* presenta dos opciones: cuando se desconoce la causa de la falla, y cuando se sabe de todas (o la mayoría) las fallas reales y/o potenciales con sus correspondientes causas.



Los métodos para ahorrar recursos en mantenimiento pueden ser varios, pero sobresalen dos: uno que consiste en ampliar los períodos entre mantenimientos planeados, y otro es el análisis de fallas que sirve para erradicar o controlar fallas reales o potenciales en los elementos o equipos.

La metodología de análisis de fallas se constituye por sí misma en uno de los instrumentos avanzados de mantenimiento más útiles y usados en los niveles 2, 3 y 4. Tanto el *TPM* como el *RCM* lo aplican, aunque es independiente de ellos.

¹ *FMECA*, análisis de los modos, los efectos, las causas y las criticidades de las fallas. *RCFA*, análisis de la causa raíz de las fallas. *RPN*, número de riesgo prioritario.



Las fallas se clasifican internacionalmente en críticas,

degradantes, incipientes y desconocidas. Según la Casa OREDA, en análisis de fallas se establecen dos tipos: crónicas y esporádicas.

Las fallas crónicas son eventos muy frecuentes, pero cuando se eliminan o se controlan se logra restaurar la funcionalidad a su punto máximo y se eleva el nivel esperado del desempeño. Son repetitivas, no dramáticas y casi siempre son fáciles de corregir.

En el primero de los casos se utiliza la metodología de análisis de fallas y en la segunda se aplica el procedimiento *FMECA*. Es posible confundir este último con la metodología que usa el *RCM* para llegar a establecer el mapa (o matriz) o valoración del riesgo.

Existe una diferencia muy especial entre ambos sistemas, pues el *RCM* en su valoración de riesgos sólo utiliza los parámetros de *severidad* y *ocurrencia*, mientras que el procedimiento *FMECA* usa tres parámetros: *severidad*, *ocurrencia* y *probabilidad de detección*. Sin embargo, la metodología es muy similar, como también lo son las tablas para su calificación en cada uno de los tres componentes descritos (que juntos conforman la base de evaluación del *RPN*) (Stamatis, 1995).

El costo de un minuto de falla es por lo menos diez veces superior al costo del mismo tiempo en operación normal, dependiendo de la tasa de rentabilidad bruta de la empresa. Pero definitivamente un minuto de falla es varias veces más costoso que un minuto de producción corriente.

Las fallas se clasifican internacionalmente en críticas, degradantes, incipientes y desconocidas. Según la Casa OREDA, en análisis de fallas se establecen dos tipos: crónicas y esporádicas; las primeras son las verdaderamente importantes, ya que los tiempos de no funcionalidad que implican son mucho más grandes en el tiempo que los períodos no productivos de las esporádicas, aun siendo estas últimas más impactantes, dramáticas y preocupantes ante los directivos, pues son más visibles (OREDA, 2002).

Las fallas esporádicas son una desviación del estándar (por lo general, hacia el límite inferior), en una operación normal (por lo general, en el lado bajo). No siempre dejan secuelas en la producción y/o mantenimiento, pues una vez desaparece la causa de la falla, todo regresa a la normalidad. Casi siempre al eliminar una falla esporádica se regresa a una situación de funcionalidad normal (que usualmente no es mejor de la que se tiene antes de que ocurra). Estos son eventos, por lo general, poco frecuentes y casi nunca una falla esporádica se relaciona con otra del mismo tipo.

Las fallas crónicas son eventos muy frecuentes, pero cuando se eliminan o se controlan se logra restaurar la funcionalidad a su punto máximo y se eleva el nivel esperado del desempeño. Son repetitivas, no dramáticas y casi siempre son fáciles de corregir. Sin embargo, son difíciles de controlar o erradicar (sólo se puede lograr al aplicar análisis de fallas con el debido componente de ingeniería), se aceptan como parte normal de los costos de producción.

Las fallas recurrentes afectan de forma inmediata la producción y/o el mantenimiento. Ejemplo de ellas son las que se presentan en los rodamientos, los sellos, las correas, los engranajes, las interrupciones de los sistemas de control o potencia, los problemas comunes y corrientes de la unidad de producción, etc.

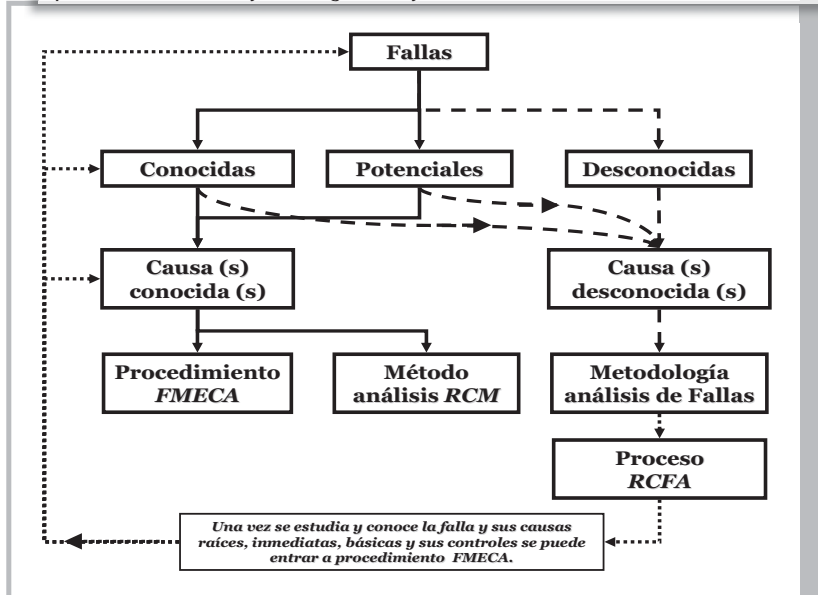
Cada evento de falla crónica tiene un impacto relativamente bajo, pero cuando se totaliza en el transcurso de un período de tiempo y se combina con otras fallas crónicas, afecta de forma muy notoria la economía de la empresa. Al encontrar la causa raíz de las fallas crónicas y controlarla se logra aumentar la productividad, elevar los índices de CMD, mejorar la rentabilidad y el desempeño, se maximiza la productividad y, por ende, la competitividad, situación que no sucede en las esporádicas.



Cada evento de falla crónica tiene un impacto relativamente bajo, pero cuando se totaliza en el transcurso de un período de tiempo y se combina con otras fallas crónicas, afecta de forma muy notoria la economía de la empresa.

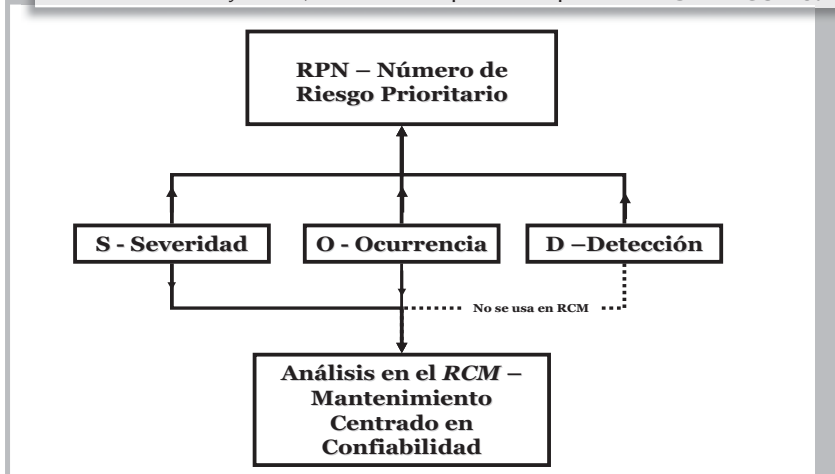
Aplicabilidad de FMECA y RCM según falla y causa.

GRÁFICO 20.1



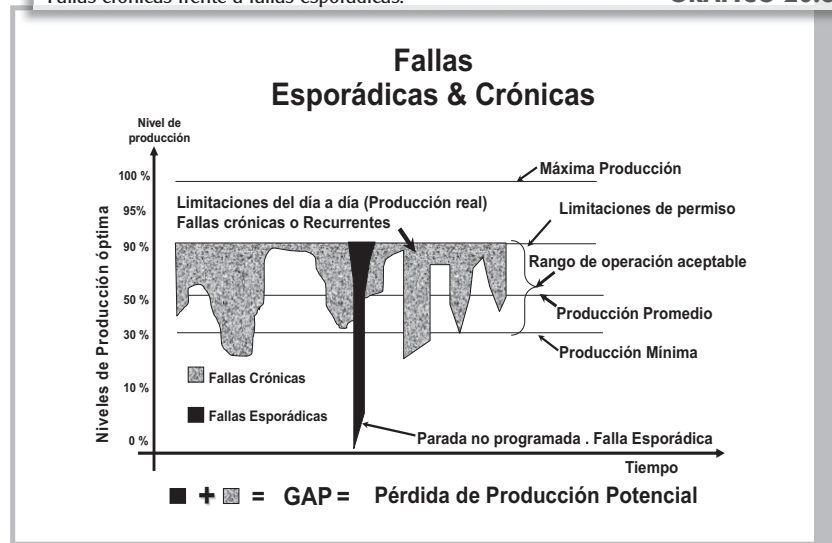
Diferencia entre RCM y FMECA, en relación con parámetros que usan.

GRÁFICO 20.2



Fallas crónicas frente a fallas esporádicas.

GRÁFICO 20.3



El área bajo la curva máxima de producción marcada, correspondiente a las fallas crónicas o recurrentes, es mucho mayor que la línea negra debida a paradas no programadas esporádicas. Por ello, entonces, primero se debe intentar eliminar o controlar las fallas crónicas, pues estas inciden mucho más en la rentabilidad de la empresa.



El propósito de la técnica de análisis de los efectos, los modos y las causas de fallas es conocer completamente el equipo, mediante la identificación de los sistemas y de los componentes que lo conforman.

Por medio del análisis de fallas se puede detectar en forma preventiva, predictiva o anticipada cualquier anomalía que pudiera ocurrir en la funcionalidad del equipo.

20.2 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE FALLAS

El propósito de la técnica de análisis de los efectos, los modos y las causas de fallas es conocer completamente el equipo, mediante la identificación de los sistemas y de los componentes que lo conforman, el diseño, los procesos, los elementos y los materiales de fabricación, los ensambles y los subensambles parciales. Así como todos los demás aspectos pertinentes que permitan aplicar el análisis integral de fallas (Harris, 1994).

Por medio del análisis de fallas se puede detectar en forma preventiva, predictiva o anticipada cualquier anomalía que pudiera ocurrir en la funcionalidad del equipo. Para ello se sigue una serie de pasos que se describen más adelante.

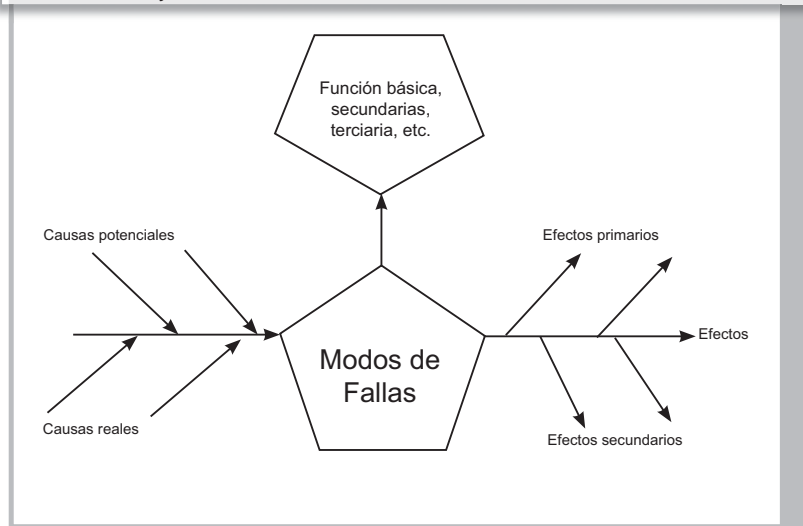
Éste es un proceso sistémico que permite identificar las fallas potenciales o reales de diseño, de funcionamiento y de proceso, antes de que éstas ocurran, con la intención de eliminarlas o controlarlas para erradicar o minimizar los riesgos asociados con ellas. Su aplicación

permite documentar las tareas proactivas y correctivas que controlan o eliminan las fallas.

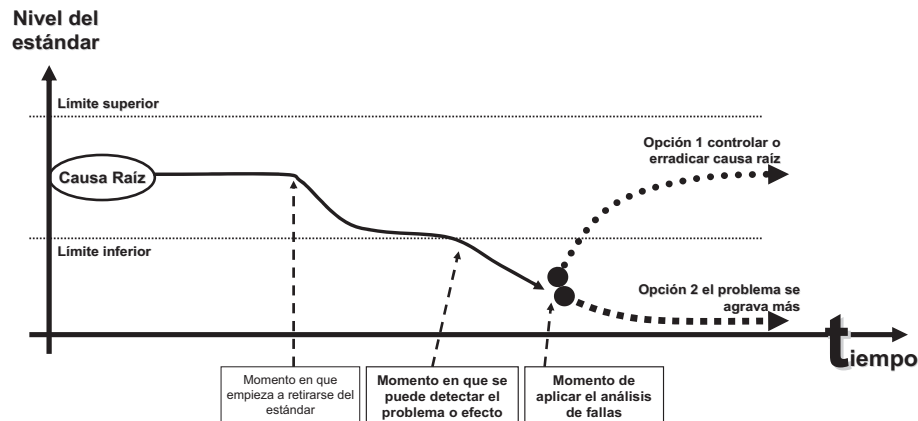
El instrumento avanzado de análisis de fallas (enfocado a erradicar o controlar la causa raíz del problema) se debe abordar bajo la óptica del modelo de causalidad, el cual implanta algunos pasos. Entre éstos sobresalen el establecimiento del método apropiado, la construcción de los procesos de solución, configuración del grupo cazafallas (GCF), con sus metodologías de pensamiento, el planteamiento y el desarrollo del análisis en sí y, por último, la implementación de los controles.

Modos de fallas y sus lazos.

GRÁFICO 20.4



Condiciones estándar en fallas.





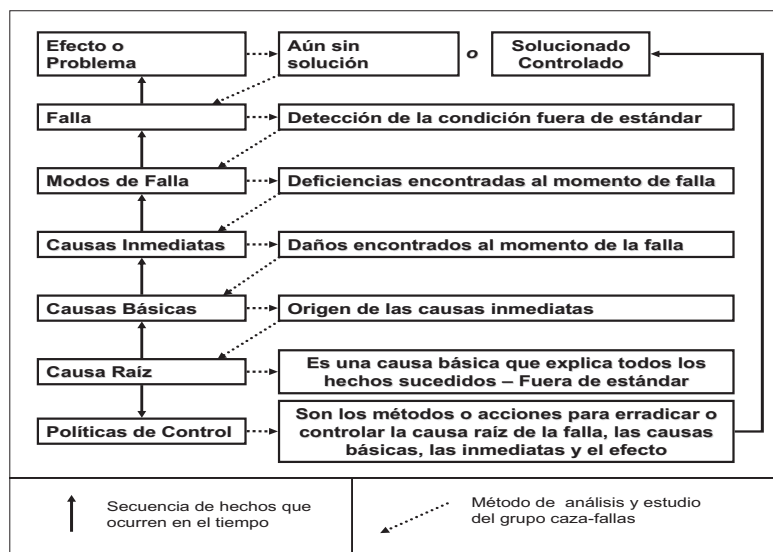
La metodología de análisis de fallas parte de la base de la presencia o detección repentina de una situación fuera del estándar, que manifiesta de alguna forma la falta de funcionalidad total o parcial de una máquina o elemento.

La metodología de análisis de fallas parte de la base de la presencia o detección repentina de una situación fuera del estándar, que manifiesta de alguna forma la falta de funcionalidad total o parcial de una máquina o elemento. Como problema o efecto causante se describe una falla que aún no se soluciona o erradica. Como modo de falla se pueden enunciar las deficiencias que se observan o se perciben en el sistema o la máquina en el momento de reportar la falla.

Las causas inmediatas se refieren a los daños y hechos que se encuentran en el equipo en el momento de percibir o reportar la falla. Las causas básicas son el origen de las causas inmediatas. Una o varias causas básicas que generan el problema por medio del cual se detecta la falla, y que a la vez ocasiona la pérdida de funcionalidad del sistema o elemento, recibe el nombre de causa raíz. La criticidad o el grado del problema se asocia a la clase de falla. El elemento que entra en estado de falla se denomina ítem susceptible de mantenimiento.

Proceso de análisis de fallas.

GRÁFICO 20.5



Las consecuencias de una falla no sólo se reducen a falta de funcionalidad, pues en ocasiones pueden producir daños al medio ambiente, pérdidas de vidas humanas o animales, siniestros parciales o totales a personas, daños a bienes materiales o a servicios, entre otros.

El análisis de fallas es un proceso sistémico que perdura en el tiempo, y es de acción permanente. Por eso el grupo cazafallas se reúne en forma constante y periódica para mantener un registro activo en tiempo real de todos los hechos, acciones, análisis de fallas, evidencias, controles, registros, datos, etc.

El grupo cazafallas está conformado por varias personas de todos los niveles jerárquicos (verticales) de la organización y con representación de la mayoría de áreas de la empresa, como producción, ingeniería, mantenimiento, calidad, compras, almacenes, contabilidad, mercadeo, administración, finanzas, sistemas de información, etc.

De esta manera, en los tiempos de operación de los equipos siempre hay suficientes personas del grupo cazafallas que puedan iniciar los procesos de registro, recolección y cuidado de evidencias, los análisis de fallas, la implementación y la vigilancia de los controles establecidos, como también las demás acciones propias del método.

Esta clase de organización a su vez implica que en todo momento, en las áreas físicas de producción o mantenimiento, existan instrumentos que permitan recoger las evidencias como cámaras digitales, computadores en línea, grabadoras, herramientas, etc., dado que estos elementos son vitales a la hora de aplicar la metodología, pues se constituyen en la base técnica de estudio.

Es importante resaltar que la metodología de fallas funciona siempre y cuando dentro de los procesos de análisis se aplique ingeniería u otras áreas del conocimiento, con el fin de determinar las causas inmediatas, las básicas y la causa raíz. Es imposible encontrar la fuente de los problemas con el conocimiento normal y el sentido común que se maneja en forma habitual en las empresas.

Un síntoma normal en las empresas que no practican la metodología estriba en que en la mayoría de los problemas que se evalúan. En el momento de tratar de encontrar las causas, escasamente se llega hasta las inmediatas y en algunos eventos hasta algunas básicas que no son exactamente la causa raíz. Por lo general, en estas empresas no se dispone de tiempo para la metodología, lo cual sirve como excusa y barrera para no utilizar el método.



Las consecuencias de una falla no sólo se reducen a falta de funcionalidad, pues en ocasiones pueden producir daños al medio ambiente, pérdidas de vidas humanas o animales, siniestros parciales o totales a personas, daños a bienes materiales o a servicios, entre otros.

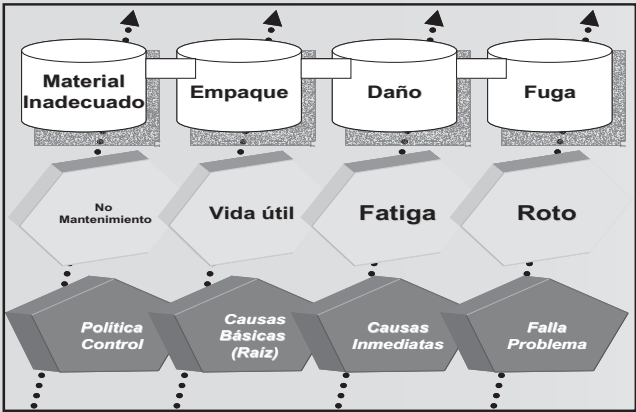
La metodología de fallas funciona siempre y cuando dentro de los procesos de análisis se aplique ingeniería u otras áreas del conocimiento, con el fin de determinar las causas inmediatas, las básicas y la causa raíz.

EJEMPLO 20.1

Ejemplo simple de análisis de fallas

Un compresor de aire sale de servicio en forma automática porque su sistema de control detecta una temperatura muy alta, al parecer, debido a una fuga de aceite muy seria, a través de la unión de una de sus mangueras del lubricante en el acople. El compresor no tiene equipo de respaldo en *standby*. Es la cuarta vez que ocurre en un período de tiempo muy corto.

Situación estándar	: Temperatura en su rango normal y el equipo funciona bien
Período de evaluación	: Últimos siete días
Clase de equipo	: Compresor de aire comprimido, versión de tornillo con aire exento de aceite, para uso grado alimenticio
Modo de falla	: OHE (Casa OREDA)-Sobrecalentamiento con alto registro de temperatura que activó el sistema de protección, apagándolo
Categoría de equipo	: Marca Eagle Serie U87A90 (hipotético)
Severidad	: I Incipient - Incipiente
Causa inmediata	: Fuga de aceite lubricante
Parte que falla	: Unión (acople) de la manguera superior de aceite
Causa básica	: Material inadecuado del empaque, con cambios de especificaciones de material y propiedades físico-mecánicas desde hace seis meses, por departamento de suministros, sin autorización de ingeniería
Método de detección	: Automático - Producción reporta máquina llenadora de jugos, detenida por falta de presión de aire
Tarea de mantenimiento a realizar	: Análisis de falla con mantenimiento correctivo modificativo
Actividad realizada	: Modificación con rediseño del material de empaque de la unión o acople en la manguera
Área del conocimiento e ingeniería	: Se usa análisis de fallas con ingeniería de materiales y procesos
Controles	: Sólo comprar nuevos empaques con ficha y especificación técnica, únicamente a dos proveedores autorizados, especificaciones técnicas similares a las originales, certificado de garantía técnica de los empaques que se compran, sólo ingeniería está autorizado a cambiar especificaciones técnicas del empaque, cada dos años enviar empaque muestra a casa matriz del compresor para verificar calidad



Para el éxito del proceso es vital la capacitación previa, intensiva y con suficiente tiempo de duración de los miembros principales, suplentes e invitados del grupo cazafallas. Estas personas deben manejar todo el enfoque sistémico de mantenimiento, los tipos de acciones (correctivos, preventivos, etc.).

También debe haber entrenamiento suficiente en diferentes tácticas (como *TPM*, *RCM*, proactiva, reactiva, entre otros) y en muchos de los instrumentos avanzados de mantenimiento. En general, se debe practicar mucho como grupo activo de análisis de fallas en forma permanente, con entrenamiento periódico tanto en áreas de ingeniería de diseño como de calidad, mantenimiento, operación y otras relevantes al tipo de problemas de esa empresa en particular.

Los procesos de análisis de fallas se originan en las personas y se desarrollan a partir de las ideas que aporta en particular cada uno de los miembros del GCF. Estos procesos de pensamiento son vitales en el análisis y se pueden guiar con los roles que las diferentes personas juegan en las reuniones (Stamatis, 1995).



Para el éxito del proceso es vital la capacitación previa, intensiva y con suficiente tiempo de duración de los miembros principales, suplentes e invitados del grupo cazafallas. Estas personas deben manejar todo el enfoque sistémico de mantenimiento, los tipos de acciones (correctivos, preventivos, etc.).

Método de análisis de fallas, formato de registro.

GRÁFICO 20.6

A – Identificación del problema o mejora a realizar (definir límites técnicos y físicos del problema) : _____

B – Beneficios económicos, técnicos, productivos, etc. de analizar el problema o mejora, mediante el método de análisis de fallas para encontrar la Causa Raíz - _____

C – Desarrollo del análisis:

C – 1) Estándar - Desviación - Condiciones encontradas fuera del estándar - Falla - _____

C – 2) EVIDENCIAS - Especificación Técnica (datos, planos, fotografías, evidencias reales y verbales, cálculos, verificaciones, estudios, normas, procedimientos de calidad, otros, etc.) con que se cuenta: - _____

C – 3) Procedimiento:

C – 3 – A) Plantear diferentes posibles Causas Inmediatas: _____

1 - _____

2 - _____

3 - _____

Esbozar Causas Básicas potenciales:

1 - A - _____

1 - B - _____

1 - C - _____

1 - ... - _____

1 - n - _____

2 - A - _____

2 - B - _____

2 - C - _____

2 - ... - _____

2 - n - _____

3 - A - _____

3 - B - _____

3 - C - _____

3 - ... - _____

3 - n - _____

Diagrama de flujo:

```

graph TD
    A([Problema o efecto  
Fallas]) --> B([Causas  
Inmediatas])
    B --> C([Causas  
Causa Raíz  
Básicas])
    C --> D([Políticas y  
acciones  
de control])
  
```

y así sucesivamente hasta completar varias básicas de cada una de las inmediatas.

C – 3 – B) Pruebas de Validez de cada una las Causas básicas planteadas en el paso anterior:

C – 3 – C) Selección de la Causa Básica planteada y probada técnicamente como Raíz, que a su vez explica todos los hechos ocurridos:

C – 3 – D) Hechos y cálculos de ingeniería que comprueban técnicamente la Causa Raíz como causante de toas las situaciones encontradas durante los hechos y el análisis –

Bitácora de Cálculos – Técnicas utilizadas

Síntesis del análisis técnico de la causa raíz: _____

C – 5) Actuaciones a realizar (Política de Control) que garantice erradicación o control de la Falla:

C – 5 – A) Sobre la Falla: _____

C – 5 – B) Sobre la Causa Inmediata Única: _____

C – 5 – C) Sobre la Causa Básica Única: _____

C – 5 – D) Implementación de Controles:

Tareas y responsables, recursos, controles y nuevas mediciones para verificar validez del control aplicado.

Falla a resolver y a erradicar: _____

Fechas de registro: _____

Participantes en el Grupo cazafallas del día ____ mes ____ año ____, en el caso número: ____ sobre la falla: ____ en la máquina: ____ en la empresa de: ____

Persona: _____	Sombrero: _____	Función: _____	Dpto.: _____
Persona: _____	Sombrero: _____	Función: _____	Dpto.: _____
Persona: _____	Sombrero: _____	Función: _____	Dpto.: _____
Persona: _____	Sombrero: _____	Función: _____	Dpto.: _____
Persona: _____	Sombrero: _____	Función: _____	Dpto.: _____
Persona: _____	Sombrero: _____	Función: _____	Dpto.: _____
Persona: _____	Sombrero: _____	Función: _____	Dpto.: _____
Persona: _____	Sombrero: _____	Función: _____	Dpto.: _____
Persona: _____	Sombrero: _____	Función: _____	Dpto.: _____
Persona: _____	Sombrero: _____	Función: _____	Dpto.: _____
Persona: _____	Sombrero: _____	Función: _____	Dpto.: _____

Facilitador externo: _____ Sombrero: _____

Facilitador interno – Coordinador: _____ Sombrero: _____

Invitados: _____	Sombrero: _____
_____	Sombrero: _____
_____	Sombrero: _____

Identificación de los roles en los grupos cazafallas, mediante sombreros.

GRÁFICO 20.7

Sombrero	Descripción	Rol
Blanco 	Neutral	Hechos, cifras, información objetiva. No hace interpretación ni da opiniones
Rojo 	Emotivo	Emociones y sensaciones sentimientos. Así me siento con respecto a este asunto.
Negro 	Crítico Negativo	Lógico negativo Señala riesgo y peligros Identifica errores
Amarillo 	Crítico Positivo	Lógico positivo constructivo optimista Abarca espectro positivo desde el lógico hasta visiones y esperanza
Verde 	Creativo	Creatividad, ideas nuevas. Hace falta ir mas allá de lo conocido, lo obvio y lo satisfactorio. El lenguaje del movimiento reemplaza al del juicio
Azul 	Facilitador	Control de los demás sombreros y pasos para pensar Define el tema. Síntesis, visión global y conclusiones Asegura el respeto por las reglas de juego

El hecho de usar un sombrero permite centrar y enfocar mejor el pensamiento, de modo que si se cambia de sombrero se puede reorientar la idea, si el pensamiento se precisa la argumentación del miembro cazafallas resulta más productiva (De Bono, 2003). El propósito es que los miembros asuman al menos uno de los roles en las reuniones, el cual puede ser cambiante durante la sesión y entre reunión y reunión.

El grupo cazafallas se debe constituir por un número suficiente de personas (al menos nueve, entre principales, suplentes, permanentes e invitados), que pueden trabajar en varios grupos en forma simultánea que analizan fallas diferentes.

El equipo para el análisis de fallas para RCFA y FMECA puede estar constituido por operadores, técnicos, supervisores, ingenieros, analistas, directivos, proveedores, clientes, especialistas, inspectores, etc. Con representación permanente de mantenimiento, producción, ingeniería, compras, administración, finanzas, etc. Y debe contar con un líder facilitador permanente que coordine todas las actividades.

Cada grupo de análisis varía en función de la falla que se analice y cuenta con los miembros más cercanos al problema y los más pertinentes en razón de cada caso en particular. En cada sesión se debe elaborar un informe como del Gráfico 20.6 - Método de análisis de fallas, formato de registro.



El grupo cazafallas se debe constituir por un número suficiente de personas (al menos nueve, entre principales, suplentes, permanentes e invitados), que pueden trabajar en varios grupos en forma simultánea que analizan fallas diferentes.



Cada grupo de análisis varía en función de la falla que se analice y

cuenta con los miembros más cercanos al problema y los más pertinentes, en razón de cada caso en particular. En cada sesión se debe elaborar un informe.

En el método de El Vaticano cada miembro participa en forma equitativa con voz y voto, indiferente del cargo que desempeña en la empresa, pues las jerarquías de los miembros no pueden influenciar el análisis ni el método de trabajo.

El análisis de causa raíz de las fallas es un método riguroso para la solución de problemas en cualquier tipo de falla, que se basa en un proceso lógico y en la utilización de árboles de causas de fallas.

El análisis de una falla puede durar varias sesiones hasta llegar a la causa raíz y a la implementación efectiva. El modelo de trabajo se puede basar en el *método de El Vaticano*, en el cual todos los participantes aportan ideas y en él no existen las contradicciones personales, sino un debate de las ideas, alrededor de las cuales se debe centrar el análisis.

En el método de El Vaticano cada miembro participa en forma equitativa con voz y voto, indiferentemente del cargo que desempeña en la empresa, pues las jerarquías de los miembros no pueden influenciar el análisis ni el método de trabajo, aun en el evento en que se trate de subalternos o jefes, miembros del grupo. El método proyectivo de El Vaticano es uno de los métodos para el análisis de fallas y su manejo grupal (Mora, 2007c). En la Web, ver Programa - Casos reales de Análisis de Fallas.

Ayuda en la



Casos reales de Análisis de Fallas

20.2.1 RCFA

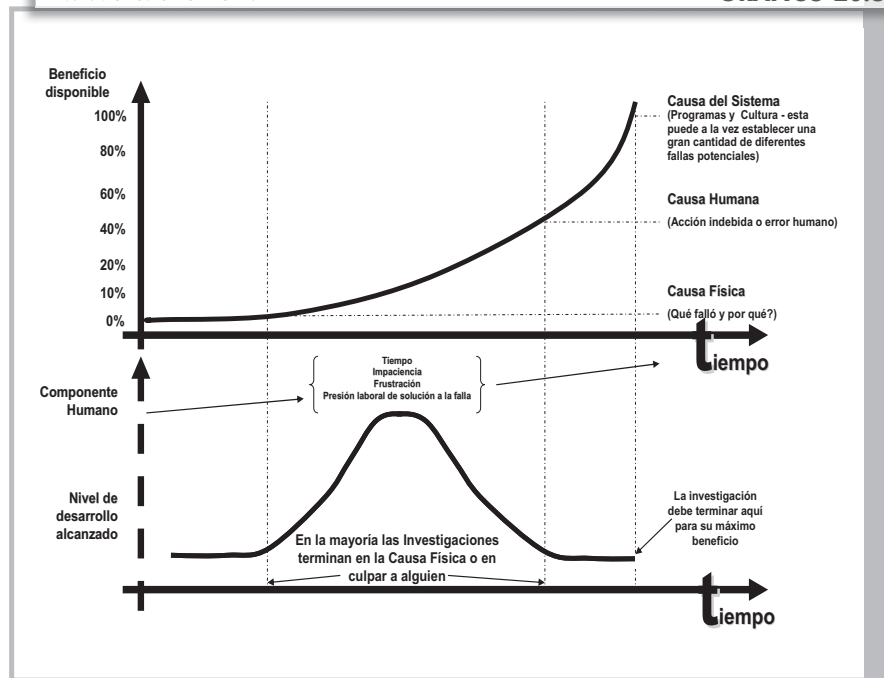
El análisis de causa raíz de las fallas es un método riguroso para la solución de problemas en cualquier tipo de falla, que se basa en un proceso lógico y en la utilización de árboles de causas de fallas. Consiste en una representación visual de los eventos de una falla, en el cual, por razonamiento deductivo y mediante la verificación de los hechos que ocurren, se puede llegar de una manera fácil y fluida a las causas originales de las fallas.

Con el RCFA se puede llegar a deducir hasta tres niveles de causa raíz. Permite aprender de las fallas mediante la eliminación de las causas, en vez de corregir los síntomas. El método RCFA es una ayuda complementaria al método de análisis de falla que perfecciona las etapas requeridas en él, para encontrar las diferentes causas inmediatas, básicas y raíz.

Las ventajas que presenta el método son: permite establecer un patrón de fallas en elementos o máquinas, aumenta la motivación del recurso humano del grupo cazafallas, ya que en la mayoría de los casos es muy exitoso en la búsqueda de causas raíces, mejora las condiciones ambientales de trabajo, como también las de seguridad industrial y reduce sustancialmente los tiempos de no funcionalidad y de no disponibilidad en los equipos.

Actuaciones en el RCFA.

GRÁFICO 20.8



El nivel de desarrollo en la búsqueda de la causa raíz se incrementa paulatinamente hasta alcanzar un valor máximo en el grupo cazafallas. Aproximadamente, en la mitad total del período destinado a desarrollar el RCFA, este nivel empieza a generar saturación en los miembros del equipo, incrementa gradualmente sus niveles de impaciencia y frustración, a la vez que empiezan a sentir la presión en la búsqueda de resultados concretos. De allí se deduce la conveniencia de manejar tiempos prudentes en las diferentes etapas de proceso.

El beneficio se incrementa a medida que transcurre el tiempo. Sin convertirse en norma, se puede plantear que el tiempo que toma el RCFA para casos particulares de falla puede ser de entre uno y cuatro meses en promedio, dependiendo de las habilidades de las personas del grupo cazafallas, de la cantidad de reuniones y del conocimiento técnico que se maneje. Estos tiempos pueden diferir de una empresa a otra.

Los sistemas empresariales por sí solos no cambian, por lo que se les debe intervenir desde adentro o desde afuera con factores exógenos, mediante la incorporación de grupos cazafallas, análisis de causa raíz, RCFA y demás condiciones necesarias para encontrar la raíz de los problemas. Es decir, es casi imposible encontrar una causa raíz con las condiciones habituales y normales de una empresa.

Habitualmente, las organizaciones se conforman con encontrar las causas inmediatas y esporádicamente algunas básicas. Pero sin un



El tiempo que toma el RCFA para casos particulares de falla puede ser de entre uno y cuatro meses en promedio, dependiendo de las habilidades de las personas del grupo cazafallas, de la cantidad de reuniones y del conocimiento técnico que se maneje.

proceso de análisis de fallas y de RCFA, y sin utilizar los fundamentos de la ingeniería o de otras ciencias es prácticamente improbable alcanzar la raíz de las fallas.

Aunque ya está descrito anteriormente, se recalca que los métodos de análisis de fallas y RCFA se deben usar más en las fallas crónicas o recurrentes.

Los pasos que se desarrollan en la metodología RCFA, para encontrar la causa raíz de las fallas, son:

- Responder a una condición fuera de estándar y conservar la mayor cantidad de evidencias válidas posibles.
- Organizar el grupo cazafallas que opere bajo un sistema de análisis de fallas y de RCFA.
 - Analizar la falla y verificar las causas raíces.
 - Comunicar los resultados.
 - Implementación, monitoreo y nuevo análisis RCFA después de un tiempo prudencial.

El paso 1 considera que las condiciones humanas fuera de estándares, como accidentes, lesiones, etc., son prioritarias en las acciones de los grupos cazafallas bajo la metodología RCFA; también la restauración de equipos a sus condiciones estándar deben considerarse como relevantes.

Se deben conservar las evidencias, tales como fotografías, grabaciones de video, elementos dañados, mediciones al momento del evento, conversaciones con las personas involucradas en la falla, circunstancias propias y exógenas, informes del suceso, etc.

Las evidencias son vitales en los procesos exitosos de análisis de fallas y de RCFA; se deben facilitar los medios para que cualquier miembro del grupo cazafallas, que esté cercano al sitio del suceso en el momento en que ocurra, pueda reunir las pruebas circunstanciales del hecho. Por eso es necesario que todos los turnos de operación de las empresas estén cubiertos por diferentes miembros del GCF.

Se deben mantener cámaras, grabadoras, formatos, cintas de aislamiento de sitio, etc., en puntos estratégicos de la empresa que permitan la fácil recolección de evidencias en el momento en que sucedan las fallas. En las fallas esporádicas se debe acordonar el sitio con cinta de aislamiento, mientras que en las recurrentes se deben recoger la mayor cantidad de pruebas.

En el paso 2, se debe mantener un GCF permanente, con reuniones periódicas, con suficientes miembros principales y suplentes, que cubra la mayor cantidad de operaciones de la empresa. Sus miembros deben tener un completo entrenamiento en análisis de fallas, en RCFA y en los procesos técnicos que se desarrollan en la empresa, con un adecuado conocimiento de todos los equipos relevantes de la organización.



Se deben conservar las evidencias, tales como fotografías, grabaciones de video, elementos dañados, mediciones al momento de la falla, conversaciones con las personas involucradas, circunstancias propias y exógenas, informes del suceso.

Se deben facilitar los medios para que cualquier miembro del grupo cazafallas, que esté cercano al sitio del suceso en el momento en que ocurra, pueda reunir las pruebas circunstanciales del hecho. Por eso es necesario que todos los turnos de operación de las empresas estén cubiertos por diferentes miembros del GCF.

Conviene que al menos una persona del GCF ignore los eventos de la falla, y actuar como crítico constructivo con respecto a una de las teorías y posibilidades que surjan de la tormenta de ideas o con el método de El Vaticano. También se debe promover el pensamiento no formal que facilite la discusión de ideas no convencionales.

El GCF debe tener un líder permanente con suficiente carisma y entrenamiento, y debe tener un representante de todos los niveles jerárquicos verticales y organizacionales horizontales de la empresa. Debe contar con una adecuada sala de reuniones con todos los recursos necesarios que propendan a realizar las diferentes tertulias, y facilite la aplicación de El método de El Vaticano en las diferentes prácticas de análisis de fallas y RCFA.

El paso 3 implica seguir la metodología planteada para hallar las causas inmediatas, las básicas, la raíz y definir las políticas de control necesarias, con el fin de asignar responsabilidades y recursos a las personas competentes que garanticen el control o la erradicación de la cusa raíz. Se lanzan hipótesis y éstas se van comprobando una a una. Y se deben validar todos los hechos hasta allí descritos para que se convierta de inmediata a básica y de básica a raíz.

El paso 4 implica que toda la información quede plasmada en medios físicos y electrónicos, en documentos, en informes, en el ordenador, en comunicaciones verbales y escritas, etc. Todas las causas básicas e inmediatas, como la raíz, deben ser suficientemente divulgadas a todo el personal pertinente para queden en la historia de las personas de la empresa y no se vuelvan a presentar.

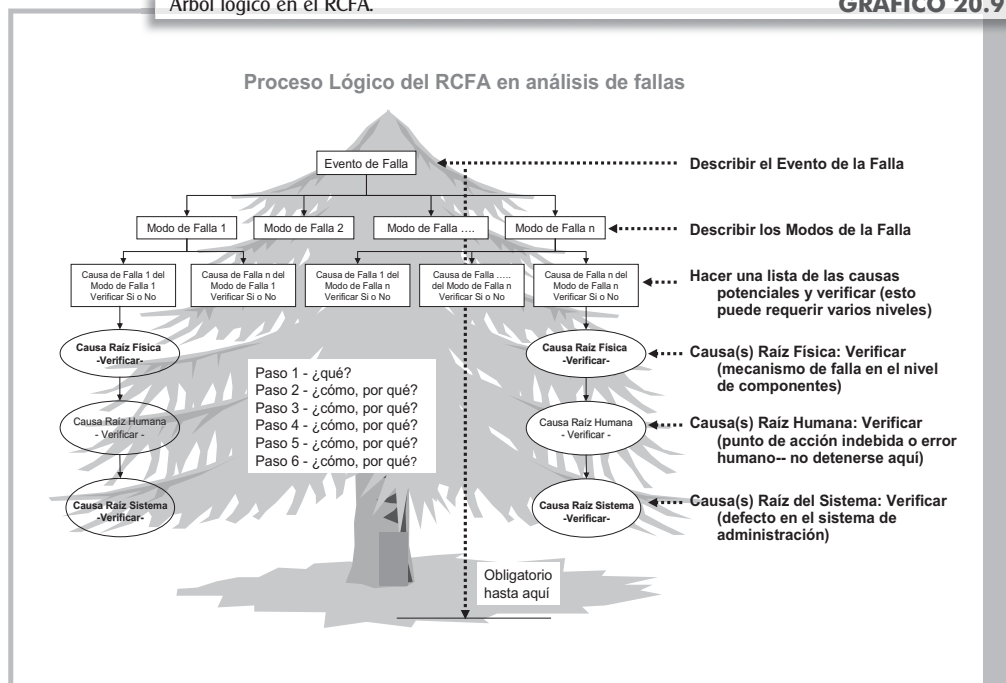
El último hecho, paso 5, consiste en vigilar permanentemente la implementación de las políticas, las acciones y los controles conducentes a la erradicación o el control de la falla, su monitoreo y su medición de efectividad de las soluciones practicadas. Al cabo del tiempo se debe revisar el RCFA del mismo caso y comprobar que todo esté dentro de los estándares de funcionamiento (físicos, humanos y del sistema) y con las políticas de control en marcha (Wilson y otros, 1993).



Conveniente que al menos una persona del GCF ignore los eventos de la falla y actuar como crítico constructivo, con respecto a una de las teorías y posibilidades que surjan de la tormenta de ideas, o con el método del Vaticano.

Árbol lógico en el RCFA.

GRÁFICO 20.9



La implementación de la metodología RCFA sigue las siguientes etapas:

Etapas de implementación del RCFA.

GRÁFICO 20.10

- A. Describir el evento de la falla en forma clara y concisa
- B. Reunir las evidencias circunstanciales y propias del evento
- C. Realizar la tormenta de ideas sobre las causas de la falla o aplicar el método de El Varicano
 - a. Detectar las causas posibles de fallas
 - b. Verificar las causas de las fallas
- D. Encontrar la causa raíz y verificar la que explique todos los hechos que suceden
- E. Determinar la posible causa raíz humana y verificarla
- F. Determinar la factible causa raíz latente y verificarla
- G. Comunicar los resultados y las recomendaciones de control diseñadas
- H. Monitorear, vigilar, hacer el costeo final y establecer un seguimiento hasta la erradicación o el control total de la falla.

La aplicación del proceso RCFA puede ser observada en la presentación de Power Point, en la Web bajo la denominación *Programa – Aplicación de RCFA*, donde se entregan cada una de las etapas del procedimiento RCFA con sus detalles y explicaciones.

Ayuda en la



Aplicación de
RCFA

20.3 PROCEDIMIENTO FMECA-RPN

La función principal del FMECA es organizar las tareas correctivas, modificativas o proactivas de mantenimiento que se deben realizar, después de haber ejecutado exhaustivamente el análisis de fallas y el RCFA. El método procedural FMECA parte del concepto de que ya se conocen todas las fallas reales y potenciales, se sabe de los modos de fallas en que se pueden presentar y se tiene un perfecto dominio de todas las funciones principales y auxiliares de los elementos o máquinas por evaluar con el procedimiento.

Por su parte, lo que hace el RPN es jerarquizar cada una de las tareas por realizar en los diferentes elementos o equipos, con el fin de priorizar los esfuerzos en los equipos que más lo requieran, de acuerdo con su grado de criticidad.

El procedimiento FMECA se puede aplicar en forma independiente²; sin embargo, el RPN es parte fundamental del FMECA.

Las etapas de desarrollo del procedimiento FMECA son:

- Describir las funciones primaria y secundarias de los equipos.
- Establecer todas las fallas funcionales reales y potenciales conocidas.
- Los modos de fallas.
- Evaluar las consecuencias y los efectos de cada modo de falla, con su falla y su función.
- Medir el RPN mediante la evaluación de la severidad, la probabilidad de ocurrencia y la posibilidad de detección.
- Establecer las acciones correctivas o planeadas.
- Realizar las tareas
- Medir nuevamente el RPN y replantear las acciones.

Inicialmente se debe definir el volumen de control del elemento o máquina por evaluar. La recomendación es comenzar con equipos conocidos de mediana criticidad e importancia, que sean bien conocidos por el GCF, para que todos los miembros del equipo participen y sirva de plan piloto en el aprendizaje y el dominio del procedimiento

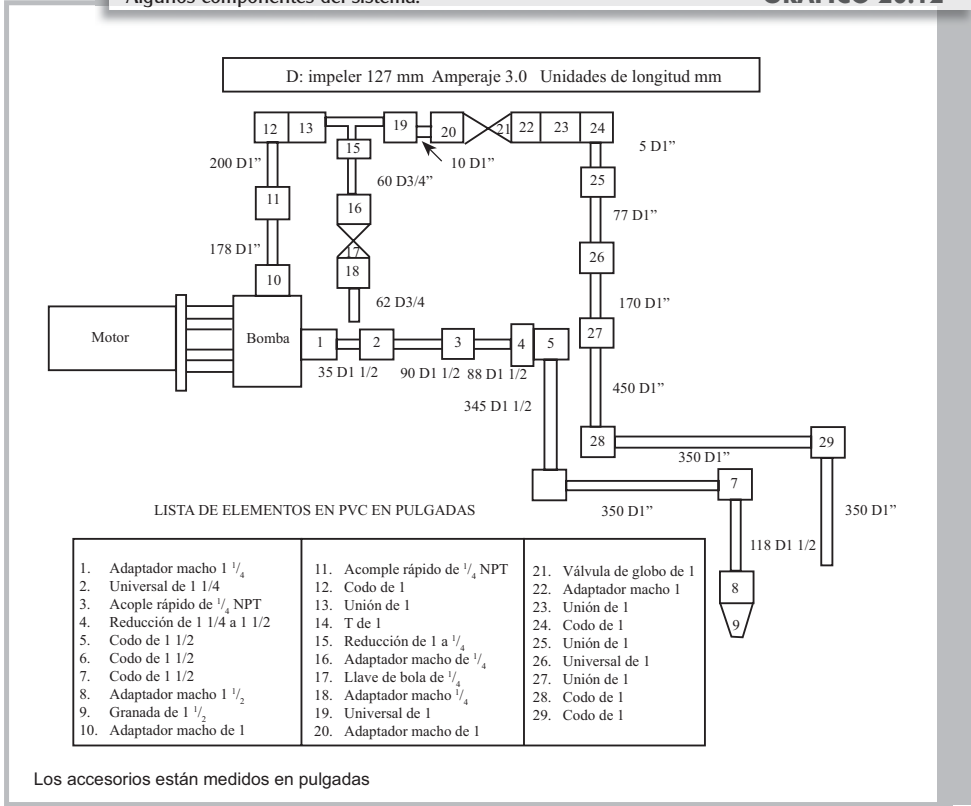


La función principal del FMECA es organizar las tareas correctivas, modificativas o proactivas de mantenimiento que se deben realizar, después de haber ejecutado exhaustivamente el análisis de fallas y el RCFA.

² Una vez se conozcan todas las fallas reales o potenciales, para lo cual es posible utilizar en forma previa el análisis de falla y/o el RCFA, aunque no es indispensable, pues se puede tener un dominio completo de las fallas sin tener que haber aplicado los dos métodos descritos.

Algunos componentes del sistema.

GRÁFICO 20.12



A continuación se describen las unidades que componen el sistema principal:

- Bomba
- Motor
- Tubería y accesorios de agua
- Tablero de control y potencia eléctrica
- Componentes de apoyo para el control de agua o electricidad

Cada unidad a su vez está compuesta por elementos. En el *Gráfico 2.13* se muestran varios de los elementos que componen algunas de las unidades del sistema principal.

Algunos componentes de unidades.

GRÁFICO 20.13Unidad de
BombaUnidad
Tubería y accesorios aguaUnidad de Tablero
de control y
potencia eléctrica*Fuente:* El autor.

En cada elemento, unidad y sistema se denotan las características técnicas, por medio de las cuales se pueden identificar las fallas funcionales, los modos de fallas y las funciones.

Características técnicas de algunos elementos, unidades o sistema.

CUADRO 20.1

Unidad	Componente	Descripción	
Sistema bombeo	Bomba	Caudal - Q	Hasta 20 galones por minuto
		Presión -H	Hasta 74 psi
		Temperatura -T	Entre -30 y 100 °C
		Rotación -RPM	Hasta 3200
		Presión salida-Ps	Hasta 220 psi
	Motor	Tensión nominal	230 voltios
		Corriente	3,1 amperios
		Potencia	0,9 kilovatios
		Coseno <i>fi</i>	0,86
		Frecuencia	60 Hercios
		Rotación - RPM	3420

Luego se describen las condiciones ambientales (condiciones físicas y climáticas exógenas e internas de los fluidos que tienen lugar en el proceso), y operacionales (variables propias y externas de la producción y el medio empresarial), en el caso particular del sistema de bombeo:

- *Condiciones ambientales:* Las bombas y los motores operan a la intemperie, al aire libre, con temperaturas exteriores entre 14 y 28 grados centígrados, con una humedad relativa entre 65 y 85%. El agua es de recirculación permanente, lo cual hace que se endurezca en forma constante. Cada seis meses se le hace tratamiento químico al agua, la cual es utilizada en otros procesos de laboratorios académicos.
- *Condiciones operacionales:* El sistema funciona en forma continua todo el tiempo, en un sistema cerrado de succión, compresión, descarga. Operan cinco bombas en paralelo en forma permanente y una adicional permanece en *standby*.

Los factores clave en los cuales opera el sistema o equipo se denominan de contexto operacional; entre los más relevantes, sobresalen:

- Procesos de producción por lotes o continuos
- Redundancia de equipos o elementos
- Estándares de calidad
- Estándares de servicio al cliente
- Estándares medioambientales
- Riesgos para la seguridad
- Turnos de trabajo
- Productos en proceso
- Tiempos de reparación
- Repuestos

- Demanda del mercado
- Suministro de materias primas
- Documentación del contexto operacional
- Otros relevantes a la operación específica.

El siguiente paso consiste en describir las funciones del equipo, tanto la principal (primaria) como las secundarias:



La función primaria es la razón de ser del equipo. Es la que explica por qué es adquirido y la misión que debe cumplir dentro del proceso productivo, y normalmente es la salida principal del sistema.

- La *función primaria* es la razón de ser del equipo. Es la que explica por qué es adquirido y la misión que debe cumplir³ dentro del proceso productivo, y normalmente es la salida principal del sistema (producto del sistema). En la mayoría de las veces, la función primaria es el verbo del nombre del equipo, por ejemplo, la función primaria de un compresor es comprimir, de una licuadora licuar, de un transformador transformar energía, de un calentador calentar, etc. La función primaria está vinculada a conceptos como velocidad, producción, calidad, servicio al cliente, características técnicas, entre otros.
- Las *funciones auxiliares de apoyo logístico o secundarias* son actividades que le ayudan al sistema a cumplir su función primaria. Eventualmente el sistema o equipo puede funcionar sin ellas (aunque no es lo ideal). En otras palabras, son aquellas otras funciones que el activo está en capacidad de cumplir de forma adicional a la función primaria.

Construcción literal de una función.

CUADRO 20.2

Las funciones se deben describir en forma clara, única y concreta, de tal forma que se entiendan siempre igual			
Constan de varios elementos			
Verbo	Objeto o acción	Estándar	Condicionantes
Reducir	la velocidad de giro	a 90 RPM	con un moto-reductor de 5 HP, con un voltaje entre 110 y 125 voltios, con ruido inferior a 90 decibeles.
La función debe ser alcanzable, medible y sostenible en el tiempo			
Los condicionantes responden a preguntas como: ¿Cuándo? ¿Dónde? ¿Por qué? ¿Para qué? ¿Cómo? ¿Qué? Etc.			

3 Y a la vez es la función principal que el usuario o propietario del sistema espera que cumpla.

Los estándares establecidos en la descripción de la función son los que determinan si el equipo o la máquina entra o no en estado de falla; pueden ser de varios tipos:

- Múltiples, valores simultáneos como de un sistema eléctrico: voltios, amperaje, potencia, etc.
- Cuantitativos, como un valor de rango de presiones en *psi*⁴.
- Cualitativos, es el caso de color azul o turbio, como también que el agua no presente oleaje.
- Absoluto, el valor de una variable adquiere una temperatura absoluta de 1.232° Rankine.
- Variables, en función de los valores de atributos.

La denominación de las funciones se realiza con números enteros.



Las funciones secundarias son actividades que le ayudan al sistema a cumplir su función primaria. En otras palabras, son aquellas funciones que el activo está en capacidad de cumplir de forma adicional a la función primaria.

Funciones del sistema de bombeo.

CUADRO 20.3

Función	Código	Descripción
Primaria	0	0. Recircular agua en un sistema de bombeo cerrado sin dejar elevar la corriente por encima de 3,5 amperios y manteniendo un caudal mínimo de 80 galones por minuto
Secundaria	1	1. Encender y apagar todo el sistema en el momento de accionar un interruptor
Secundaria	2	2. Permitir la conservación del fluido dentro del sistema
Secundaria	3	3. Parar todo el funcionamiento al oprimir un interruptor de emergencia
Secundaria	4	4. Mantener una potencia mínima de 0,5 kW
Secundaria	5	5. Restringir total o parcialmente el flujo de agua dentro del sistema
Secundaria	6	6. Filtrar el agua
Secundaria	7	7. Evitar el reflujo
Secundaria	8	8. Mantener la temperatura de operación por debajo de 70 °C
Secundaria	9	9. Interrumpir el sistema cuando la temperatura alcanza 80 °C
Secundaria	10	10. Mantener un nivel bajo de vibraciones
Secundaria	11	11. Mantener un nivel bajo de ruido

Fuente: El autor.

4 *PSI*, libras por pulgada cuadrada. Medida de presión.



Se deben conocer todas las causas inmediatas, básicas y raíces de las fallas funcionales, para lo cual es necesario aplicar previamente los métodos de análisis de fallas y RCFA, para determinar las causas de falla que hacen que el sistema deje de operar.

Los modos de falla son los que causan el estado de falla en el equipo, o los que inciden indirectamente para que este evento ocurra. La definición de los modos de falla consiste en establecer todas las fallas reales o potenciales, o similares en equipos idénticos o afines.

Los modos de fallas pueden ser físicos, de desgaste, humanos... Se debe trabajar estrictamente con causas raíces, y no con síntomas o efectos, ni con causas básicas ni inmediatas ya que ellas no erradican el problema.

En seguida, se definen las fallas funcionales reales y potenciales para cada una de las funciones descritas (primaria y secundarias), y se denotan con letras mayúsculas. La aplicación del procedimiento FMECA implica conocer de manera profunda todas las circunstancias y eventos que llevan a la falla de función principal o secundaria del sistema, tanto para casos reales como potenciales.

Se deben conocer todas las causas inmediatas, básicas y raíces de las diferentes fallas funcionales. Para eso es necesario aplicar los métodos de análisis de fallas y RCFA en forma previa, para determinar las causas de falla que hace que el sistema deje de operar y/o funcionar.

Las fallas tienen varias clasificaciones, dependiendo del enfoque que se evalúe:

- Fallas internacionales OREDA: críticas, degradantes, incipientes y desconocidas (OREDA, 2002).
- Fallas esporádicas y crónicas o recurrentes, desde la óptica de fallas.

Posteriormente se describen los modos de falla de cada una de las fallas funcionales, para cada una de las funciones descritas. A partir de aquí el proceso toma la forma de un árbol lógico de fallas, pues en la medida en que se avanza de nivel crece en la base.

Se recomiendan entre 3 y 15 fallas funcionales por cada función enunciada. En el evento en que se requieran más fallas funcionales se sugiere especificar más la función y abrirla en dos. Para los modos de falla igual que lo anterior se sugieren entre 3 y 15, como también en el caso de necesitar más modos de falla es preferible abrir la falla funcional en dos.

Los modos de falla son los que causan el estado de falla en el equipo, o los que inciden indirectamente para que este evento ocurra. La definición de los modos de falla consiste en establecer todas las fallas reales o potenciales, o similares en equipos idénticos o afines. Se deben listar todas las factibles, con el fin de que al llevar a cabo las operaciones de mantenimiento se eliminen o se controlen, mediante su reparación o mantenimiento.

Los modos de fallas pueden ser físicos, de desgaste, humanos, etc. Se debe trabajar estrictamente con causas raíces y no con síntomas o efectos, ni con causas básicas ni inmediatas ya que ellas no erradican el problema. Se presta más relevancia a la falla en sí y a su modo de falla que a los eventos o circunstancias anexas. La nomenclatura de los modos de fallas se hace con números enteros.

Los modos de falla se pueden clasificar en:

- *Falla completa*: Se pierde totalmente la funcionalidad del sistema o equipo.

- *Falla parcial:* El sistema opera adecuadamente, pero con posibles restricciones.
- *Falla intermitente:* La falla se presenta en forma discontinua en el tiempo, pero lo ideal es que falle permanentemente para evaluar sus posibles causas raíces.
- *Falla con el tiempo:* Sucede en elementos con el uso, el abuso, el desgaste, etc.
- *Sobre desempeño de la función:* El equipo se utiliza inadecuadamente por encima (o por debajo) de sus capacidades.

Las consecuencias de las fallas se miden mediante la evaluación de su impacto sobre la organización, sus componentes, las máquinas o sus componentes. La función principal de mantenimiento es atenuar o eliminar estas consecuencias mediante la utilización de las herramientas básicas o avanzadas, con las operaciones, las tácticas y la estrategia integral de mantenimiento. Es probable que las consecuencias sean más importantes que las características técnicas de las fallas en sí mismas. Consiste en la descripción de lo que ocurre en cada modo de falla.

Las consecuencias a que se da lugar en la ocurrencia de fallas mediante su modo, al actuar bajo una determinada falla funcional en una función específica, pueden ser clasificadas según su efecto, así:

- Pérdida de vidas humanas.
- Pérdidas materiales mayores.
- Daños parciales o totales de equipos.
- Pérdidas de producción o servicios.
- Daños parciales o permanentes en el medio ambiente.

Según su categoría, se pueden organizar de la siguiente manera:

- Consecuencias de fallas ocultas. Normalmente no inciden directamente pero pueden llegar a generar paradas serias y catastróficas. Generalmente están en los sistemas de protección sin seguridad inherente.
- Consecuencias ambientales y seguridad física y humana. Normas, leyes, contaminación, violación, seguridad, muertes, accidentes fatales, etc.
- Consecuencias operacionales. Pueden afectar calidad, seguridad, cantidad, atención al cliente, reproceso, desperdicios, etc., además de la reparación.
- Consecuencias no operacionales. Sólo implican el costo de la reparación.

Una vez se establecen todas las funciones, sus fallas funcionales y sus correspondientes modos de fallas, se procede a calificar la severidad, la posibilidad de ocurrencia y la probabilidad de detección temprana de las fallas, con el fin de constituir el valor del *RPN*, con el cual se jerarquizan



Las consecuencias de las fallas se miden mediante la evaluación de su impacto sobre la organización, sus componentes, las máquinas o sus componentes.

Una vez se establecen todas las funciones, sus fallas funcionales y sus correspondientes modos de fallas, se procede a calificar la severidad, la posibilidad de ocurrencia y la probabilidad de detección temprana de las fallas.

las tareas correctivas, modificativas y proactivas que se deben realizar para erradicar o controlar las fallas.

► ECUACIÓN 20.1 - Cálculo del RPN

$$RPN = \text{Severidad} \times \text{Posibilidad de ocurrencia} \times \text{Probabilidad de Detección} = S \times O \times D$$

El cálculo de la severidad se realiza en dos partes, una de las cuales asigna unos valores probabilísticos a cada criterio, y en la segunda parte que se obtiene por análisis y discusión del GCF, al utilizar las tablas internacionales de valores de los distintos criterios de severidad.

La calificación de la severidad se realiza mediante el concurso de cinco criterios:

FO: Fallas ocultas

SF: Impacto seguridad física

MA: Impacto medio ambiente

IC: Impacto en imagen corporativa

OR: Costos de reparaciones o mantenimientos

OC: Efectos en clientes.

CUADRO 20.4

Fallas funcionales y modos de fallas en sistema de bombeo.

Función	Código	Descripción de la Función	Forma Falta Funcional	Código de Modo de Falta Funcional	Descripción de la Falta Funcional	Forma del Modo de Falta	Código del Modo de Falta	Descripción del Modo de Falta
Primaria	0	0. Recircular agua en un sistema de bombeo encima de 3.5 arpejos y manteniendo un caudal mínimo de 80 galones por minuto.	A	0 - A	0A. El agua no circula	1	0 - A - 1	0A1. La tubería está obstruida
						2	0 - A - 2	0A2. El motor está defectuoso
						3	0 - A - 3	0A3. El interruptor de emergencia está defectuoso
						4	0 - A - 4	0A4. La bomba está obstruida
						5	0 - A - 5	0A5. La granada está tapada
						6	0 - A - 6	0A6. La válvula principal está cerrada
						7	0 - A - 7	0A7. El nivel del tanque está por debajo de la succión
						8	0 - A - 8	0A8. La bomba está trabajando en vacío
						9	0 - A - 9	0A9. El motor se clapsa porque la bomba trabaja en vacío
						10	0 - A - 10	0A10. La bomba ha perdido eficiencia
Secundaria	1	1. Encender y apagar todo el sistema en el momento de accionar un interruptor.	B	0 - B - 1	0B. Se eleva la corriente por encima de 1.5 amperios	1	0 - B - 1	0B1. La tubería está obstruida
						2	0 - C - 2	0C1. La tubería está obstruida
					0C. El caudal entregado por el sistema es menor de 80 gpm.	3	0 - C - 3	0C2. La válvula principal está muy cerrada
						4	0 - C - 4	0C3. El motor está pagado
						5	0 - C - 5	0C4. La bomba está pagada
						6	0 - C - 6	0C5. La granada está obstruida
						7	0 - D - 7	0D1. La tubería está obstruida
						8	0 - D - 8	0D2. El motor está defectuoso
						9	0 - D - 9	0D3. Poro de emergencia defectuoso
						10	0 - D - 10	0D4. Switch de emergencia defectuoso
Secundaria	2	2. Permitir la conservación del fluido dentro del sistema	A	1 - A	1A. El sistema no se enciende al accionar el interruptor	1	1 - A - 1	1A1. Switch de emergencia defectuoso
						2	1 - A - 2	1A2. Switch de emergencia defectuoso
					1B. El sistema no se apaga al accionar el interruptor	3	1 - B - 3	1B1. Switch de emergencia defectuoso
						4	1 - B - 4	1B2. Switch de emergencia defectuoso
						5	2 - A - 5	2A1. Filtros en el tanque
						6	2 - A - 6	2A2. Filtros en tubería o accesorios
						7	2 - A - 7	2A3. Filtros en tubería o accesorios
						8	2 - A - 8	2A4. Filtros en tubería o accesorios
						9	2 - B - 9	2B1. Filtros en el tanque
						10	2 - B - 10	2B2. Filtros en tubería o accesorios
Secundaria	3	3. Pagar todo el funcionamiento al oprimir un interruptor de emergencia.	A	3 - A	3A. El sistema sigue funcionando al oprimir el interruptor de emergencia.	1	3 - A - 1	3A1. Interruptor de paro de emergencia defectuoso
						2	4 - A - 4	4A1. El motor está defectuoso
					4A. La potencia está por debajo de 0.5KW	3	4 - A - 3	4A2. El motor está defectuoso
						4	5 - A - 4	5A1. La válvula principal no funciona correctamente
						5	5 - B - 5	5B1. La válvula principal está obstruida
						6	6 - A - 6	6A1. La granada no opera adecuadamente.
						7	7 - A - 7	7A1. El filtro (strainer) está sucio y no filtra bien.
						8	8 - A - 8	8A1. La granada está defectuosa
						9	9 - A - 9	9A1. La válvula principal está defectuosa
						10	10 - A - 10	10A1. El tornillo no opera en su punto fijado
Secundaria	4	4. Mantener una potencia mínima de 0.5KW.	A	4 - A	4A. El sistema se interrumpe cuando alcanza 80° centígrados de temperatura	1	8 - A - 1	8A1. El tornillo no opera en su punto fijado
						2	8 - A - 2	8A2. El tornillo no opera en su punto fijado
					5A. El agua fluye libremente sin ninguna restricción	3	8 - B - 3	8B1. El tornillo no opera en su punto fijado
						4	8 - B - 4	8B2. Se está sobreargando el motor
						5	9 - A - 5	9A1. Poro de emergencia defectuoso
						6	9 - A - 6	9A2. Poro de emergencia defectuoso
						7	9 - A - 7	9A3. El motor está defectuoso
						8	9 - A - 8	9A4. El motor está defectuoso
						9	10 - A - 9	10A1. La bomba está pagada
						10	10 - A - 10	10A2. Motor presenta desalineación con la bomba
Secundaria	5	5. Restringir total o parcial el flujo de agua dentro del sistema	B	8 - B	8B. El sistema se interrumpe a menos de 80°C de temperaturas	1	10 - A - 1	10A1. Rodamientos defectuosos
						2	10 - A - 2	10A2. Turbulencias excesivas dentro del sistema
						3	10 - A - 3	10A3. Turbulencias excesivas dentro del sistema
						4	10 - A - 4	10A4. Turbulencias excesivas dentro del sistema
						5	10 - A - 5	10A5. Aire en el sistema
						6	10 - A - 6	10A6. El eje del acople está flojeto y torcido
						7	10 - A - 7	10A7. El eje del acople está flojeto y torcido
						8	11 - A - 8	11A1. Aire en el sistema
						9	11 - A - 9	11A2. Turbulencias excesivas dentro del sistema
						10	11 - A - 10	11A3. Bomba pagada
Secundaria	6	6. Filtrar el agua	A	11 - A	11A. El equipo tiene más de 95 decibels.	1	11 - A - 1	11A1. Sucios y cuerpos extraños dentro del sistema
						2	11 - A - 2	11A2. Sucios y cuerpos extraños dentro del sistema
						3	11 - A - 3	11A3. Sucios y cuerpos extraños dentro del sistema
						4	11 - A - 4	11A4. Bomba pagada
						5	11 - A - 5	11A5. Sucios y cuerpos extraños dentro del sistema
						6	11 - A - 6	11A6. Bomba pagada
						7	11 - A - 7	11A7. Bomba pagada
						8	11 - A - 8	11A8. Bomba pagada
						9	11 - A - 9	11A9. Bomba pagada
						10	11 - A - 10	11A10. Bomba pagada

ECUACIÓN 20.2 - Estimación de la severidad

$$\text{Severidad} = FO \times K_{FO} + SF \times K_{SF} + MA \times K_{MA} + IC \times K_{IC} + OR \times K_{OR} = S_1$$

donde los coeficientes de los factores son constantes (su suma es de 1.0 o del 100%), así:

$$K_{FO} = 0,05 \text{ o } 5\% ; K_{SF} = 0,02 \text{ o } 20\% ; K_{MA} = 0,10 \text{ o } 10\% ; \\ K_{IC} = 0,30 \text{ o } 30\% ; K_{OR} = 0,30 \text{ o } 30\% ; K_{OC} = 0,05 \text{ o } 5\%$$

Los valores de los criterios de severidad se discuten entre los miembros, de acuerdo con el caso específico y con las circunstancias, mediante la obtención de los valores a partir de las siguientes opciones:

Tablas de los valores de criterios de severidad, de ocurrencia y detección.

CUADRO 20.5

FO - Fallos ocultos	
No existen fallas ocultas que puedan generar fallas múltiples posteriores - 0	0
Existe una baja posibilidad de que la falla NO sea detectada y ocasione fallas múltiples posteriores - 1	1
En condiciones normales la falla siempre será oculta y generará fallas múltiples posteriores - 2	2
Existe una baja posibilidad de que la falla SI sea detectada y ocasione fallas múltiples posteriores - 3	3
La falla siempre es oculta y ocasionará fallas múltiples graves en el sistema -4	4

SF - Seguridad Física	
No afecta a personas ni equipos -0	0
Afecta a una persona y es posible que genere incapacidad temporal - 1	1
Afecta de dos a cinco personas y puede generar incapacidad temporal - 2	2
Afecta a más de cinco personas y puede generar incapacidad temporal o permanente - 3	3
Genera incapacidad permanente o la muerte, a una o más personas - 4	4

MA - Medio Ambiente	
No afecta el medio ambiente - 0	0
Afecta el M A pero se puede controlar. No daña el Ecosistema - 1	1
Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el Ecosistema. Es reversible en menos de seis meses con un valor inferior a 5.000 dólares - 2	2
Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el Ecosistema. Es reversible en menos de tres años con un valor inferior a 50.000 dólares - 3	3
Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el Ecosistema. Es reversible en más de tres años o es irreversible. Su impacto social y ecológico es superior a los 50.000 dólares - 4	4

IC - Imagen Corporativa	
No es relevante - 0	0
Afecta la credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos - 1	1
Afecta la credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos e inversión inferior a 1.000 dólares - 2	2
Afecta la credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos e inversión entre 1.000 y 10.000 dólares - 3	3
Afecta la credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos e inversión mayor de 10.000 dólares. Puede ser irreversible - 4	4

(Continuación)

CUADRO 20.5

FO - Fallos ocultos	
No existen fallas ocultas que puedan generar fallas múltiples posteriores - 0	0
Existe una baja posibilidad de que la falla NO sea detectada y ocasione fallas múltiples posteriores - 1	1
En condiciones normales la falla siempre será oculta y generará fallas múltiples posteriores - 2	2
Existe una baja posibilidad de que la falla SI sea detectada y ocasione fallas múltiples posteriores - 3	3
La falla siempre es oculta y ocasionará fallas múltiples graves en el sistema -4	4

SF - Seguridad Física	
No afecta a personas ni equipos -0	0
Afecta a una persona y es posible que genere incapacidad temporal - 1	1
Afecta de dos a cinco personas y puede generar incapacidad temporal - 2	2
Afecta a más de cinco personas y puede generar incapacidad temporal o permanente - 3	3
Genera incapacidad permanente o la muerte, a una o más personas - 4	4

MA - Medio Ambiente	
No afecta el medio ambiente - 0	0
Afecta el M A pero se puede controlar. No daña el Ecosistema - 1	1
Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el Ecosistema. Es reversible en menos de seis meses con un valor inferior a 5.000 dólares - 2	2
Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el Ecosistema. Es reversible en menos de tres años con un valor inferior a 50.000 dólares - 3	3
Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el Ecosistema. Es reversible en más de tres años o es irreversible. Su impacto social y ecológico es superior a los 50.000 dólares - 4	4

IC - Imagen Corporativa	
No es relevante - 0	0
Afecta la credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos - 1	1
Afecta la credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos e inversión inferior a 1.000 dólares - 2	2
Afecta la credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos e inversión entre 1.000 y 10.000 dólares - 3	3
Afecta la credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos e inversión mayor de 10.000 dólares. Puede ser irreversible - 4	4

(Continuación)

CUADRO 20.5

OR - Costos de reparación	
Entre 1 y 50 dólares - 0	0
Entre 51 y 500 dólares - 1	1
Entre 501 y 5.000 dólares - 2	2
Mayor a 50.001 dólares - 4	3
Mayor a 50.001 dólares - 4	4

OC - Efectos en Clientes	
Entre 1 y 50.000 dólares - 0	0
Entre 51 y 500 dólares - 1	1
Entre 501 y 5.000 dólares - 2	2
Mayor a 50.001 dólares - 4	3
Mayor a 50.001 dólares - 4	4

Ocurrencia	
Frecuente - 1 falla en 1 mes - 4	4
Ocasional - 1 falla en 1 año - 3	3
Remota - 1 falla en 5 años - 2	2
Poco probable - 1 falla en 20 años - 1	1

Detección	
Nula - No se puede detectar una causa potencial / mecanismo y modo de falla subsecuente - 4	4
Baja - Baja probabilidad para detectar causas potenciales mecanimos y modos de fallas subsecuentes - 3	3
Media - Mediana probabilidad para detectar causas potenciales/ mecanismo y modos de fallas subsecuentes - 2	2
Seguro - Siempre se detectarán causas potenciales/mecanismos y modos de fallas subsecuentes - 1	1

Los valores de posibilidad de ocurrencia y probabilidad de detección se logran por análisis del GCF, de acuerdo con las circunstancias propias de la falla y el equipo en cuestión; y se determinan a partir de las tablas descritas en el *Cuadro 20.5*.

El proceso continúa con la evaluación en equipo del GCF sobre cada uno de los modos de fallas descrito, y una vez se cuenta con la evaluación se procede a su clasificación y jerarquización para determinar la prioridad de ejecución de las tareas correctivas, modificativas o proactivas de mantenimiento.

Luego se planifica la logística de ejecución mediante la asignación de recursos físicos y humanos requeridos para la realización. Se definen los responsables de la puesta en marcha de las tareas y las fechas de actuación. Se determina qué tareas se pueden llevar a cabo en forma simultánea, las predecesoras y las posteriores en cada una de ellas, de tal forma que se reduzcan costos y tiempos de todas las tareas por realizar.

Una vez ejecutadas todas las actividades planeadas o no, derivadas del procedimiento *FMECA*, se realiza nuevamente la evaluación del *RPN* mediante la valoración vigente (después de realizadas las tareas acordadas) de los parámetros de severidad, ocurrencia y detección. Y se establecen en forma reiterativa la jerarquización, la asignación de recursos, la logística y así sucesivamente, hasta algún momento en que se tenga control absoluto de las fallas, o se hayan controlado de forma significativa.



Los valores de posibilidad de ocurrencia y probabilidad de detección se logran por análisis del GCF, de acuerdo con las circunstancias propias de la falla y el equipo en cuestión.

CUADRO 20.6

[illegible]

20.4 VALORACIÓN CUALITATIVA DEL RIESGO

En ocasiones es importante graficar el riesgo de cada uno de los modos de falla descritos. Esta aplicación tiene dos dimensiones: en el procedimiento *FMECA* se habla de un volumen de riesgo, ya que enfrenta tres variables en un plano volumétrico de tres ejes que son severidad, ocurrencia y detección. Esto se puede realizar con la ayuda de Excel procedimiento *FMECA* adjunta en la Web, *Programa - Organizador Excel FMECA*, y enfrentar *S y D*, *S y O*, *D y O* y en ella se puede enfrentar *S y D*, *S y O*, *D y O* con el fin de observar su comportamiento, según la criticidad de la falla.



En el caso particular del *RCM*, en el que sólo se trabaja con severidad y ocurrencia, se grafica como un mapa de riesgo de *RPN*. En ese mapa cada una de las tareas por realizar se ubica en una matriz para jerarquizarlas y clasificarlas, según sus efectos y consecuencias.

El riesgo se modela mediante una matriz en donde se exponen en el eje de las ordenadas las probabilidades de falla de cada uno de los equipos (de sus respectivas funciones, fallas funcionales y modos de falla). Mientras que en el eje de las abscisas se encuentra la severidad de las consecuencias de la falla funcional en su modo específico de falla. El objetivo final es determinar los niveles de riesgo.

Para determinar la matriz modeladora del riesgo se establecen rangos de escalas de frecuencia, y una clasificación de la severidad de las consecuencias, tal y como se muestra en el *Cuadro 20.7*:

Escala de frecuencia - Riesgo - RPN.

CUADRO 20.7

Escala	Tipo de evento	Probabilidad
1	Extremadamente improbable	1.10^{-6}
2	Improbable	2.10^{-5}
3	Algo probable	4.10^{-4}
4	Probable	8.10^{-3}
5	Muy probable	2.10^{-1}

Clasificación de la severidad de las consecuencias.

CUADRO 20.8

Nivel	Severidad de las consecuencias
A	No severas
2	Poco severas
3	Medianamente severas
4	Severas
5	Muy severas

Matriz modeladora del riesgo. Relación probabilidad / consecuencia. **CUADRO 20.9**

MATRIZ DE CRITICIDAD		Severidad de las consecuencias				
		A	B	C	D	E
PROBABILIDAD	5	Medio	Alto	Alto	Muy alto	Muy alto
	4	Medio	Medio	Alto	Alto	Muy alto
	3	Bajo	Medio	Medio	Alto	Muy alto
	2	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto
	1	Muy Bajo	Bajo	Medio	Medio	Alto

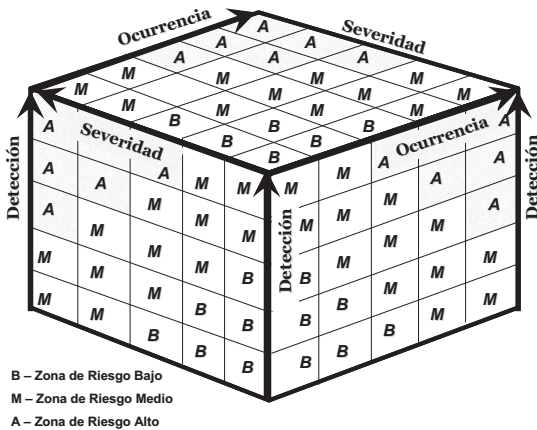
Una vez se establece la matriz de prioridad, se da curso a las acciones correctivas y tareas proactivas con mayor nivel de criticidad, en su orden jerárquico.

Una vez se establece la matriz de prioridad, se da curso a las acciones correctivas y tareas proactivas con mayor nivel de criticidad, en su orden jerárquico.

Los mapas y volúmenes de riesgo son útiles cuando se desea:

- Aplicar sistemas de inspección basada en riesgos
- Revisar frecuencias de inspección de riesgos
- Optimizar los costos asociados a los riesgos
- Cuantificar y mejorar los niveles de riesgos
- Mejorar la productividad y el rendimiento.

Volumen de riesgo en el procedimiento FMECA. **GRÁFICO 20.14**



Fuente: El autor.

Para el apoyo del procedimiento *FMECA* se puede utilizar el formato de los dos programas de la Web, anexos, denominados *Organizador Excel FMECA* y *Programa - Relación de severidad ocurrencia detección FMECA*, alusivos a *FMECA*.

Ayuda en la

Organizador Excel
FMECARelación de severidad
ocurrencia detección
FMECA

20.5 GESTIÓN Y MANEJO DE INVENTARIOS, REPUESTOS E INSUMOS DE MANTENIMIENTO

La utilización de un sistema o una metodología que permita administrar y controlar el manejo de los insumos, los repuestos y las materias primas de mantenimiento se considera como un instrumento avanzado, ya que mediante su aplicación se logran sustanciales ahorros en la gestión y la operación del mantenimiento industrial, como también se logran mejoras logísticas en el servicio de mantenimiento.

Es importante recordar del *Gráfico 4.2 - Tiempos importantes*, siglas y demás convenciones usados en la medición y la predicción CMD, que los hechos que generan la no funcionalidad y la no disponibilidad de los equipos pueden ser tres:

- Tareas proactivas (mantenimientos planeados).
- Reparaciones (mantenimientos no planeados: correctivos o modificativos).
- Retrasos en el suministro de repuestos, insumos, materias primas de mantenimiento o recursos humanos.

De allí la gran importancia de presentar, al menos los criterios básicos y las estrategias de manejo de los inventarios, insumos, materias primas o repuestos de mantenimiento.

La existencia de almacenes de repuestos o de inventarios se justifica desde dos hechos posibles:

- El consumo de repuestos es más alto que su velocidad de producción o de fabricación, es decir, la demanda es más alta que la oferta.
- El tiempo de transporte y/o la distancia entre el punto de fabricación o comercialización de repuestos y el punto donde se consumen, o donde se requieren para ser usados, son muy grandes.

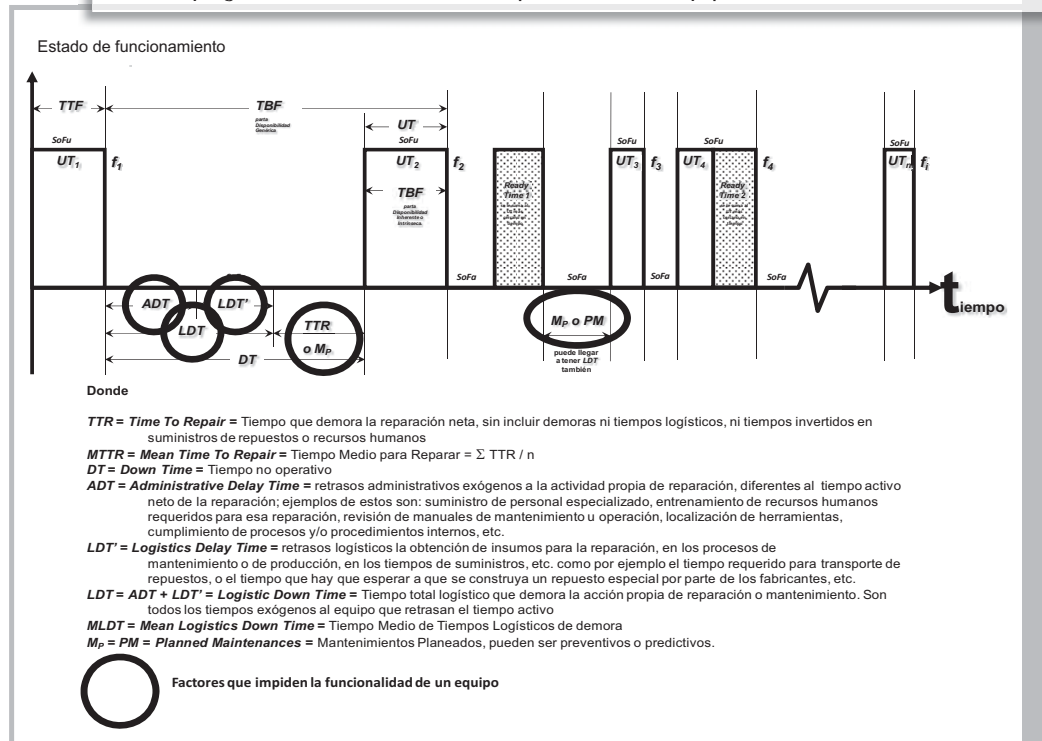
Los inventarios son almacenamientos de materias primas, repuestos, insumos, productos en proceso o bienes terminados que aparecen a lo largo de la cadena productiva o del proceso logístico de una empresa. En general, el costo de mantener los inventarios puede alcanzar cifras significativas cercanas hasta del 40% de su valor y representa casi un 15% de la venta total anual de las empresas. De allí la gran importancia de presentar, al menos, los criterios básicos y las estrategias fundamentales de manejo de los inventarios, insumos, materias primas, repuestos, productos terminados o en proceso.



Utilizar un sistema para administrar y controlar el manejo de los repuestos y las materias primas de mantenimiento se considera como un instrumento avanzado pues con su aplicación se logran sustanciales ahorros en la gestión y operación del mantenimiento industrial.

Factores que generan no funcionalidad o no disponibilidad en los equipos.

GRÁFICO 20.15



20.6 CLASIFICACIÓN ABC

El primer paso en el manejo de los inventarios es clasificar los repuestos de acuerdo con su grado de importancia. Eso se realiza mediante una clasificación ABC, derivada del principio de Wilfredo Pareto, un renacentista del siglo XIX, quien documenta por primera vez el principio de la administración de materiales, que es la base del análisis ABC y cuyo principio manifiesta que pocos factores son la causa de muchos de los efectos (Bierman y otros, 1991).

El principio ABC jerarquiza los repuestos o los insumos, de acuerdo con la cantidad de unidades usadas y con el precio de ellas. El concepto del monto económico que representa el consumo durante un período de tiempo es el más importante para definir la categoría de los repuestos e insumos. Se parte de la base de que el esfuerzo logístico que se le debe prestar a una cantidad pequeña de referencias que mueven un gran volumen y un buen porcentaje de los artículos de los inventarios debe ser alto. Para ello es posible establecer algunas relaciones, entre las cuales hay dos relevantes que son las más usadas:

Los inventarios son almacenamientos de materias primas, repuestos, insumos, productos en proceso o bienes terminados que aparecen a lo largo de la cadena productiva, o del proceso logístico de una empresa.

- Árbones plantea que el 10% de los artículos mueve el 75% de la cantidad utilizada o vendida; el 35% de las referencias representan el 95% de la demanda, y el 55% de los productos sólo mueve el 5% de la cantidad total de lo almacenado (Árbones, 1999).
- Ronald Ballou expresa que el 20% de las referencias representa al menos el 80% de la cifra utilizada en total del ítem (Ballou, 2004).

El proceso de clasificación ABC se realiza de la siguiente manera: inicialmente se tabulan los datos reales, luego se ordenan de mayor a menor en Y (es el porcentaje acumulado de la cantidad monetaria usada en promedio anual en los últimos 18 meses). Se calcula X que es la contribución en porcentaje de referencia acumulado (por ejemplo, si son 10 referencias, el artículo 1 contribuye con una X de $1/10$ igual 0.1, la referencia 5 con una X del 50%, y así sucesivamente).

Luego se calcula el A (apoyo logístico) con las fórmulas que se dan a continuación, con el A promedio real actual se define una nueva combinación 10&75 o 20&80, con lo cual estima nuevamente la Y con X y A conocidas, y de esta forma se clasifican todas las referencias en las tres categorías ABC.

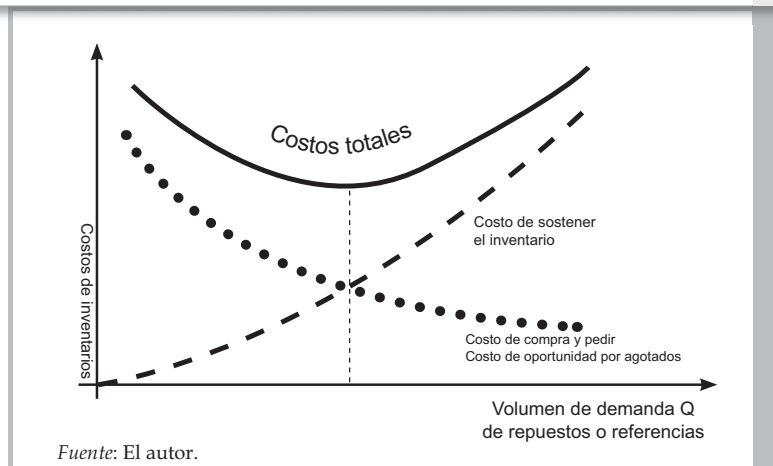
En inventarios se procura bajar costos y elevar el nivel de servicio al cliente. En el primer aspecto de costos hay elementos fundamentales, que permiten establecer importantes criterios de manejo de los inventarios.

20.7 COSTOS

Los principales rubros asociados a los inventarios y a su óptica desde pronósticos, son: de pedir, de sostener el inventario y el costo de oportunidad por agotados en las referencias.

Costos de inventarios.

GRÁFICO 20.16



En general, el costo de mantener los inventarios puede alcanzar cifras significativas cercanas hasta del 40% de su valor, que representan casi un 15% de la venta total anual de las empresas.

El principio ABC jerarquiza los repuestos o los insumos, de acuerdo con la cantidad y el precio de unidades usadas. El concepto del monto económico que representa el consumo durante un período de tiempo es el más importante para definir la categoría de los repuestos e insumos.

En inventarios se procura bajar costos y elevar el nivel de servicio al cliente. En el primer aspecto de costos hay elementos fundamentales, que permiten establecer importantes criterios de manejo de los inventarios.

20.7.1 Costos de pedir al proveedor o fabricar

Esta cifra se asocia al mismo hecho de solicitar al proveedor una cantidad definida de referencias para ser entregadas en un determinado tiempo, con unas especificaciones técnicas y de calidad dadas. Todo eso implica costos de: procesamiento del pedido, comunicaciones, elaboración de la documentación pertinente, el tiempo de los funcionarios que intervienen, el costo en sí de la producción o de las referencias, transacciones bancarias y financieras, transporte (cuando éstos no se incluyen en otro concepto), recursos de los diferentes departamentos internos o externos que facultan la compra y demás coligados.

Este rubro, normalmente, es constante para distintas referencias, y aunque puede variar un poco entre categorías, normalmente no están directamente relacionadas con el volumen de la compra o pedido.

20.7.2 Costos de sostener

El mantenimiento del inventario implica costos de renta o de alquiler del espacio físico que se ocupa del almacén o la bodega, costo financiero del valor total de la mercancía almacenada en promedio (es de los rubros más altos que se tienen en cuenta en los costos totales). Costos de seguros e impuestos relacionados con el valor y volumen del inventario que se maneja (incluye seguros, riesgos, robos, incendios, terremotos, etc.) y costo por obsolescencia, que es el que generan los productos que, por alguna razón de tiempo u otra, se deterioran o dejan ser utilizados por diversas razones.

20.7.3 Costos de agotar

Normalmente, la falta de materias primas o productos, cuando éstos se demandan y, en consecuencia, no se pueden entregar a quien los solicita, implica varios costos extras: de incumplimiento a los clientes, trabajos de mantenimiento paralizados por referencias agotadas, con toda la problemática que ello genera en los clientes, con el impacto negativo que esto causa en el demandante y el costo de pedidos extras o pendientes.

Dichos costos extras consisten en desarrollar todo un canal logístico paralelo para administrar estas demandas (por agotados), por fuera del sistema tradicional, o cuando se pagan cifras adicionales por transporte o por producción para atender las solicitudes de pedidos insatisfechos a productores o proveedores. Habitualmente son difíciles de calcular y, por lo general, se asumen como costos de oportunidad.

20.7.4 Nivel de servicio

El segundo gran objetivo de los inventarios es mantener una disponibilidad suficiente de referencias y volúmenes que logren



El mantenimiento del inventario implica costos de renta o alquiler del espacio físico que se ocupa del almacén o bodega, costo financiero del valor total de la mercancía almacenada en promedio. Costos de seguros e impuestos relacionados con el valor y volumen del inventario que se maneja y costo por obsolescencia.

El segundo gran objetivo de los inventarios es mantener una disponibilidad suficiente de referencias y volúmenes, que logren satisfacer la demanda que se requiere periódicamente.

satisfacer la demanda que se requiere periódicamente. Se calcula a partir de las probabilidades de disponibilidad de cada una de las referencias posibles que en forma habitual pide el cliente. También se dan casos de varias referencias en un solo pedido, o el caso más complejo es cuando pueden ocurrir varias demandas de diferentes referencias en distintos pedidos en el tiempo, para el mismo cliente.

Estimación del nivel de servicio al cliente

EJEMPLO 20.2

Se tiene un cliente que demanda varios ítems; en los cuadros siguientes se aportan los datos de la tasa de aprovisionamiento de cada referencia y la frecuencia con que éstas se solicitan en forma habitual, para los distintos casos.

$$\text{Nivel de servicio} = 100\% - \frac{\text{Cantidad no entregada por período}}{\text{Demanda total del período}}$$

En el evento de una sola referencia como la HJ-675, se estima así:

Nivel de servicio para un artículo		Cantidad		Faltante agotado
Demanda No.	Fecha	Demanda	Entregada	
1	Año 1 - Mes 1 - Día 12	76	76	0
2	Año 1 - Mes 1 - Día 18	67	66	1
3	Año 1 - Mes 1 - Día 25	84	83	1
4	Año 1 - Mes 2 - Día 09	74	34	40
5	Año 1 - Mes 3 - Día 06	18	18	0
6	Año 1 - Mes 3 - Día 10	42	42	0
7	Año 1 - Mes 5 - Día 3	40	34	6
8	Año 1 - Mes 5 - Día 24	7	7	0
9	Año 1 - Mes 7 - Día 12	23	17	6
10	Año 1 - Mes 8 - Día 11	70	68	2
11	Año 1 - Mes 8 - Día 19	64	64	0
12	Año 1 - Mes 8 - Día 30	26	26	0
13	Año 1 - Mes 9 - Día 26	56	56	0
14	Año 1 - Mes 10 - Día 17	18	18	0
15	Año 1 - Mes 11 - Día 02	90	89	1
16	Año 1 - Mes 11 - Día 14	4	4	0
17	Año 1 - Mes 12 - Día 06	44	23	21
Demanda total		803	Suma agotados	78

Las cantidades agotadas no entregadas, no se envían en el siguiente pedido

$$\text{Nivel de servicio por período}_{\text{HJ-675}} = 100\% - \frac{78}{803} \cdot 100\% = 90,29\%$$

Cuando se trata de varias referencias individuales no combinadas, se estima cada una de ellas en forma independiente, y el global del nivel de servicio se calcula mediante la multiplicación probabilística del grado de disponibilidad de cada una.

Ítem	Referencias	Probabilidad de surtido de pedido integral
1	JK-989	93.67%
2	HJ-675	92.37%
3	LM-034	89.98%
4	GH-208	87.76%

*Nivel de servicio global JK-898 & HJ-675 & LM-034 & GH-208 = 93,67% * 92,37% * 89,98 * 87,76% = 68,32%*

El total es menor que el individual de cada ítem,

Cuando hay varias referencias y se pueden generar demandas, con diferentes opciones de combinación, se cuantifica así:

Ítem	Referencias	Frecuencia de demanda	Probabilidad de surtido de pedido integral	Cálculo global
1	JK-989	0.08	93.67%	0.07494
2	HJ-675	0.09	92.37%	0.08313
3	LM-034	0.11	89.98%	0.09898
4	GH-208	0.09	87.76%	0.07898
1 y 2	JK-989 y HJ-675	0.09	86.52%	0.07787
1 y 3	JK-989 y LM-034	0.07	84.28%	0.05900
1 y 4	JK-989 y GH-208	0.10	82.20%	0.08220
2 y 3	HJ-675 y LM-034	0.09	83.11%	0.07480
2 y 4	HJ-675 y GH-208	0.04	81.06%	0.03243
3 y 4	LM-034 y GH-208	0.07	78.97%	0.05528
1, 2 y 3	JK-989, HJ-675 y LM-034	0.06	77.85%	0.04671
1, 2 y 4	JK-989, HJ-675 y GH-208	0.03	75.93%	0.02278
2, 3 y 4	HJ-675, LM-034 y GH-208	0.05	72.94%	0.03647
1, 2, 3 y 4	JK-989, HJ-675, LM-034 y GH-209	0.03	68.32%	0.02050
	Suma	1.00	Tasa promedio de atención integral	84.41%

Fuente: El autor.

En síntesis, el costo del inventario por mantener está en función de varios aspectos, como el nivel del servicio que se desea sostener a un cliente en determinadas referencias (ya que éste define la cantidad por despachar), los volúmenes por mantener (pues esto depende de las cifras que se pidan y el tiempo en que se requieran. Lo cual coaligado da el monto de unidades de cada referencia por mantener), los tiempos de reaprovisionamiento (en la medida que sean más frecuentes o no, incide en los volúmenes que se tienen disponibles).

Ahora se procede a profundizar un poco en la forma como se calculan las cantidades por pedir en cada una de las dos filosofías de manejo de inventarios: *Demand Pull* o *Technology Push*.

CUADRO 20.10 Datos reales - Inventarios - Clasificación A B C.

Ítem	Referencia	Consumo de unidades por mes																		Demanda o Cantidad usada promedio en los últimos 18 meses	Precio de Referencia Unitario	Cantidad monetaria promedio demanda anual
		ene-04	feb-04	mar-04	abr-04	may-04	jun-04	jul-04	ago-04	sep-04	oct-04	nov-04	dic-04	ene-05	feb-05	mar-05	abr-05	may-05	jun-05			
1	D-232	148	60	103	277	252	366	279	60	267	107	2	220	334	120	386	124	193	106	189	\$ 49078	\$ 6,187,463.41
2	H-876	68	304	46	288	186	144	88	180	391	323	56	76	267	268	256	34	219	274	193	\$ 21728	\$ 2,790,840.89
3	U-897	326	54	353	196	217	0	78	27	331	104	68	20	347	82	146	368	380	137	180	\$ 15449	\$ 1,850,446.89
4	J-321	396	322	323	258	381	8	253	265	243	275	128	317	62	272	180	339	352	368	263	\$ 22633	\$ 3,975,025.41
5	Y-098	379	289	284	389	90	274	296	379	244	270	23	313	270	58	205	297	122	2	232	\$ 85485	\$ 13,247,008.89
6	M-087	128	41	302	208	211	131	86	257	120	17	350	308	267	18	117	57	308	181	173	\$ 9410	\$ 1,082,847.04
7	Z-232	6	84	243	339	241	146	329	82	319	165	128	327	285	301	322	381	162	241	228	\$ 81128	\$ 12,322,441.78
8	I-209	338	190	286	354	155	99	107	136	394	4	125	332	7	146	336	87	279	56	191	\$ 37335	\$ 4,744,310.56
9	K-982	144	176	151	60	187	12	351	388	338	349	77	262	47	319	364	10	103	151	194	\$ 45226	\$ 5,844,204.22
10	O-786	9	6	6	5	4	0	3	0	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2	\$ 35336	\$ 48,423.41
11	D-343	263	231	50	296	141	133	239	322	86	152	4	161	376	368	377	301	1	232	207	\$ 83645	\$ 11,564,695.74
12	D-321	2	341	332	385	332	0	263	311	5	298	259	7	126	1	320	1	3	20	167	\$ 94912	\$ 10,566,889.33
13	L-786	76	237	347	251	2	357	83	314	388	173	144	167	222	58	255	0	196	121	188	\$ 41613	\$ 5,226,284.56
14	M-789	242	49	364	337	14	327	124	301	356	39	355	301	240	256	379	307	288	364	258	\$ 89143	\$ 15,329,294.41
15	W-023	213	32	33	328	256	291	77	182	350	294	135	350	275	298	249	113	201	366	225	\$ 43587	\$ 6,526,749.67
16	G-230	0	3	6	2	3	0	2	1	2	0	5	2	3	7	4	5	4	0	3	\$ 45041	\$ 81,741.07
17	A-219	224	6	144	343	28	161	358	343	192	276	110	339	319	262	284	360	284	64	228	\$ 18490	\$ 2,895,686.30
18	G-564	150	2	211	260	386	230	144	302	128	52	308	220	118	124	150	322	25	129	181	\$ 99310	\$ 11,994,441.11
19	K-920	207	123	374	274	302	246	16	122	112	25	103	364	325	79	369	113	273	223	203	\$ 66904	\$ 9,044,429.63
20	J-629	74	296	4	372	257	7	168	271	289	32	312	257	192	299	246	161	369	100	206	\$ 93070	\$ 12,774,719.26
21	M-063	167	334	250	89	4	376	263	287	103	293	153	379	382	265	376	204	300	370	255	\$ 79324	\$ 13,493,769.63
22	S-785	1	0	0	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	12	0	0	0	0	1	\$ 78075	\$ 49,158.33
23	N-672	188	158	225	5	329	338	243	292	245	293	356	226	394	359	88	58	76	75	219	\$ 77491	\$ 11,330,906.22
24	F-320	152	147	214	253	259	87	366	259	290	145	236	322	63	387	132	146	263	161	216	\$ 38790	\$ 5,577,140.00

► ECUACIÓN 20.3 - Fórmulas de A, Y y X para clasificación A B C de Inventarios

$$\text{Apoyo Logístico} = A = \frac{X * (1 - Y)}{(Y - X)}$$

con Y porcentaje acumulado de la cantidad monetaria anual y X como el porcentaje acumulado de artículos; si se despejan Y y X, quedan así:

$$Y = \frac{X * (1 + A)}{(A + X)} \text{ y a su vez } X = \frac{A * (Y - 1)}{(1 - Y)}$$

Para el caso particular, se adopta un ABC con la proporción Árbones X & Y de 10 & 75, lo que da lugar a la categorización de las referencias de tal forma que el 10% de los ítems son A y representan el 75% de la cantidad monetaria que se demanda anualmente, el 25% de los artículos caen en la categoría B y el resto del 55% se establecen como productos tipo C.

La estrategia que se desarrolla con las referencias, en función de su clasificación, es:

- *Tipo A*, se mantiene un excelente nivel de inventarios en todos los almacenes o en los que existan.
- *Tipo B*, son referencias que mantienen niveles medios de inventarios sólo en algunos almacenes.
- *Tipo C*, son artículos a los cuales no se les mantienen buenos márgenes de inventarios, y en caso de hacerlo sólo se tienen en uno que otro almacén de repuestos (si hay varios); cuando sólo hay uno se pide cuando se requiere.

De cierto modo la clasificación ABC representa el grado de esfuerzo que se da al inventario de la referencia (A es el más alto y C el más bajo). En el *Cuadro 20.10* alusivo al tema, se observa que el 10% de las referencias representan el 75% de la demanda total en unidades económicas, el 35% de los artículos corresponde aproximadamente al 94% de las referencias requeridas, lo cual es bastante similar a la propuesta Árbones 10 & 75.

Para estimar el nivel medio del inventario promedio por mantener de la referencia, primero mediante políticas de la empresa, se define el inventario promedio por mantener la tasa de rotación (que denota el tiempo promedio que se mantiene un repuesto o un insumo dentro del estante del inventario).

Para inventarios promedio se recomienda 1,25 veces el consumo promedio⁵ mes para los tipo A 0,75, para los B, y 0,35 o menos para los tipo C. La tasa de rotación es el inverso por año del inventario promedio. En el siguiente ejemplo al dividir 12 meses entre el número de inventarios promedio se obtiene una rotación de 9,6 veces para las referencias tipo A, 16 para B, y 34 veces por año para los artículos tipo C.

En el evento de que se desee retirar referencias por no rotación, o porque no tienen demanda, el procedimiento de cálculo es el mismo, y con el nuevo X y el A definidos por política se estima el nuevo Y, para realizar en forma posterior los cálculos pertinentes ya expuestos. En el ejemplo que se muestra en el *Cuadro 20.11* se descartan del inventario regular las nueve (9) referencias sombreadas con trama de puntos: L-099, L-090, G-239, J-321, M-063, L-786, D-395, K-982 y K-920 por baja rotación; se desea estimar el inventario por mantener por cada ítem.

Luego de hacer los cálculos se deben revisar los resultados y definir políticas hacia los inventarios por mantener. Después del cálculo ABC sin las referencias mencionadas, se obtiene el inventario promedio en unidades de dos maneras en este ejemplo. La empresa debe definir cuál de las dos cifras adopta, las cuales pueden ser diferentes, dependiendo de la compañía en particular.

5 Para que el consumo promedio sea actualizado, se utiliza el cálculo de este valor mediante una media aritmética entre el consumo del último mes y el pronóstico (estimado con métodos de series temporales, o mediante otra metodología científica de cálculo) de demanda del próximo periodo o mes.

CUADRO 20.11

Clasificación ABC inventarios.

Ítem	Referencia	Demanda o Cantidad mensual usada promedio en los últimos 18 meses	Precio de Referencia Unitario	Cantidad monetaria promedio demanda anual	Cantidad monetaria anual acumulada	X = Porcentaje acumulado de artículos	Y = Porcentaje individual de demanda anual	A - Apoyo logístico actual = $X \cdot (1-Y) / (1-X)$	Nuevo Y para A de 3.85% con $Y = X \cdot (1-A) / (A-X)$	CLASIFICACIÓN A B C con nuevo Y	Nuevo Demanda anual por referencia en Unidades Monetarias A y nuevo Y	Nuevo Demanda acumulada anual en Unidades Monetarias con nuevo A y nuevo Y
1	H-701	203	\$ 999,997.00	\$ 243,326,033.33	\$ 243,326,033.33	2.50%	23.93%	8.88%	40.89%	A	\$ 415,900,790.95	\$ 415,900,790.95
2	C-504	160	\$ 977,000.00	\$ 199,531,604.00	\$ 432,857,837.33	5.00%	18.44%	7.85%	58.67%	A	\$ 180,885,089.85	\$ 596,665,880.80
3	I-209	245	\$ 445,678.00	\$ 139,926,940.00	\$ 572,784,777.33	7.50%	13.16%	6.71%	9.95%	A	\$ 107,200,023.24	\$ 977,886,900.04
4	J-429	216	\$ 139,008.00	\$ 79,886,384.00	\$ 652,671,161.33	10.00%	7.86%	6.61%	75%	A	\$ 64,665,732.02	\$ 762,551,631.05
5	D-321	232	\$ 211,708.00	\$ 59,340,277.33	\$ 712,911,438.67	12.00%	70.94%	6.52%	79.40%	B	\$ 44,890,271.88	\$ 807,441,900.91
6	F-298	206	\$ 113,048.00	\$ 33,202,716.00	\$ 765,214,154.67	15.00%	73.24%	6.16%	82.44%	B	\$ 32,983,033.94	\$ 840,424,900.86
7	F-320	230	\$ 113,048.00	\$ 41,291,746.67	\$ 806,905,901.33	17.50%	79.50%	5.86%	85.12%	B	\$ 25,258,673.09	\$ 865,683,613.94
8	H-476	206	\$ 113,048.00	\$ 23,951,281.33	\$ 839,457,182.67	20.00%	82.54%	5.58%	87.00%	B	\$ 19,063,353.78	\$ 885,446,967.72
9	D-343	228	\$ 112,000.00	\$ 28,428,132.00	\$ 897,885,314.67	22.50%	85.34%	5.25%	88.80%	B	\$ 16,175,241.11	\$ 901,822,208.83
10	F-299	167	\$ 112,000.00	\$ 25,691,280.00	\$ 893,576,594.67	25.00%	87.07%	4.83%	89.80%	B	\$ 13,371,904.63	\$ 915,941,116.26
11	A-719	189	\$ 13,000.00	\$ 20,625,970.67	\$ 914,202,565.33	27.50%	93.71%	4.45%	91.10%	B	\$ 11,230,222.98	\$ 926,433,341.24
12	A-719	132	\$ 13,000.00	\$ 18,496,000.00	\$ 932,698,565.33	30.00%	93.71%	4.03%	92.44%	B	\$ 9,579,077.43	\$ 936,014,415.67
13	G-564	228	\$ 5,704.00	\$ 18,310,858.67	\$ 951,009,424.00	32.50%	93.71%	3.48%	92.85%	B	\$ 8,265,457.59	\$ 944,273,873.26
14	L-342	174	\$ 5,542.00	\$ 12,539,497.33	\$ 968,474,522.67	35.00%	95.23%	2.77%	93.85%	B	\$ 7,198,205.93	\$ 951,477,080.19
15	L-099	15	\$ 5,191.00	\$ 12,539,497.33	\$ 981,013,020.00	37.50%	96.46%	2.25%	94.18%	C	\$ 6,327,807.06	\$ 957,799,887.25
16	J-702	19	\$ 5,191.00	\$ 6,995,746.67	\$ 988,009,766.67	40.00%	97.15%	1.99%	94.73%	C	\$ 5,606,273.32	\$ 963,406,163.57
17	D-390	191	\$ 5,291.00	\$ 5,240,286.67	\$ 993,250,917.33	42.50%	97.67%	1.80%	95.22%	C	\$ 5,001,501.80	\$ 968,407,667.38
18	Z-690	178	\$ 5,130.00	\$ 2,790,300.00	\$ 996,540,317.33	45.00%	97.94%	1.75%	95.22%	C	\$ 4,485,571.36	\$ 972,897,244.74
19	Y-698	172	\$ 5,130.00	\$ 2,554,406.67	\$ 998,994,754.00	47.50%	98.19%	1.69%	96.00%	C	\$ 4,052,422.80	\$ 976,940,667.54
20	U-697	178	\$ 5,137.00	\$ 2,422,568.00	\$ 1,001,971,322.00	50.00%	98.43%	1.62%	96.43%	C	\$ 3,676,153.27	\$ 980,625,820.81
21	N-480	173	\$ 5,140.00	\$ 2,158,268.67	\$ 1,003,173,588.67	52.50%	98.64%	1.54%	97.50%	C	\$ 3,348,963.98	\$ 983,971,784.79
22	N-472	182	\$ 5,170.00	\$ 1,995,110,192.67	\$ 1,005,110,192.67	55.00%	98.85%	1.44%	97.60%	C	\$ 3,065,343.12	\$ 987,041,120.92
23	N-002	139	\$ 5,164.00	\$ 1,809,834.67	\$ 1,007,110,027.33	57.50%	99.03%	1.34%	97.33%	C	\$ 2,815,520.75	\$ 989,856,650.66
24	L-005	160	\$ 5,140.00	\$ 1,697,306.00	\$ 1,008,916,333.33	60.00%	99.20%	1.23%	97.50%	C	\$ 2,595,044.44	\$ 992,451,692.10
25	M-109	159	\$ 5,077.00	\$ 1,215,846.00	\$ 1,010,939,161.33	62.50%	99.22%	1.16%	97.85%	C	\$ 2,398,484.44	\$ 994,851,175.54
26	R-487	172	\$ 5,093.00	\$ 1,146,256.00	\$ 1,011,933,443.33	65.00%	99.43%	1.07%	98.04%	C	\$ 2,232,232.94	\$ 997,079,408.47
27	R-783	172	\$ 5,093.00	\$ 1,146,256.00	\$ 1,012,535,755.33	67.50%	99.54%	0.95%	98.22%	C	\$ 2,068,292.31	\$ 999,145,698.78
28	S-785	168	\$ 5,080.00	\$ 852,309.33	\$ 1,013,186,244.67	70.00%	99.63%	0.88%	98.44%	C	\$ 1,925,191.27	\$ 1,001,074,890.06
29	G-239	30	\$ 5,124.00	\$ 630,517.33	\$ 1,014,076,762.00	72.50%	99.71%	0.78%	98.61%	C	\$ 1,882,553.62	\$ 1,002,871,742.88
30	J-251	31	\$ 5,147.00	\$ 525,583.33	\$ 1,014,542,345.33	75.00%	99.76%	0.73%	98.78%	C	\$ 1,884,749.09	\$ 1,004,150,027.72
31	I-180	132	\$ 5,131.00	\$ 522,890.00	\$ 1,015,065,225.33	77.50%	99.81%	0.65%	98.78%	C	\$ 1,740,250.04	\$ 1,007,441,272.76
32	M-463	8	\$ 5,420.00	\$ 402,912.00	\$ 1,015,558,237.33	80.00%	99.86%	0.56%	98.94%	C	\$ 1,602,958.78	\$ 1,009,042,231.54
33	L-786	8	\$ 5,030.00	\$ 489,150.00	\$ 1,016,647,387.33	82.50%	99.92%	0.45%	99.20%	C	\$ 1,524,951.53	\$ 1,010,376,183.07
34	Z-232	151	\$ 5,211.00	\$ 417,956.00	\$ 1,016,817,443.33	85.00%	99.95%	0.29%	99.47%	C	\$ 1,352,430.92	\$ 1,011,622,613.99
35	Y-789	168	\$ 5,176.00	\$ 352,100.00	\$ 1,016,817,443.33	87.50%	99.98%	0.11%	99.74%	C	\$ 1,165,703.78	\$ 1,012,806,319.78
36	D-395	37	\$ 5,432.00	\$ 84,656.00	\$ 1,016,802,099.33	90.00%	99.99%	0.07%	99.85%	C	\$ 1,124,171.60	\$ 1,013,932,494.38
37	K-882	36	\$ 5,222.00	\$ 77,336.67	\$ 1,016,939,838.00	92.50%	100.00%	0.05%	99.70%	C	\$ 1,067,311.95	\$ 1,014,999,806.33
38	K-820	19	\$ 5,800.00	\$ 22,866.67	\$ 1,016,982,704.67	95.00%	100.00%	0.03%	99.81%	C	\$ 1,045,657.19	\$ 1,016,041,465.53
39	M-698	39	\$ 5,400.00	\$ 15,232.00	\$ 1,016,980,268.67	97.50%	100.00%	0.01%	99.96%	C	\$ 965,805.14	\$ 1,016,980,268.67
40	O-786	184	\$ 5,100.00	\$ 2,332.00	\$ 1,016,980,268.67	100.00%	100.00%	0.01%	100.00%	C	\$ 965,805.14	\$ 1,016,980,268.67
Demanda Total Año												
\$ 1,016,980,268.67												
Nuevos Años 18.75 años												
3.85%												
\$ 1,016,980,268.67												

Fuente: El autor.

20.8 DENOMINACION PUSH O PULL⁶

Una vez se cataloga su importancia en ABC, se desarrolla otro paso para optimizar el manejo y la gestión de los inventarios. Este paso consiste en clasificar las referencias en *Push* o *Pull*, en función de la característica que deben cumplir dichos insumos o repuestos en la función de mantenimiento en la compañía, y del sistema de reaprovisionamiento que se adopte para reponer el nivel de inventarios deseado en cada ítem.

Las referencias *Push*⁷ siempre deben estar disponibles en el almacén de repuestos e insumos de mantenimiento. Pero cuando se agota el inventario establecido y llega al nivel de reposición, se pide nuevamente para completar el nivel deseado por mantener de manera permanente. Básicamente, esta categoría trabaja contra el nivel real del inventario. Su demanda en la mayoría de las veces tiene patrones de conducta de cierta manera similares. Sus demandas futuras se calculan a partir de pronósticos por series temporales. Se trabajan cuando se tiene una cantidad inmensa de referencias.

En forma contraria los artículos *Pull*⁸ sólo se piden al proveedor o fabricante cuando son solicitados por mantenimiento. Y el saldo o remanente que queda como una especie de inventario es sólo eso, un residuo de la solicitud anterior. Por lo general, en esta categoría se mantienen los repuestos de escasa demanda o los muy costosos que no implican consecuencias negativas el no mantenerlos en *stock*. El tiempo de espera del proveedor o denominado *lead time* aparece como uno de los criterios importantes en esta clase de artículos.

Sus demandas casi siempre mantienen un comportamiento bastante irregular y aleatorio. Esta categoría se usa para repuestos no genéricos que únicamente sirven para una sola máquina o su proveedor es único. Se estiman en sus demandas futuras a partir de los históricos de la demanda, teniendo en cuenta que es más saludable obtener dichas demandas promedio, sobre la base de la historia y los pronósticos de demanda realizados con series temporales.

20.8.1 Push

En el caso particular de los artículos *Push*, en ocasiones los lotes de pedidos a los proveedores son mayores que el requerimiento. O la capacidad de fabricación de piezas excede la cantidad solicitada (como el caso contrario en el cual la necesidad



Las referencias *Push* siempre deben estar disponibles en el almacén de repuestos e insumos de mantenimiento.

Pero cuando se agota el inventario establecido y llega al nivel de reposición, se pide nuevamente para completar el nivel deseado por mantener de manera permanente.

Los artículos *Pull* sólo se piden al proveedor o fabricante cuando son solicitados por mantenimiento. Y el saldo o remanente que queda como una especie de inventario es sólo eso, un residuo de la solicitud anterior.

⁶ Referidos también como *Technology Push*, son referencias que se lanzan (empujan) desde las fábricas hacia el mercado. Conocidos como *Demand Pull*, son referencias que se demandan (jalonan) desde los mercados a las fábricas.

⁷ Denominados control de inventarios por incrementos.

⁸ Denominados control de inventarios por demanda.

está por encima de la capacidad de fabricación) o el poder adquisitivo es superior a la necesidad. En cualquiera de los eventos anteriores se debe hacer una reasignación de las cantidades por solicitar por cada referencia⁹, para lo cual se dan los siguientes pasos por medio del método de *asignación*:

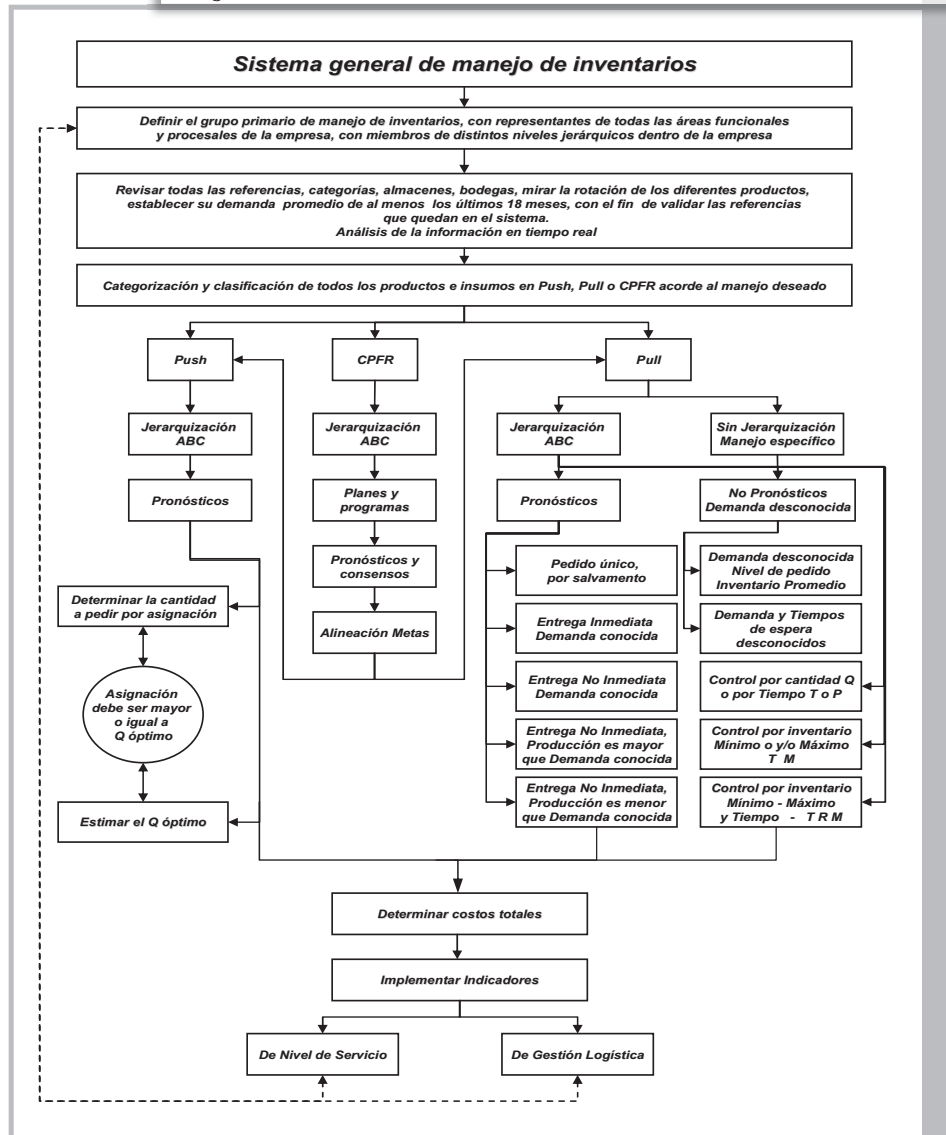
- Estimar la demanda para el siguiente período, mediante la técnica de series temporales.
- Cuantificar el inventario disponible de la referencia para el período actual.
- Calcular el error entre el pronóstico del mes actual y su demanda real.
- Asignar el nivel de disponibilidad deseado en las diferentes referencias por estimar en el inventario requerido, al final del siguiente período.
- Determinar los requisitos netos por referencia que se obtienen de adicionar el pronóstico del período siguiente al error de pronóstico del mes anterior.
- Establecer los requerimientos netos como la diferencia entre las cantidades disponibles y los requisitos totales.
- Distribuir los excesos (o defectos) de los requerimientos netos entre el pronóstico de demanda del siguiente período.
- Asignar las cantidades por solicitar por cada referencia para el siguiente período, a partir de los excesos.
- Definir la demanda o requisito específico y establecer el inventario deseado al final del período calculado¹⁰.

9 Debe ser la misma referencia, o en el evento de que se trate de referencias diferentes debe ser calculada bajo la metodología de cantidades equivalentes, es decir, bajo un mismo patrón de medida en términos de dinero, de horas de fabricación u otra escala.

10 Para referencias tipo A se recomienda la cantidad de 1,25 veces el consumo promedio (establecido mediante el cálculo de la venta o demanda del último período más el pronóstico, hallado por series temporales, del siguiente período, entre dos 2); para los B se sugiere 0,75 veces la demanda promedio y para los ítems tipo C 0,35 veces.

Ciclo general de inventarios.

GRÁFICO 20.17



CUADRO 20.12

Retiro de referencias e inventario por mantener - ABC.

Item	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000
Referencia		H-781	C-584																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					

Push y Pull.

CUADRO 20.13

Síntesis de diferencias Push versus Pull	
Push	Pull
Trabajan contra un inventario	Trabajan contra producción o pedidos
Se mantiene en stock	No se mantiene en stock
Se calculan a partir de pronósticos	Se estiman a partir de demanda histórica promedio (historia + pronósticos)
Cumplen la prueba del ACF	No cumplen ACF
Sus funciones no son aleatorias	Sus funciones son aleatorias
Los datos se correlacionan entre sí	Los datos no se correlacionan entre sí
Presentan una estructura regular	No presentan una estructura regular
Se usan cuando se tienen múltiples referencias	Se usan para referencias o almacenes especiales
Se piden periódicamente	Se piden sólo cuando el nivel llega al ROP
Las cantidades a pedir se calculan con el mayor entre asignación y EOQ	Siempre se pide el EOQ
Se fabrican continuamente	Sólo se piden cuando el cliente los pide
Son estratégicos para las empresas	No son tan relevantes
Su demanda es permanente	Su demanda es esporádica

Fuente: El autor.

La disponibilidad se refiere a la cantidad que se desea tener y consiste en asignar una probabilidad de disponibilidad, a partir de la distribución normal. Es el caso hipotético de que si se presentan 100 solicitudes de un mismo repuesto en un determinado instante, cuántos se desea tener de ellos para responder a esas 100 demandas.

Por ejemplo, si se desea tener una disponibilidad del 90% le corresponde una Z probabilística de 1,2816, se calcula con la distribución normal que se encuentra en la Web bajo la denominación de *Programa - Distribución Normal Z y probabilidades*. También se puede hallar en el Cuadro 19.3 - Tabla de distribución normal para probabilidades y Z.



La disponibilidad se refiere a la cantidad que se desea tener, y consiste en asignar una probabilidad de disponibilidad a partir de la distribución normal.

Ayuda en la



Distribución Normal Z y probabilidades

EJEMPLO 20.3

Asignación de excesos para artículos *Push*

Se tienen cuatro referencias equivalentes, para las cuales existen las necesidades de demanda del próximo período, los inventarios del período anterior (actual). Se cuenta con la disponibilidad definida mediante política empresarial y estimada de la curva de distribución normal. Se calcula el error del mes anterior y se posee una capacidad del proveedor de 1.329 unidades para todas las referencias.

Referencias equivalentes en la óptica de asignación de excesos	Nivel de Inventarios disponible, estimado al final del período actual	Pronóstico de la Demanda para el próximo período	Error del Pronóstico = Demanda real período anterior menos pronóstico período anterior	Nivel de Disponibilidad del inventario, se calcula de la distribución normal	Z correspondiente a la probabilidad anterior de la curva de distribución normal	Total Requerido = demanda próximo período más error del pronóstico (Z por error del pronóstico) del período anterior (actual en este caso)	Requerimiento Neto = total requerido menos inventario disponible del período anterior (actual en este ejemplo)	Prorrateo del Excedente = Capacidad total del proveedor o del pedido posible (1329 en este ejemplo), menos Requerimiento total neto por porcentaje de la demanda del Pronóstico	Asignación = requerimiento neto más el excedente asignado	
	A	B	C	D	E	F	H	I	A	
J-629	989	216	878	85%	1.0364	1126	137	280	416	
F-298	365	207	132	92%	1.4051	393	28	269	297	
H-876	549	206	278	95%	1.6449	663	114	267	381	
F-299	392	167	198	89%	1.2265	410	18	217	234	
Suma	2295	796				2592	297	1032	1329	Capacidad total del proveedor o del pedido posible

Para el caso particular de las referencias *Push* del ABC, se tienen las siguientes cantidades ideales por pedir, junto con su cantidad de pedidos por año y su frecuencia:

Cantidades óptimas por pedir en *Push*.

GRÁFICO 20.18

		Nuevo A para 10 & 75 vale 3.85%		Lote Económico $Q = \sqrt{2DS / IC}$							Inventario recomendado por política de la empresa $A=1.25$ veces, $B=0.75$ veces y $C=0.35$ la D promedio
1	2	28	29	I	S	D	C	Q	N	T	
	ítem	Nuevo Y para A de 3.85% con $Y = X \cdot (1+A)/(A+X)$	Tipo A B C	Costo de Manejo y Almacenamiento por unidad en porcentaje del costo	Costo Unitario de reponer por pedido	Demanda promedio año a partir de la última demanda y el pronóstico próximo período	Costo	Cantidad a pedir (pedido óptimo por costo) en unidades de la referencia	Número de pedidos óptimos a realizar por año	Frecuencia entre pedidos óptimos a realizar por año, en meses	
1	H-701	40.89%	A	0.00040%	\$ 768.00	4158	\$ 99,997.00	3996	1.04	12	5198
2	C-504	58.67%	A	0.00046%	\$ 768.00	2058	\$ 87,909.00	2811	0.73	16	2572
3	I-209	68.62%	A	0.00088%	\$ 768.00	2216	\$ 45,678.00	2917	0.76	16	2769
4	J-629	75%	A	0.00130%	\$ 768.00	2095	\$ 30,868.00	2836	0.74	16	2619
5	D-321	79.40%	B	0.00188%	\$ 768.00	2110	\$ 21,274.00	2847	0.74	16	1583
6	F-298	82.64%	B	0.00187%	\$ 768.00	1543	\$ 21,378.00	2434	0.63	19	1157
7	F-320	85.12%	B	0.00300%	\$ 768.00	1893	\$ 13,340.00	2696	0.70	17	1420
8	H-876	87.09%	B	0.00300%	\$ 768.00	1497	\$ 13,337.00	2397	0.62	19	1123
9	D-343	88.68%	B	0.00385%	\$ 768.00	1556	\$ 10,398.00	2444	0.64	19	1167
10	F-299	89.99%	B	0.00312%	\$ 768.00	1043	\$ 12,820.00	2001	0.52	23	782
11	A-219	91.10%	B	0.00440%	\$ 768.00	1237	\$ 9,089.00	2179	0.57	21	927
12	A-789	92.04%	B	0.00500%	\$ 768.00	1197	\$ 8,000.00	2144	0.56	21	898
13	G-564	92.85%	B	0.00597%	\$ 768.00	1232	\$ 6,704.00	2175	0.57	21	924
14	L-342	93.56%	B	0.00048%	\$ 768.00	86	\$ 83,432.00	576	0.15	80	65
15	L099	94.18%	C	0.00059%	\$ 768.00	93	\$ 67,898.00	598	0.16	77	33
16	J-702	94.73%	C	0.00130%	\$ 768.00	182	\$ 30,868.00	835	0.22	55	64
17	D-390	95.22%	C	0.01746%	\$ 768.00	2183	\$ 2,291.00	2895	0.75	16	764
18	Z-090	95.67%	C	0.03053%	\$ 768.00	3427	\$ 1,310.00	3628	0.94	13	1200

(Continuación)

GRÁFICO 20.18

19	Y-098	96.06%	C	0.03231%	\$ 768.00	3273	\$ 1,238.00	3545	0.92	13	1146
20	U-897	96.43%	C	0.03518%	\$ 768.00	3233	\$ 1,137.00	3524	0.92	13	1132
21	N-490	96.75%	C	0.03846%	\$ 768.00	3221	\$ 1,040.00	3517	0.92	13	1127
22	N-672	97.06%	C	0.04090%	\$ 768.00	3134	\$ 978.00	3469	0.90	13	1097
23	W-002	97.33%	C	0.03690%	\$ 768.00	2597	\$ 1,084.00	3158	0.82	15	909
24	L-090	97.59%	C	0.00457%	\$ 768.00	297	\$ 8,749.00	1067	0.28	43	104
25	M-108	97.82%	C	0.06279%	\$ 768.00	3767	\$ 637.00	3803	0.99	12	1318
26	R-987	98.04%	C	0.07130%	\$ 768.00	3967	\$ 561.00	3903	1.02	12	1388
27	R-783	98.25%	C	0.07246%	\$ 768.00	3749	\$ 552.00	3794	0.99	12	1312
28	S-785	98.44%	C	0.10471%	\$ 768.00	5050	\$ 382.00	4404	1.15	10	1768
29	G-239	98.61%	C	0.00157%	\$ 768.00	71	\$ 25,424.00	522	0.14	88	25
30	J-321	98.78%	C	0.00086%	\$ 768.00	36	\$ 46,375.00	374	0.10	123	13
31	T-190	98.94%	C	0.12085%	\$ 768.00	4788	\$ 331.00	4288	1.12	11	1676
32	M-063	99.08%	C	0.00876%	\$ 768.00	327	\$ 4,564.00	1120	0.29	41	114
33	L-786	99.22%	C	0.00736%	\$ 768.00	258	\$ 5,435.00	996	0.26	46	90
34	Z-232	99.35%	C	0.17316%	\$ 768.00	5736	\$ 231.00	4693	1.22	10	2008
35	Y-789	99.47%	C	0.22857%	\$ 768.00	7157	\$ 175.00	5242	1.37	9	2505
36	D-395	99.59%	C	0.01166%	\$ 768.00	345	\$ 3,432.00	1152	0.30	40	121
37	K-982	99.70%	C	0.17241%	\$ 768.00	4846	\$ 232.00	4314	1.12	11	1696
38	K-920	99.81%	C	0.40816%	\$ 768.00	10891	\$ 98.00	6467	1.68	7	3812
39	W-098	99.91%	C	5.00000%	\$ 768.00	126832	\$ 8.00	22069	5.75	2	44391
40	O-786	100.00%	C	40.00000%	\$ 768.00	965805	\$ 1.00	60899	15.86	1	338032
Nuevo A para 10 & 75 vale 3.85%											

La estimación de la cantidad óptima de pedido en las referencias *Push* se realiza aplicando la siguiente fórmula, que optimiza los costos de almacenamiento y manejo del inventario.

ECUACIÓN 20.4 Cantidad óptima por pedir, con el mínimo costo para reponer inventarios - EOQ¹¹.

Costo total de pedir = $\frac{D}{Q} * S - \frac{I * C * Q}{2}$

Donde:

TC = Costo total pertinente anual en unidades monetarias (um).

Q = Tamaño del pedido por realizar para reponer el inventario deseado, de la referencia requerida.

D = Demanda anual del artículo en reposición, el cual sucede a una tasa promedio conocida, o que se puede pronosticar con series temporales.

S = Costo de adquirir, es decir, es el costo de lanzar un pedido, en unidades monetarias por pedido.

11 EOQ, cantidad óptima mínima por pedir.

$C =$ Costo de una unidad del artículo en estudio; también se puede definir como el valor de una unidad de la referencia en reposición, en unidades monetarias por artículo.

$I =$ Costo del manejo de la referencia en las bodegas o almacenes; se define normalmente como un porcentaje del valor del artículo, y se trabaja en porcentaje costo por año.

$D/Q =$ Número de veces que se colocan pedidos de esa referencia en un año.

$Q/2 =$ Cantidad promedio del inventario disponible de la referencia en reposición.

Si se deriva la expresión anterior $Q/2$ contra el costo, buscando optimizar el valor para determinar la cantidad óptima Q^* por pedir, se encuentra matemáticamente la expresión:

$$\text{Pedido óptimo con el mínimo costo} = Q^* = \sqrt{\frac{2 * D * S}{I * C}},$$

$$\text{El número óptimo de pedidos por año es } N = \frac{D}{Q^*} \text{ y}$$

$$\text{El tiempo óptimo de pedidos es } T^* = \frac{Q^*}{D}, \text{ dado en unidades de tiempo de años (Ballou, 2004)}$$

Ayuda en la

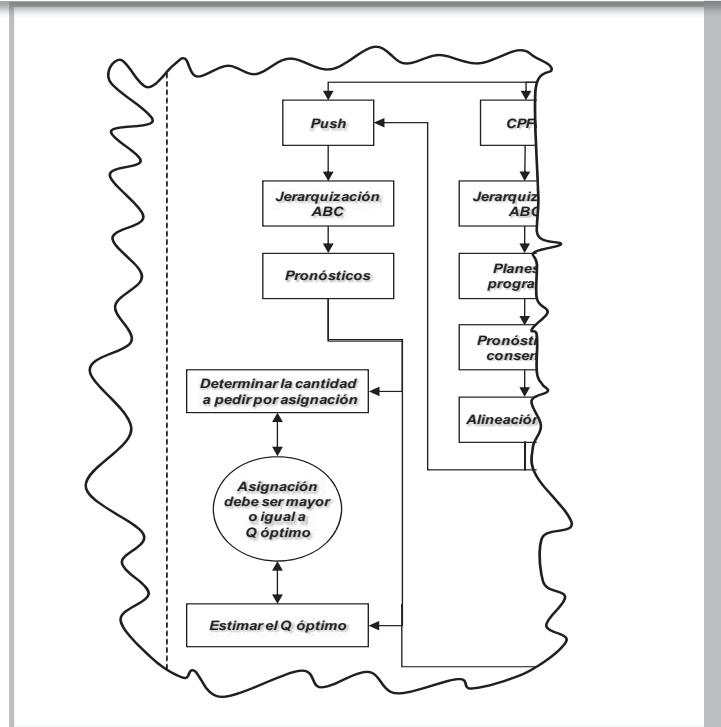


Cálculos
Asignación & EOQ
Push

Para realizar su propio ejercicio puede utilizar la ayuda de la plantilla Excel, que se encuentra la Web bajo el nombre de *Programa – Cálculos Asignación & EOQ Push*.

Pedir en *Push* el máximo de asignación versus EOQ.

GRÁFICO 20.19



Es importante resaltar nuevamente que en los *Push*, en cada referencia, para determinar la cantidad por pedir periódicamente¹², se debe tomar la cifra mayor entre lo que se calcula por el método de asignación y el del *EOQ*, lo cual garantiza que el volumen que se pida siempre es igual o mayor al óptimo del *EOQ*.

En los *Pull* sólo se pide en el momento en que el nivel del inventario se acerca o es igual al nivel de reposición *ROP*, que difiere para los productos o repuestos, tipos A, B y/o C (éstos son de más baja rotación e importancia). También conviene destacar que en los *Pull* la cantidad que se pide es la resultante del cálculo por el método *EOQ*.

20.8.2 Pull

El siguiente paso en los artículos *Pull* es determinar el tipo de reaprovisionamiento que se va a utilizar, para así establecer las cantidades por pedir y los tiempos en que se deben realizar los pedidos



Es importante resaltar que en los *Push*, para determinar la cantidad por pedir periódicamente, se debe tomar la cifra mayor entre lo que se calcula por el método de asignación y el del *EOQ*, lo cual garantiza que el volumen que se pida siempre es igual o mayor al óptimo del *EOQ*.

¹² Cada mes, cada quince días, etc., en función de los períodos de producción o de mantenimiento.

óptimos. Entre los más relevantes están: modelos de revisión continua y periódica, o para sistemas de justo a tiempo.

La reposición del inventario en los elementos *Pull* establece varias opciones de controlar la gestión o la operación de los inventarios, entre la cuales se resaltan:



Los productos *Pull* son normalmente establecidos para aquellas categorías de más baja rotación o de uso muy especial, o para algunas bodegas especiales. Pero, en general, en ellos predomina la política de no tener *stock* del repuesto.

- *Sistema Q*: Se pide una cantidad fija Q en períodos de tiempo variable; es útil para pedidos únicos.
- *Sistema P o T*: Se solicita una cantidad Q variable, con revisión en períodos de tiempo, T , fijos.
- *Sistema R - M (mínimo - máximo)*: El pedido se lanza cuando el inventario al disminuir en el tiempo con la demanda alcanza un valor predeterminado denominado ROP (nivel de reaprovisionamiento). La cantidad que se pide ($M-q$) es la diferencia entre un máximo preestablecido y la cantidad disponible de ese instante. De esta forma se garantiza que el inventario nunca se debe romper, por debajo del ROP prefijado y calculado.
- *Sistema T - R - M*: Es exactamente igual al anterior R-M, sólo que adiciona revisiones en períodos de tiempos constantes, T . El pedido se lanza cuando se dé alguna de las dos situaciones (ROP o T) primero que la otra, garantizando más aun la estabilidad del inventario.

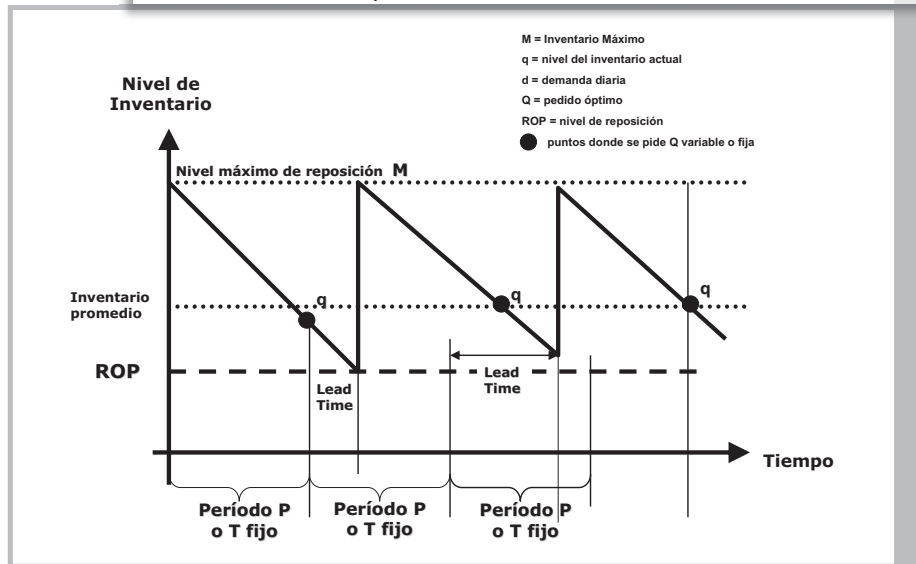
Los productos *Pull* son normalmente establecidos para aquellas categorías de más baja rotación o de uso muy especial, o para algunas bodegas especiales. Pero, en general, en ellos predomina la política de no tener *stock* del repuesto y sólo se piden cuando mantenimiento o producción los requiere a compras o a almacén de insumos o repuestos.

El sistema Q , con reabastecimiento instantáneo o no, es denominado de control básico y los demás P o T , $R - M$ y $R-M-T$ ¹³ son conocidos como de control avanzado de inventarios por demanda en *Pull* (Ballou, 2004).

¹³ $R-M$ se refiere a un inventario que se debe mover entre un mínimo del ROP o nivel de reaprovisionamiento y la M , por un tope máximo. $R-M-T$ es el mismo $R-M$, pero tiene un componente adicional que consiste en revisiones periódicas del nivel del inventario en un tiempo T .

Parámetros relevantes en reposición Pull.

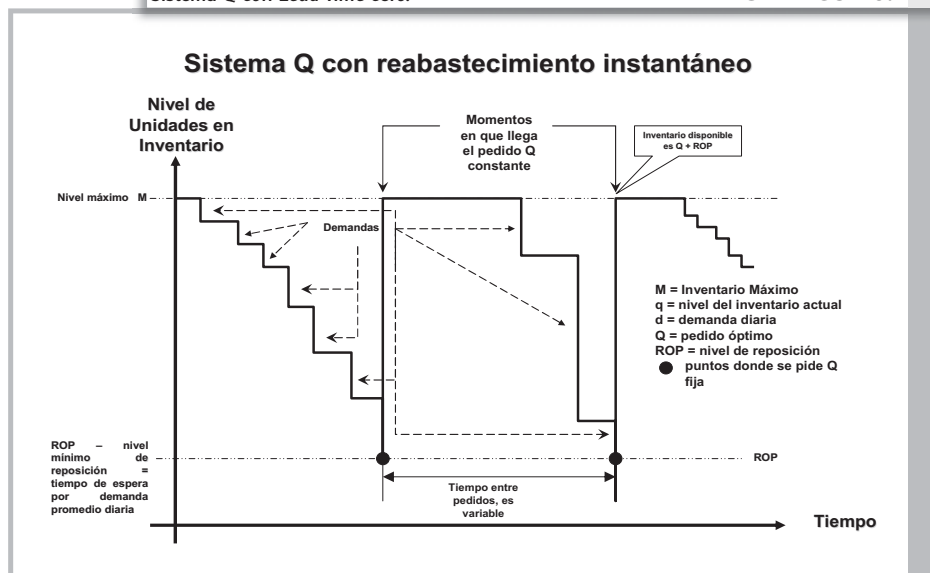
GRÁFICO 20.20



El sistema Q con reabastecimiento instantáneo funciona en forma normal bajo la premisa de reposición inmediata, con *Lead Time*¹⁴ cero.

Sistema Q con *Lead Time* cero.

GRÁFICO 20.21

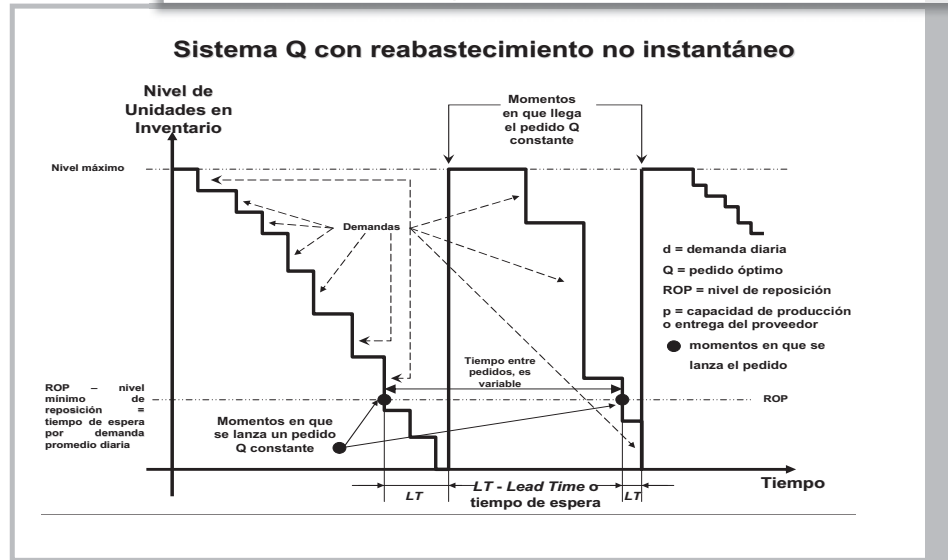


14 *Lead Time*, tiempo de espera entre el instante que se pide y el momento en que llega el pedido a mantenimiento.

En el sistema Q^{15} con reabastecimiento instantáneo el Q^* óptimo se realiza a partir de la fórmula definida en la Ecuación 20.4 - Cantidad óptima por pedir, con el mínimo costo para reponer inventarios - EOQ.

Sistema Q en Pull con Lead Time positivo.

GRÁFICO 20.22



Cuando existe un *Lead Time* positivo, o sea que la reposición no es inmediata, se estima el pedido óptimo igual que el anterior pero multiplicándolo por un factor de corrección.

ECUACIÓN 20.5 - Pedido óptimo con reposición no inmediata.

$$\text{Pedido óptimo con mínimo costo} = Q^* = \sqrt{\frac{2 * D * S}{I * C}} * \sqrt{\frac{p}{p - d}},$$

Donde:

p es la capacidad de producción o de entrega diaria del fabricante o proveedor y

d es la demanda diaria del repuesto o referencia (Ballou, 2004).

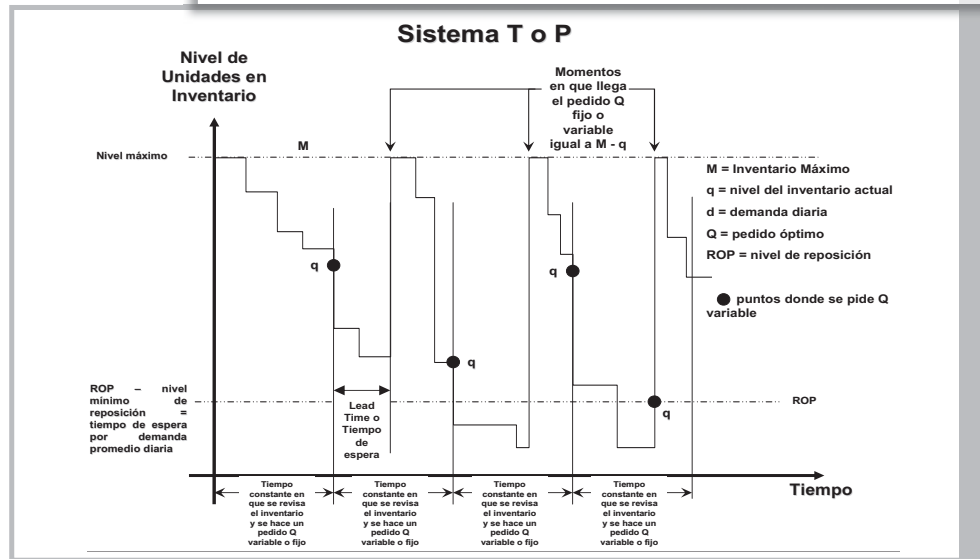


Cuando existe un *Lead Time* positivo, o sea que la reposición no es inmediata, se estima el pedido óptimo igual que el anterior, pero multiplicándolo por un factor de corrección.

15 *Quantity*, cantidad por pedir, fabricar o usar.

Sistema T o P en Pull.

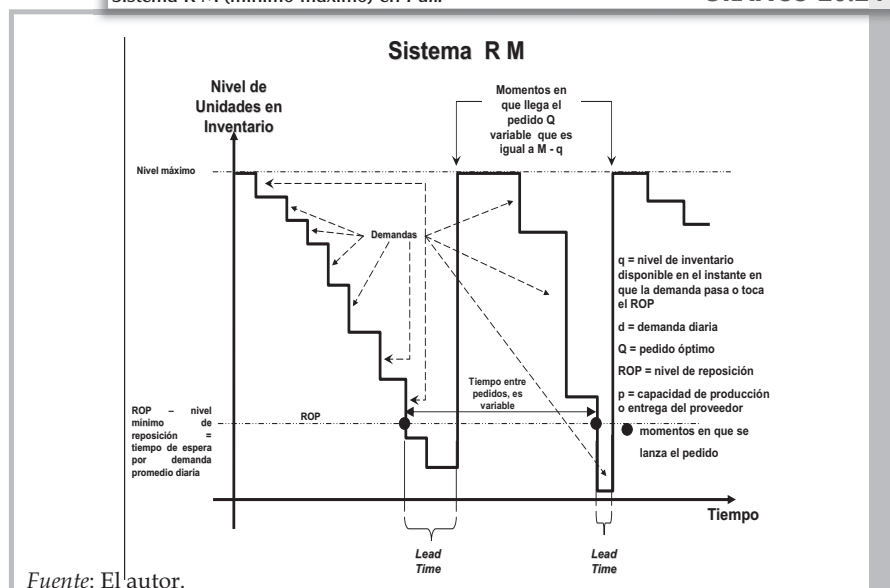
GRÁFICO 20.23



Los sistemas Q y $T-P$ entrañan riesgo y no son muy seguros. En el Q es posible que la demanda no repita en los volúmenes establecidos y puede generar remanente. Y el $T-P$ tiene la incertidumbre de que el inventario se rompa o alcance su valor cero antes de que se cumpla el período de revisión constante; por eso son más seguros y confiables los sistemas $R-M$ y $T-R-M$.

Sistema R-M (mínimo-máximo) en Pull.

GRÁFICO 20.24



► ECUACIÓN 70 - Estimación del nivel máximo M de inventarios de Pull

$$M = \text{Nivel máximo de inventario} = ROP + Q^* - DE, \text{ con} \\ ROP = d * LT + z * S'_d + DE$$

Donde:

d = demanda diaria promedio en unidades

$LT = \text{Lead Time} = \text{Tiempo de entrega (o de espera)}$

La Z se obtiene de la distribución normal para una probabilidad dada

$$S'_d = S_d * \sqrt{LT}$$

DE = Déficit esperado en el peor de los eventos, en unidades

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 * D * S}{I * C}} = \text{pedido óptimo al minimizar costos de pedir y almacenar}$$

En síntesis, al reemplazar todo en una sola expresión, queda así:

$$M = d * LT + z * S_d * \sqrt{LT} + DE + Q^* - DE$$

Al eliminar las DE , se convierte en

$$M = d * LT + z * S_d * \sqrt{LT} + Q^* = \text{Inventario máximo a mantener}$$

Los elementos de cálculo se deben revisar periódicamente (Ballou, 2004).

EJEMPLO 20.4

Cálculo de M, nivel máximo de inventarios en Pull

La referencia Pull J-980, tiene una demanda promedio diaria de $D=365$ unidades por año, con una desviación estándar de $S_d = 9$ artículos. El proveedor vende al almacén de repuestos a razón de \$34 unidades monetarias cada unidad. El valor de realizar un pedido por parte del almacén es de \$ 8,56 unidades monetarias. El costo de manejo anual de la referencia es el 23% y el *lead time* del proveedor es de $LT = 8$ días calendario. Se desea que la probabilidad de tener siempre artículos disponibles en inventarios sea como mínimo del 90%. La demanda promedio diaria es de 1 artículo y el máximo déficit esperado DE (o se estima por la desviación estándar histórica de los últimos dieciocho meses) se estima en 2 unidades.

La Z de la distribución normal para una probabilidad del 90% es de 1,2816, con lo cual

$$ROP = 1 * 8 + 1,2816 * 9 + 2 = 21,53 \text{ unidades, como nivel mínimo de inventario.}$$

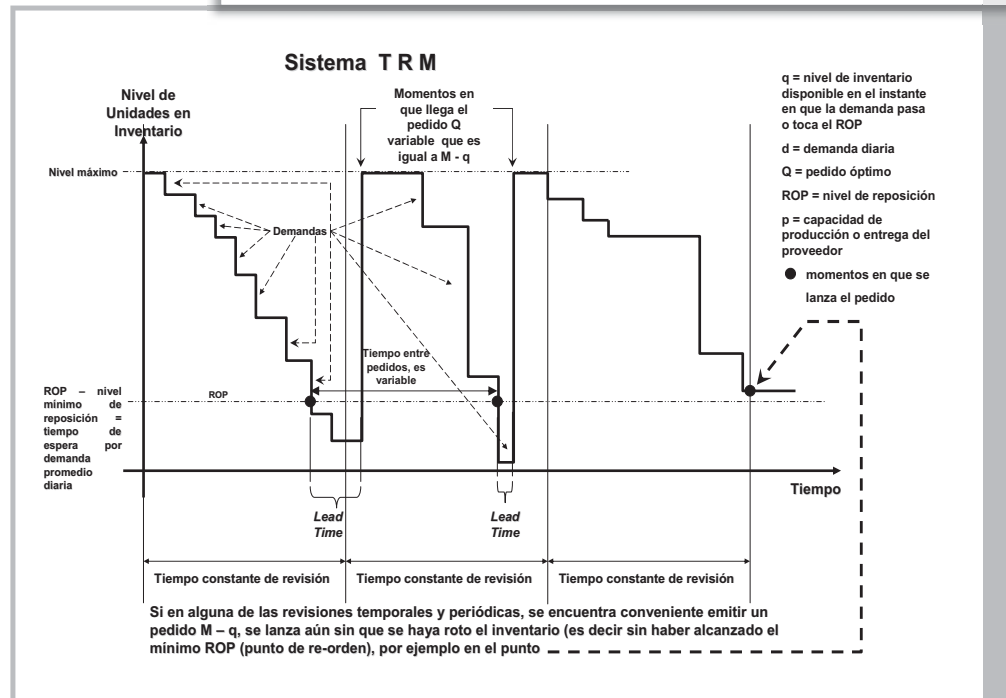
$$Q^* = \sqrt{\frac{2 * D * S}{I * C}} = \sqrt{\frac{2 * 365 * 8,56}{0,23 * 34}} = 28,26 \text{ unidades}$$

$$M = ROP + Q^* - DE = 21,53 + 28,26 - 2 = 47,79 \text{ unidades}$$

De esta forma se puede estimar en cualquier instante el pedido por lanzar, mediante la expresión $M - q$, donde M se calcula con las ecuaciones definidas y q se mide en la realidad el día del pedido. El sistema $T-M$ minimiza la posibilidad de que se rompa el inventario o se agote la referencia, lo cual sólo sucede en el evento en el que la demanda supere el *lead time*. Con el fin de asegurar más la garantía de existencia permanente, se hacen controles de revisión periódicos a tiempos constantes, lo que da lugar al sistema $T-R-M$.

Sistema T-R-M en Pull.

GRÁFICO 20.25



De los conceptos emitidos sobre las referencias tipo *Pull*, se deduce que:

Combinaciones posibles Q de demanda y Q de reposición.

CUADRO 20.14

Comportamiento de la demanda	Cantidad a pedir por reposición
Variable	Fija
Fija	Variable
Variable	Fija
Fija	Variable

Formas Push versus Pull	Períodos de tiempo a pedir	Cantidades a pedir
Push	Fijos	Mayor asignación y EOQ
Pull	Variables en función del ROP	EOQ

Fuente: El autor.

En ocasiones, cuando los repuestos son únicos y no sirven en otros equipos, es importante tener en cuenta que no deben quedar remanentes, porque se desaprovechan y se pierden.

Al utilizar los diferentes sistemas de los artículos *Pull*, se puede recomendar, para repuestos tipo:

- A, utilizar de los sistemas T-R- o T-M.
- B, usar sistemas T M.
- C, manejar los sistemas T o P, o en su reemplazo el Q, según el caso particular.

El proceso *Pull* tiene en cuenta varios parámetros para definir la cantidad Q por pedir y los tiempos de pedido. Entre ellos sobresalen:

- El costo de salvamento de los excedentes (dado que en *Pull* sólo se pide cuando existe una demanda y dado que los artículos son muy específicos y no son genéricos y, por tanto, inutilizables en otros equipos, lo más seguro es que haya remanentes, lo que eventualmente puede generar el excedente) y
- El *Lead Time* o tiempo de espera entre el momento de pedir y recibir el pedido del proveedor.

En ocasiones, cuando los repuestos son únicos y no sirven en otros equipos, es importante tener en cuenta que no deben quedar remanentes, porque se desaprovechan y se pierden. En este caso, para dicha estimación, la cual garantiza que con la utilidad de los repuestos usados, los que no se utilicen quedan salvados económicamente con la anterior ganancia, para estimar la cantidad por pedir se deben tener en cuenta las siguientes expresiones:

ECUACIÓN 20.7 - Estimadores de cantidades únicas especiales en *Pull*.

$$\text{Cantidad única a pedir} = Q^* = P + Z * S_d,$$

Donde:

P = Pronóstico calculado de demanda total

S_d = Desviación estándar de lo hasta ahora demandado

$$\text{Probabilidad} = \frac{\text{Utilidad unitaria}}{\text{Utilidad unitaria} + \text{Pérdida unitaria}}$$

Utilidad unitaria = Venta (o costo total) - Precio unitario de adquisición

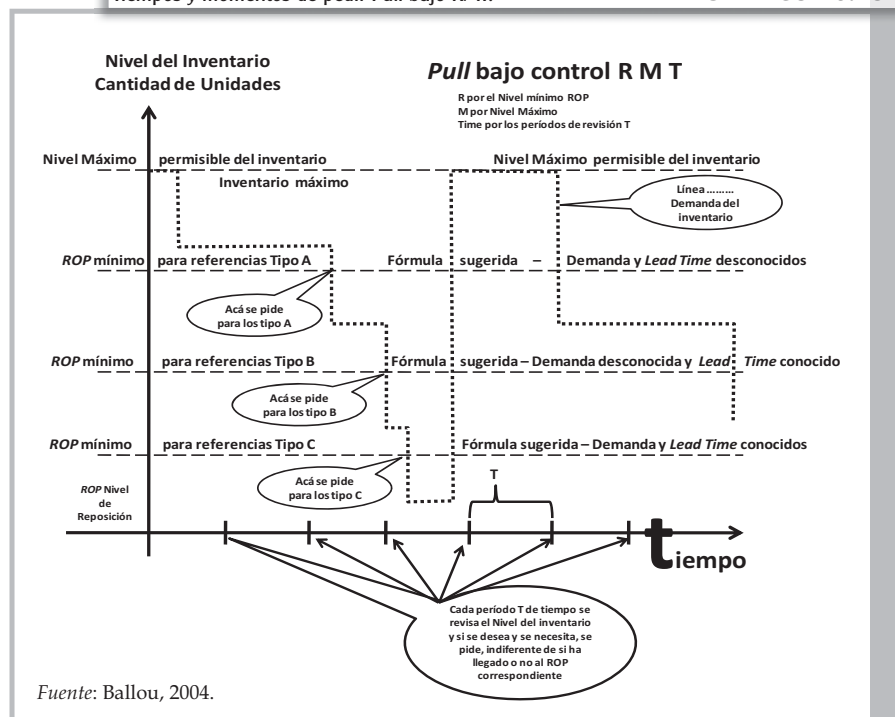
Pérdida unitaria = Precio adquisición unitario del proveedor - Costo de Salvamento

Una vez calculada la Probabilidad se encuentra Z en la tabla pertinente de Distribución normal.

Costo de Salvamento es el precio a que se puede vender o reducir el artículo, para lograr recuperar la inversión o minimizar pérdidas (Ballou, 2004).

Tiempos y momentos de pedir *Pull* bajo RMT.

GRÁFICO 20.26



► ECUACIÓN 20.8 - ROP - Tipo C - Demanda y LT conocidos, tiempo de entrega inmediata

$$ROP = \text{demanda promedio (mes)} * \text{Lead Time}$$

► ECUACIÓN 20.9 - ROP - Tipo B - Demanda desconocida y LT conocido

$$ROP = \text{demanda promedio} * \text{Lead Time} + \text{Nivel de Significación } z * \text{Desviación Estándar} * \sqrt{LT}$$

► ECUACIÓN 20.10 - ROP - Tipo A - Demanda y LT desconocidos

$$ROP = \text{demanda promedio} * \text{Lead Time} + \text{Nivel de Significación } z * \text{Desviación Estándar Censurada}$$

$$\text{Desviación Estándar Censurada} = \sqrt{LT * S_d^2 + D^2 * S_{TE}^2}$$

Donde:

TE es el tiempo de espera (*lead time*).

S_d es la desviación estándar de la demanda.

D es demanda por unidad de tiempo.

S_{TE} es la desviación estándar de los diferentes tiempos de espera.

EJEMPLO 20.7

Cantidad óptima para pedidos *Pull* únicos

Una máquina requiere unos amortiguadores especiales que sólo son fabricados por un proveedor en el mundo; el pronóstico de la demanda esperada para el tiempo útil de la máquina es de 34 espirales; el comportamiento de la demanda se asimila a una distribución normal con una desviación estándar de 8 elementos de amortiguación; el precio de adquisición son 12 unidades monetarias; el costo de salvamento se estima en 4 unidades monetarias, y el costo total de adquirirlos es de 37 unidades monetarias (incluye todos los conceptos de compra).

$$\text{Utilidad unitaria} = \text{Venta (Costo Total)} - \text{Precio unitario de adquisición del proveedor} = 13 - 12 = 25 \text{ u.m}$$

$$\text{Pérdida unitaria} = \text{Precio de adquisición unitario del proveedor} - \text{Costo de Salvamento} = 12 - 4 = 8 \text{ u.m}$$

$$Probabilidad = \frac{Utilidad}{Utilidad + P\acute{e}rdida} = \frac{25}{25 - 8} = 75.75\%, \text{ lo que implica una } Z \text{ de la distribuci3n normal de } 0,6983$$

Cantidad 3nica a pedir = *Q** = Pron3stico de la demanda total + *Z** *S_d* = 34 + 0,6983*8 = 39,58 amortiguadores para toda la existencia de la m3quina

Fuente: El autor.

De esta forma se optimiza la compra del repuesto requerido, en el evento de que quedasen algunos remanentes.

Cantidades 3ptimas por pedir en Pull.

CUADRO 20.15

Tipo	3tem #	Referencia	Demanda Promedio Mes en unidades monetarias	Costo total de adquisici3n del proveedor	Demanda Promedio Mes en unidades	d - Demanda Promedio d3a en unidades	Demanda Promedio Anuales en unidades monetarias	Inventario referencia final mes anterior	Demanda periodo anterior	Pron3stico de Demanda anterior	Error periodo anterior - Demnads menos Pron3sticos
PULL	1	GHJ-980	\$ 3,415,070.00	\$ 33,428.00	102	5.11	\$ 40,980,840	0	1000	345	655
PULL	2	GFJ-980	\$ 1,722,720.00	\$ 6,724.00	256	12.81	\$ 92,734,663	240	24	567	-543
PULL	3	LKJ-567	\$ 1,543,950.00	\$ 19,783.00	78	3.90	\$ 86,746,500	123	678	345	333
PULL	4	MVC-342	\$ 1,125,109.25	\$ 760.00	1480	74.02	\$ 84,267,663	2	567	897	-330
PULL	5	CVD-904	\$ 928,110.00	\$ 4,345.00	214	10.68	\$ 81,054,368	123	345	567	-222
PULL	6	AKJ-093	\$ 809,030.00	\$ 10,727.00	75	3.77	\$ 78,284,975	567	345	234	111
PULL	7	JUS-435	\$ 664,099.70	\$ 3,922.00	169	8.47	\$ 72,422,056	324	567	492	75
PULL	8	REM-982	\$ 531,618.75	\$ 9,960.00	53	2.67	\$ 63,790,664	539	3456	492	2964
PULL	9	WOC-327	\$ 510,030.00	\$ 2,322.00	158	7.89	\$ 63,375,129	640	345	492	-147
PULL	10	LKM-786	\$ 3,234,444.00	\$ 12,756.00	254	12.68	\$ 61,662,757	816	123	492	-369
PULL	11	NAO-983	\$ 361,622.40	\$ 33,243.00	11	0.54	\$ 60,640,031	345	876	492	384
PULL	12	HJS-381	\$ 360,720.00	\$ 323.00	1117	55.84	\$ 60,180,797	234	123	492	-369
PULL	13	GVS-789	\$ 210,898.85	\$ 22,370.00	9	0.47	\$ 60,073,241	123	678	492	186
PULL	14	WRQ-392	\$ 203,470.00	\$ 123.00	1654	82.71	\$ 58,977,052	232	567	492	75
PULL	15	ESR-783	\$ 82,545.20	\$ 1,435.00	58	2.88	\$ 58,709,710	123	345	492	-147
PULL	16	DPE-132	\$ 82,479.00	\$ 213.00	387	19.36	\$ 55,094,992	567	345	491	-146
PULL	17	WOP-439	\$ 68,650.20	\$ 2,325.00	30	1.48	\$ 54,302,860	324	567	491	76
PULL	18	HSO-782	\$ 51,618.00	\$ 4,534.00	11	0.57	\$ 52,036,536	539	3456	491	2965
PULL	19	ZSQ-327	\$ 42,080.40	\$ 2,134.00	20	0.99	\$ 51,970,300	640	345	491	-146
PULL	20	XQR-324	\$ 35,067.00	\$ 8,155.00	4	0.22	\$ 51,538,871	816	123	491	-368

3tem #	Referencia	Lead Time m3s alto de los diferentes proveedores, en d3as calendario	D3ficit m3ximo esperado y permitido	Disponibilidad deseada m3nima	Z de la distribuci3n normal para probabilidad anterior	Desviaci3n Est3ndar de la demanda - <i>S_d</i>	ROP - Inventario m3nimo a mantener	ROP - Inventario m3nimo a mantener con stock de seguridad adicional 15 d3as de demanda	Inventario m3ximo a mantener
1	GHJ-980	24	8	65.00%	0.39	98	123	199	2330
2	GFJ-980	1	11	55.00%	0.13	246	13	205	3480
3	LKJ-567	27	20	97.00%	1.88	75	105	164	2143
4	MVC-342	2	18	85.00%	1.04	1421	148	1258	9880
5	CVD-904	5	7	58.00%	0.20	205	53	214	3232
6	AKJ-093	35	10	64.00%	0.36	72	132	189	2022
7	JUS-435	16	8	63.00%	0.33	163	135	262	2983
8	REM-982	19	8	64.00%	0.36	51	51	91	1637
9	WOC-327	35	4	84.00%	0.99	151	276	395	3123
10	LKM-786	40	17	97.00%	1.88	243	507	697	4383
11	NAO-983	15	2	69.00%	0.50	10	8	16	721
12	HJS-381	6	19	84.00%	0.99	1072	335	1173	8575
13	GVS-789	28	2	77.00%	0.74	9	13	20	679
14	WRQ-392	3	25	84.00%	0.99	1588	248	1489	10558
15	ESR-783	44	0	71.00%	0.55	55	127	170	1785
16	DPE-132	21	3	97.00%	1.88	372	407	697	5330
17	WOP-439	41	1	55.00%	0.13	28	61	83	1231
18	HSO-782	0	21	63.00%	0.33	11	0	9	728
19	ZSQ-327	24	5	99.00%	2.33	19	24	38	1021
20	XQR-324	18	1	62.00%	0.31	4	4	7	450

Demanda diaria X Lead Time	(Demanda diaria + 15) X Lead Time	M = ROP + <i>Q*</i> - DE

(Continuación) **CUADRO 20.15**

Ítem #	Referencia	Demanda Promedio Mes en unidades monetarias	Costo total de adquisición del proveedor	I Costo de Manejo y Almacenamiento por unidad en porcentaje del costo	S Costo Unitario de reponer por pedido	D Demanda promedio año a partir de la última demanda y el pronóstico próximo período	C Costo	Q* Cantidad a pedir (pedido óptimo por costo) en unidades de la referencia
1	GHJ-980	\$ 3,415,070.00	\$ 33,428.00	0.00120%	\$ 768.00	1226	\$ 33,428.00	2170
2	GFJ-980	\$ 1,722,720.00	\$ 6,724.00	0.00959%	\$ 768.00	3074	\$ 6,724.00	3436
3	LKJ-567	\$ 1,543,950.00	\$ 19,783.00	0.00202%	\$ 768.00	937	\$ 19,783.00	1896
4	MVC-342	\$ 1,125,109.25	\$ 760.00	0.05263%	\$ 768.00	17765	\$ 760.00	8259
5	CVD-904	\$ 928,110.00	\$ 4,345.00	0.00921%	\$ 768.00	2563	\$ 4,345.00	3137
6	AKJ-093	\$ 809,030.00	\$ 10,727.00	0.00373%	\$ 768.00	905	\$ 10,727.00	1864
7	JUS-435	\$ 664,099.70	\$ 3,922.00	0.01020%	\$ 768.00	2032	\$ 3,922.00	2793
8	REM-982	\$ 531,618.75	\$ 9,960.00	0.00402%	\$ 768.00	641	\$ 9,960.00	1568
9	WOC-327	\$ 510,030.00	\$ 3,232.00	0.01238%	\$ 768.00	1894	\$ 3,232.00	2697
10	LKM-786	\$ 3,234,444.00	\$ 12,756.00	0.00314%	\$ 768.00	3043	\$ 12,756.00	3418
11	NAO-983	\$ 361,622.40	\$ 33,243.00	0.00120%	\$ 768.00	131	\$ 33,243.00	708
12	HJS-381	\$ 360,720.00	\$ 323.00	0.12384%	\$ 768.00	13401	\$ 323.00	7174
13	GVS-789	\$ 210,898.85	\$ 22,370.00	0.00179%	\$ 768.00	113	\$ 22,370.00	659
14	WRQ-392	\$ 203,470.00	\$ 123.00	0.32520%	\$ 768.00	19851	\$ 123.00	8731
15	ESR-783	\$ 82,545.20	\$ 1,435.00	0.02787%	\$ 768.00	690	\$ 1,435.00	1628
16	DFE-132	\$ 82,479.00	\$ 213.00	0.16779%	\$ 768.00	4647	\$ 213.00	4224
17	WOP-439	\$ 68,650.20	\$ 2,325.00	0.01720%	\$ 768.00	354	\$ 2,325.00	1166
18	HSO-782	\$ 51,618.00	\$ 4,534.00	0.00882%	\$ 768.00	137	\$ 4,534.00	124
19	ZSQ-327	\$ 42,080.40	\$ 2,134.00	0.01874%	\$ 768.00	237	\$ 2,134.00	953
20	XQR-324	\$ 35,067.00	\$ 8,155.00	0.00490%	\$ 768.00	52	\$ 8,155.00	445
								$Q^* = \sqrt{\frac{2 * D * S}{I * C}}$

Ayuda en la



Cantidades Pull
Inventarios
automáticos
de 10.000
referencias
Push o en Pull.

Se puede usar la ilustración anterior como plantilla para aplicaciones tipo *Pull*, que se encuentra en la Web bajo el nombre de *Programa – Cantidades Pull*.

En todos los casos enunciados sobre definición y cálculo de la demanda o estimado, debe hacerse con la metodología de pronósticos (*Forecast*) bajo el uso de series temporales con Modelos AR.I.MA. y clásicos (casos particulares de los modernos o AR.I.MA.). (Ver *Programa - Inventarios automáticos de 10.000 Referencias Push o en Pull*).

20.9 SUBCONTRATACIÓN



La subcontratación de personas o entidades, para realizar actividades de gestión u operación de mantenimiento, es una opción siempre latente en las empresas, y es una buena decisión siempre y cuando se utilicen conceptos y metodologías de aceptación universal.

Utilizar otras personas o entidades, para realizar actividades de gestión u operación de mantenimiento, es una opción siempre latente en las organizaciones y es una buena decisión, siempre y cuando se utilicen conceptos y metodologías de aceptación universal.

La clasificación de herramienta avanzada de mantenimiento se basa en utilizar dos conceptos fundamentales: la agregación de valor por parte del proveedor subcontratado y el análisis profundo de las actividades o procesos que se delegan bajo una metodología de elementos indiferenciados (o no), con mapas arquitectónicos estratégicos que permiten seleccionar de una manera técnico-económica las mejores alternativas.

Las industrias consideran la posibilidad de subcontratación de actividades reales o intelectuales inherentes a mantenimiento con

recursos de terceros, en lugar de utilizar recursos de la compañía. El desligar funciones de mantenimiento sirve en ocasiones como una excelente gestión para atender los picos de demanda, como también permite la flexibilización del mantenimiento en la empresa (Brewster, 1997).

La subcontratación está supeditada a una serie de criterios que la vuelven atractiva y adecuada. Dentro de estos criterios se resaltan:

- Precio
- Calidad
- Tiempos de entrega
- Secuencia histórica
- Elementos indiferenciados¹⁶
- Cultura interior
- Recursos y talento humano
- Ingeniería
- Control de gestión
- Tercerización intelectual.

La decisión de subcontratar a otras empresas de servicio no puede basarse sólo en el precio, pues son innumerables los factores que inciden de una forma estratégica en la subcontratación y que hacen de ésta una alternativa atractiva cuando se realiza en forma adecuada.

La subcontratación es una elección interesante cuando realmente contribuye en costos, tiempos, valor agregado (para el cliente interno o externo). En oportunidad, facilitación de actividades no diferenciadas de la empresa y en tecnología al mejor desempeño de las organizaciones, al procurar evitar actividades que no le aportan valor agregado alguno a los productos o servicios prestados, o simplemente cuando hay entidades más competitivas que lo hacen mejor.

La idea clásica de que sólo se deben subcontratar actividades o servicios de mantenimiento indiferenciados (es decir, que no afectan las funciones ni los procesos primarios de la empresa) está en revisión, porque genera mucho desgaste en la gestión interna de las organizaciones. En la actualidad las empresas líderes en el mundo subcontratan productos esenciales o medianamente indiferenciados.

Con el fin de aplicar la metodología de análisis de subcontratación basada en elementos indiferenciados o no, y mapas estratégicos se hace necesario definir los equipos, sistemas y subsistemas estratégicos de la operación, la generación, la transmisión o la distribución que se realizan.



La decisión de subcontratar a otras empresas de servicio no puede basarse sólo en el precio, pues son innumerables los factores que inciden de una forma estratégica en la subcontratación y que hace de ésta una alternativa atractiva cuando se realiza en forma adecuada.

La subcontratación es una elección interesante cuando realmente contribuye en costos, tiempos, valor agregado (para el cliente interno o externo), oportunidad, facilitación de actividades no diferenciadas de la empresa y en tecnología.

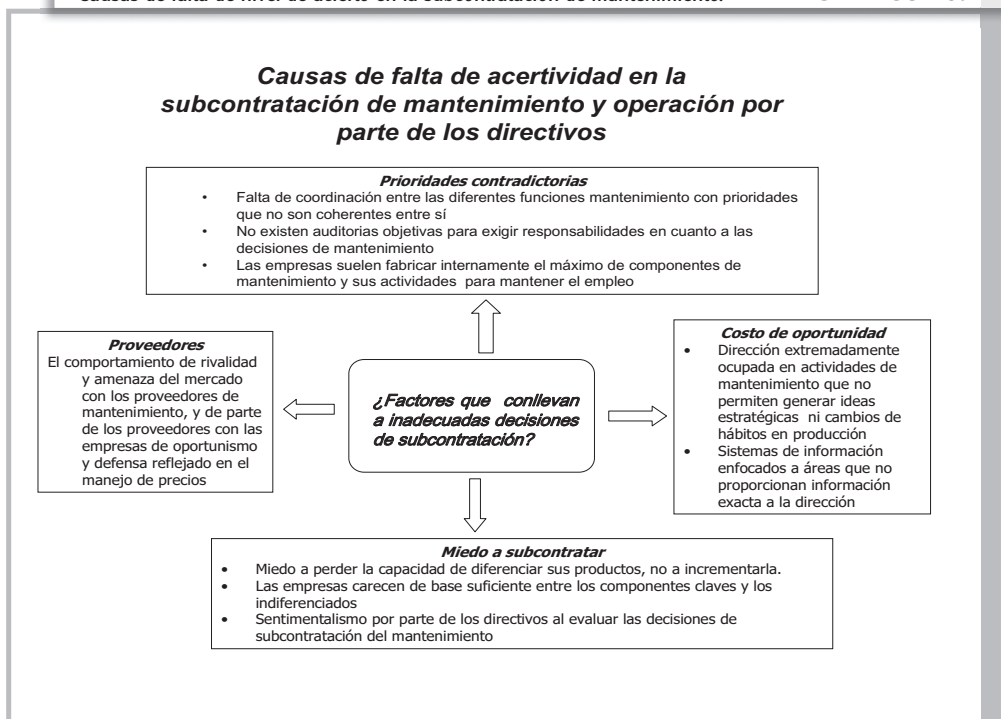
La idea clásica de que sólo se deben subcontratar servicios de mantenimiento indiferenciados (es decir, que no afectan las funciones ni los procesos primarios de la empresa) está en revisión, porque genera mucho desgaste en la gestión interna de las organizaciones.

¹⁶ Indiferenciados son aquellos servicios, productos o procesos que no son esenciales en la misión de la empresa y que no aportan valor agregado adicional o significativo.

Esto implica profundos análisis del sistema y de cada uno de los componentes de la estructura de mantenimiento, de la metodología de producción y de la arquitectura de operación que se manejan en la empresa. De aquí y de la diferenciación (o ventaja competitiva) que se quiere mantener ante el cliente y la sociedad, se derivan entonces los trabajos y elementos susceptibles de delegar a proveedores en mantenimiento.

Causas de falta de nivel de acierto en la subcontratación de mantenimiento.

GRÁFICO 20.27



Conceptos de arquitectura estratégica en servicios de mantenimiento.

CUADRO 20.16

Conocimiento Arquitectónico del proveedor de mantenimiento

Es la capacidad de captar las exigencias y necesidades del cliente en mantenimiento, y de forma muy detallada y especializada, reproducirlas o traducirlas al lenguaje de las especificaciones en cuanto a prestaciones del subsistema.

¿Cuándo un Subsistema es Estratégico? lo es, cuando tiene las siguientes características:

1. Atributos destacados del servicio de mantenimiento de acuerdo a la percepción del cliente
2. Capacidad de producción y diseños altamente especializados
3. Liderazgo tecnológico en bienes y servicios de mantenimiento
4. Comparación de las capacidades del proveedor en cuanto a diseño y producción con respecto a la empresa
5. Análisis de nivelación con los mejores proveedores

Fuente: El autor.

La selección de los equipos clave y de sus componentes estratégicos se realiza con un grupo de análisis amplio, con suficiente representación tanto horizontal como vertical de la empresa. Una vez se constituyen los mapas estratégicos de unidades y elementos diferenciados o no, se procede a establecer los procesos de decisión para la subcontratación de servicios de mantenimiento, mediante un proceso adecuado de selección, entrenamiento, evaluación y monitoreo de proveedores.

El concepto fundamental para terciar o subcontratar es el grado de indiferenciación, y este, a su vez, se basa en el nivel tecnológico del bien o servicio de mantenimiento por subcontratar. Para ello es necesario definir y entender los mapas estratégicos tecnológicos del área en particular de la empresa, su nivel, su atractivo y su influencia en el producto final.

Es recomendable subcontratar cuando el proveedor es bien calificado y su tecnología es madura, básica y masiva, características que generan independencia y calidad. También es recomendable la delegación cuando en mantenimiento se han perdido ventajas competitivas, o calidad o el precio se ha incrementado rotundamente; de ahí la ventaja de trabajar *LCC* en tiempo real.

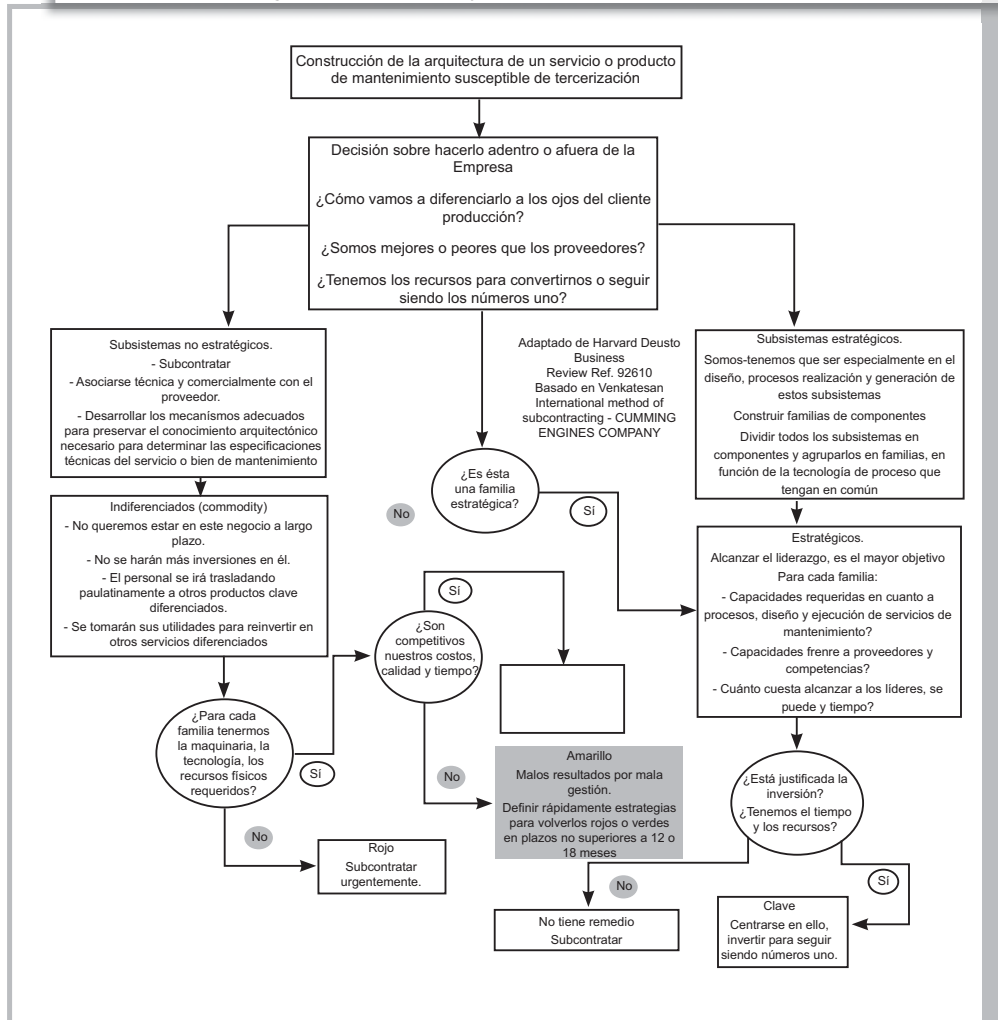


La selección de los equipos clave y de sus componentes estratégicos se realiza con un grupo de análisis amplio, con suficiente representación tanto horizontal como vertical de la empresa.

Es recomendable subcontratar cuando el proveedor es bien calificado y su tecnología es madura, básica y masiva, características que generan independencia y calidad.

Proceso decisional integral de tercerización bajo enfoque internacional.

GRÁFICO 20.28



20.10 MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO RÁPIDO Y CONFIABLE EN MANTENIMIENTO

Las auditorías, las evaluaciones, los diagnósticos y las mediciones del área de mantenimiento son muy usuales en las empresas medianas y grandes (González, 2004). Su forma de realización no es única ni estandarizada, ya que pueden existir diversas formas, métodos y herramientas para tal fin, todos con sus bondades y limitaciones. Se toman dos de las más usadas y recomendadas, por su gran acierto y facilidad de aplicación:

- Inglesa Flash Audit
- Americana de Método jerárquico analítico de componentes principales - *Eigen Value* y *Eigen Vector*

20.10.1 Flash Audit

Este modelo de diagnóstico utiliza los 12 criterios descritos en el *Gráfico 2.5 - Objetivos del mejoramiento del programa Flash Audit* y áreas que cubre:



Las auditorías, las evaluaciones, los diagnósticos y las mediciones del área de mantenimiento son muy usuales en las empresas medianas y grandes. Su forma de realización no es única ni estandarizada, ya que pueden existir diversas formas, métodos y herramientas para tal fin.

Áreas y tópicos que cubre y diagnostica el Flash Audit.

CUADRO 20.17

Área	Tópico	Número de preguntas por tópico	Número de preguntas por área	Porcentaje de preguntas que cubre
0 - Estado de la relación entre las áreas de mantenimiento y producción	a) Comunicación y relaciones b) Métodos de intervención c) Percepción del nivel de mantenimiento preventivo d) Medición de la función de mantenimiento por el área de producción	6 9 11 8	34	8.81%
2 - Los niveles superiores como observan a mantenimiento	a) Posición de mantenimiento en la estructura y organigrama de la empresa b) Ubicación del recurso humano y su mano de obra dentro de la empresa c) Opinión sobre mantenimiento d) Importancia que se da a los recursos financieros	9 7 8 7	31	8.03%
3 - Percepción interna y propia de mantenimiento	a) Importancia que se da a la organización en mantenimiento b) Manejo, gestión y análisis de datos y registros en mantenimiento c) Mantenimiento preventivo	10 8 8	26	6.74%
4 - Grado de disponibilidad de equipos	a) Sistema de registro e información histórica de mantenimiento y operación de equipos b) Análisis y utilización de los datos de información y registros históricos	12 10	22	5.70%
5 - Conocimiento de los costos de mantenimiento.	a) Registro, análisis y utilización de los costos históricos de mantenimiento b) Análisis de los costos presentes en mantenimiento	13 7	20	5.18%
6 - Métodos y preparación de las tareas de mantenimiento	a) Nivel de preparación de los trabajos de mantenimiento para el área de producción b) Registro histórico de intervenciones y demandas de trabajos de mantenimiento c) Análisis del sistema actual de planeación y preparación de tareas de mantenimiento d) Planeación de los trabajos de mejoras y rediseños de equipos e) Mantenimiento planeado, su planeación y preparación f) Planeación y consecución de repuestos y piezas de recambio g) Manejo de la documentación e información técnica	12 7 10 7 9 10 11	66	17.10%
7 - Planeación de las actividades de mantenimiento	a) Programación de las tareas de mantenimiento b) Cronograma y ejecución de todas las actividades de mantenimiento	13 10	23	5.96%
8 - Manejo y gestión de inventarios.	a) Manejo en general de inventarios de repuestos e insumos de mantenimiento. b) Sistema de información, registro, entradas, salidas, pedidos, stocks, etc. de los repuestos en inventario c) Listado de repuestos d) Gestión y manejo de repuestos e) Compras, pedidos, proveedores, reposición de inventarios, etc. de los repuestos	7 10 18 12 9	56	14.51%
9 - Actividades y roles de los miembros del equipo de mantenimiento	a) En cuanto a mantenimiento b) En relación a la seguridad	21 8	29	7.51%
10 - Manejo de Recursos Humanos en mantenimiento	a) Indicadores, tasas y rendimientos de la mano de obra física e intelectual b) Gestión del recurso humano en mantenimiento y su mano de obra y utilización c) Proporción de mano de obra preventiva, predictiva y correctiva en mantenimiento d) Aspectos de productividad y motivación del personal de mantenimiento	10 9 4 11	34	8.81%
11 - Gestión y manejo de recursos físicos y materiales en mantenimiento	a) Documentación técnica b) Utensilios, equipos y herramientas de mantenimiento c) Infraestructura	10 11 6	27	6.99%
12 - Capacitación y entrenamiento en mantenimiento	a) Importancia del entrenamiento y de la capacitación en mantenimiento	18	18	4.66%

Fuente: El autor.

La metodología de realización consiste en aplicar el instrumento de medida *Flash Audit* a 12 funcionarios de la empresa, distribuidos así: cuatro en mantenimiento, cuatro en producción (u operación) y cuatro personas de los mandos superiores de estas dos áreas o de áreas clave relacionadas con las dos anteriores.

Ayuda en la



Flash Audit

Los archivos en Excel para realizar los instrumentos se denominan mantenimiento 1, mantenimiento 2, mantenimiento 3, mantenimiento 4, producción 1, producción 2, producción 3, producción 4, gerente 1, gerente 2, gerente 3 y gerente 4. Se encuentran en la Web en el directorio *Programa – Flash Audit*, con versión en español y están disponibles también en inglés en el directorio de la Web.

La información se procesa con la macro Ya, que se encuentra en el recuadro izquierdo superior de color ladrillo de la primera *Hoja Datos*; cada instrumento se llena por separado y se almacena en el mismo directorio de la página de análisis total de los 12 archivos.

Al terminar de procesar los resultados se obtienen en el mismo programa de la *Hoja Final* de resultados de los valores reales y por mejorar por grupo (mantenimiento, producción y gerentes), al igual que los totales por área; también se obtienen en forma gráfica en la *Hoja Radar* de resultados.

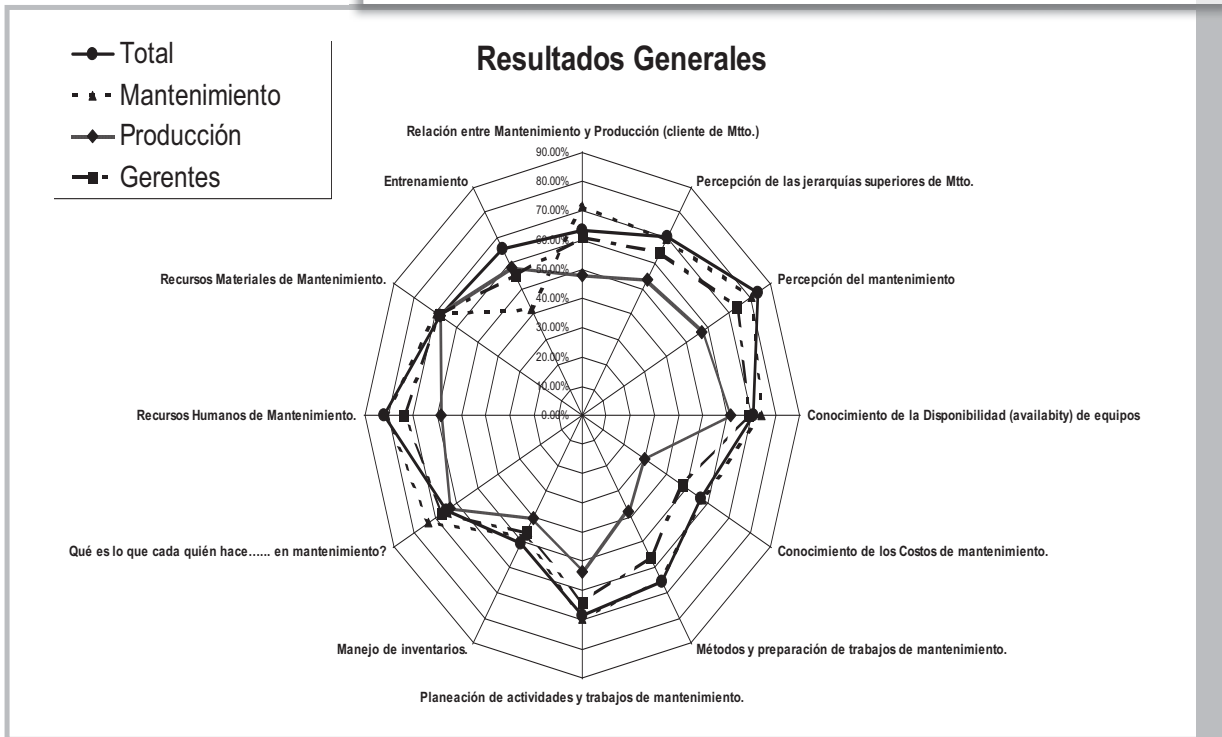
Resultados del *Flash Audit*.

GRÁFICO 20.29

No.	Concepto	Gerentes		Mantenimiento		Producción		Total	
		% Real G	por mejorar %	% Real M	por mejorar %	% Real P	por mejorar %	% Real Total	por mejorar %
1	Relación entre Mantenimiento y Producción (cliente de Mto.)	63.24%	36.76%	71.32%	28.68%	47.79%	52.21%	60.78%	39.22%
2	Percepción de las jerarquías superiores de Mto	70.16%	29.84%	69.35%	30.65%	53.23%	46.77%	64.25%	35.75%
3	Percepción del mantenimiento	83.65%	16.35%	80.77%	19.23%	56.73%	43.27%	73.72%	26.28%
4	Conocimiento de la Disponibilidad (availability) de equipos	70.45%	29.55%	73.86%	26.14%	61.36%	38.64%	68.56%	31.44%
5	Conocimiento de los Costos de mantenimiento	56.25%	43.75%	57.50%	42.50%	30.00%	70.00%	47.92%	52.08%
6	Métodos y preparación de trabajos de mantenimiento	65.53%	34.47%	64.77%	35.23%	38.26%	61.74%	56.19%	43.81%
7	Planeación de actividades y trabajos de mantenimiento.	68.48%	31.52%	69.57%	30.43%	53.26%	46.74%	63.77%	36.23%
8	Manejo de inventarios	50.45%	49.55%	47.32%	52.68%	40.18%	59.82%	45.98%	54.02%
9	¿Qué es lo que cada quién hace... en mantenimiento?	64.66%	35.34%	73.28%	26.72%	62.93%	37.07%	66.95%	33.05%
10	Recursos Humanos de Mantenimiento	81.62%	18.38%	80.88%	19.12%	58.09%	41.91%	73.53%	26.47%
11	Recursos Materiales de Mantenimiento	67.59%	32.41%	69.44%	30.56%	67.59%	32.41%	68.21%	31.79%
12	Entrenamiento	65.28%	34.72%	41.67%	58.33%	58.33%	41.67%	55.09%	44.91%

(Continuación)

GRÁFICO 20.29



El siguiente paso consiste en tomar las áreas más críticas para establecer los tópicos con menor calificación (ésta se encuentra entre 1 y 3, con 1 como óptima y 3 como la más ineficiente)¹⁷. Y dentro de ellos se toman las preguntas (con sus temas) con menor evaluación, con el fin de priorizar los planes de mejoramiento, en esa dirección.

20.11 MÉTODO DE DIAGNÓSTICO JERÁRQUICO ANALÍTICO DE COMPONENTES PRINCIPALES - EIGEN VECTOR

El modelo presenta la opción de evaluar diferentes aspectos y criterios de la gestión y operación del mantenimiento¹⁸, a partir de la calificación de las distintas variables

¹⁷ El programa en Excel está diseñado de forma que al tomar el evaluador la opción más positiva, asigna automáticamente una calificación de 1 y con la más negativa de 3, la opción intermedia otorga un valor de 2; todas las preguntas tienen tres opciones de evaluación en el Excel.

¹⁸ Como de cualquier otra área o proceso en las empresas.



El método de diagnóstico jerárquico es un modelo que presenta la opción de evaluar diferentes aspectos y criterios de la gestión y operación del mantenimiento, a partir de la calificación de las distintas variables seleccionadas.

La calificación de las variables presenta dos dimensiones: una es definir el peso relativo de la variable en la realización del objetivo seleccionado de mantenimiento, y otra es la evaluación circunstancial de esa variable de mantenimiento en ese instante en la empresa, frente a la meta propuesta.

seleccionadas para evaluar por parte de los expertos del área (ingenieros, técnicos, administradores, empleados, analistas, trabajadores, proveedores, etc.)¹⁹.

Las calificaciones siempre se hacen contra un objetivo deseado, y esta es la diferencia que tiene frente al modelo anterior *Flash Audit*, pues el jerárquico analítico es cambiante por depender del objetivo o meta que se desea evaluar.

La calificación de las variables presenta dos dimensiones: una que consiste en definir el peso relativo de la variable en la realización del objetivo seleccionado de mantenimiento, y otra que es la evaluación circunstancial de esa variable de mantenimiento en ese instante en la empresa, frente a la meta propuesta. Al conjugar los dos valores, mediante un procedimiento matemático se obtiene la evaluación de cada criterio para su peso relativo y su valor actual frente a la meta designada.

20.11.1 Desarrollo

El primer paso consiste en seleccionar los tópicos por evaluar; para facilitar el método se sugiere adoptar dos variables de cada uno de los ocho factores productivos descritos en la sección 18.8. Factores productivos modernos (para mantenimiento y producción).

El conjunto total de dieciséis²⁰ elementos que se van a jerarquizar y calificar, se puede seleccionar de la base de variables suministradas en la Web en el archivo Excel ubicado en *Programa – Variables de factores productivos*, donde se presenta una amplia lista de criterios posibles por medir, o, en su defecto, los evaluadores adoptan criterios propios.

Luego, como segundo paso se define la importancia de cada criterio frente a cada uno de los demás, a la luz del objetivo descrito, con valores de importancia relativa que van desde 1 (baja) hasta 9 (alta) en números enteros. Para esto en la Web ²¹ se puede usar el Programa *Instrumento 1 de diagnóstico JA*.

Para realizar esta calificación relativa se utiliza el *Cuadro 20.17* para asignar los valores relativos.

Ayuda en la



Variables de factores productivos
Instrumento 1 de diagnóstico JA

¹⁹ Para que la muestra de evaluadores tenga validez estadística y representatividad, se debe recurrir al menos a treinta y una personas expertas de todos los niveles jerárquicos de mantenimiento, que tengan experiencia y conocimiento de los criterios por evaluar.

²⁰ Se puede seleccionar otro número de variables, por ejemplo 14, 12, etc.

²¹ Para esta parte del proceso se puede utilizar el formato en la Web descrito como *Instrumento 1 de diagnóstico J A*.

Tabla de calificaciones de importancia relativa entre criterios J A.

CUADRO 20.18

INTENSIDAD DE LA IMPORTANCIA - CALIFICACIÓN	Definición	Explicación
1	Igual importancia importancia del criterio horizontal frente al vertical para alcanzar el objetivo propuesto	Dos actividades contribuyen igual al objetivo
3	Importancia débil del criterio horizontal frente al vertical para alcanzar la meta	Un criterio favorece ligeramente sobre el otro para el logro del objetivo
5	Importancia esencial o fuerte del objetivo horizontal sobre el vertical para relaizar el objetivo	Uncriterio favorece fuertemente sobre el otro para el logro del objetivo.
7	El criterio horizontal es mucho más importante que el vertical para lograr la meta	Un criterio es claramente más importante que el otro para el logro del objetivo
9	La variable horizontal es supremamente más importante que la variable vertical para alcanzar el logro del objetivo	Un criterio es máximo sobre el otro para el logro del objetivo
2,4,6 y 8.	Valores intermedios en sus rangos	Se necesita compromiso de ambas criterios

Luego, las 30 personas (o de las que se pueda disponer) evalúan la importancia relativa de los criterios, se toman los promedios de las evaluaciones y se construye una matriz de n criterios (filas)²² por n columnas. Donde la diagonal que baja desde la izquierda en el nivel superior hacia la derecha en su parte inferior se constituye con valores de 1. Izquierdo vertical de izquierda a derecha bajando se construye con valores absolutos de 1. La media matriz izquierda inferior se construye con los promedios de las calificaciones de importancia relativa asignada. Y la mitad superior izquierda se calcula con los inversos correspondientes a los valores anteriores, de tal forma que:

22 En es el número de criterios por evaluar en el diagnóstico de mantenimiento.

Condicionantes de importancia relativa en J A.

CUADRO 20.19

Inversos de los valores correspondientes inferiores izquierdos

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

Valores promedios obtenidos de la calificación de importancia relativa de todas las Personas

Fuente: El autor.



El análisis por componentes principales es un acercamiento estadístico que se usa para analizar la relación entre un gran número de variables, y explicarlas en términos de una dimensión común.

De esta forma se obtiene la matriz (de n columnas x n filas) de comparaciones de pares de criterios, la cual se somete al procedimiento matemático de componentes principales para obtener un vector de n componentes con los máximos valores característicos. Este procedimiento se puede realizar con software convencional como *Mat Lab*, *Statgraphics*, *DYANE 2* (Santesmases, 2003), *Mathematics* u otros, por medio de los cuales se obtiene el vector *eigen-vector* o característico.

El análisis por componentes principales es un acercamiento estadístico que se usa para analizar la relación entre un gran número de variables, y explicarlas en términos de una dimensión común. El análisis estadístico involucra una forma de agrupar la información contenida en un número de variables que sea menor que la dimensión original, con una mínima pérdida de información importante (Hair y otros, 2005).

Otra característica del análisis consiste en que es esencialmente descriptivo. Y tiene una interpretación geométrica, según Pearson, dada por el plano de mejor ajuste y vectores de máxima concentración, en función de distancias euclidianas.

Ésta es una técnica de análisis factorial que revela las dimensiones o factores subyacentes en la asociación o relación existente entre los valores de las variables analizadas. Un factor es una combinación lineal de las variables originales, los cuales se representan geométricamente por ejes ortogonales, lo que implica que los factores son independientes pero correlacionados entre sí.

El método de componentes principales se basa en una transformación lineal de las observaciones originales, la cual es conocida en el álgebra vectorial como generación de valores y vectores propios. Las nuevas variables generadas se denominan componentes principales con características estadísticas como independencia y no correlación directa.

La transformación lineal que sintetiza la máxima variabilidad corresponde al máximo valor Lambda (λ). Por lo tanto, la primera transformación lineal, o primera variable generada, o primer componente principal expresa la máxima variabilidad posible en el conjunto de datos.

La segunda transformación sintetiza la máxima variabilidad residual, sujeta a la condición de no correlación con el primer componente principal. Greenberg (en 1975) examina las propiedades de los estimadores generados y deduce que al incluir en el modelo los últimos componentes principales aumenta la varianza. Pero si hay una elevada correlación de éstos con las variables independientes disminuye el sesgo. El método de mínimos cuadrados se compara con el de componentes principales y se concluye que en presencia de multicolinealidad, es preferible el segundo método para estimar los parámetros y seleccionar variables. El soporte estadístico, matemático y demostrativo con fórmulas y deducciones del proceso de análisis estadísticos multivariantes y de interdependencias, como de componentes principales, para hallar el vector característico, se encuentra en varias publicaciones que se consiguen en el medio (Duffuaa, y otros, 1995; Santesmases, 2003; Grossman, 1999 y Hair y otros, 2005)

El procedimiento para obtener las evaluaciones individuales se puede realizar con el formato que se encuentra en la Web en la denominación *Programa - Instrumento 1 de diagnóstico JA*; para procesar los resultados y obtener la matriz característica se puede apoyar en el programa informático en Excel descrito en la Web como *Programa Método JA*.

El siguiente paso es calificar el estado actual de cada criterio en cuanto a su influencia para facilitar el alcance de la meta planteada, y se realiza mediante una calificación de 1 (mínima) a 9 (máxima influencia) con números enteros. Para esta evaluación se puede utilizar en la Web el formato Word establecido bajo el nombre de *Programa Instrumento 2 de JA*.

El último proceso es obtener la calificación total para cada criterio, la cual se logra calcular al multiplicar el valor correspondiente del *Eigen-Vector* por la segunda calificación de influencia. Con esto se obtienen los diferentes valores para cada criterio, y se organizan de mayor a menor con el fin de darles prioridad en la aplicación de estrategias y mejoramiento continuo a los primeros con mayor valor. Para procesar las segundas calificaciones y los resultados integrales de estrategia y mejoramiento se puede recurrir a la Web, al *Programa Resultados generales JA*, en Excel.



Otra característica del análisis consiste en que es esencialmente descriptivo. Y tiene una interpretación geométrica dada por el plano de mejor ajuste y vectores de máxima concentración, en función de distancias euclidianas. El método de componentes principales se basa en una transformación lineal de las observaciones originales, la cual es conocida en el álgebra vectorial como generación de valores y vectores propios.

Ayuda en la



Instrumento 1 de diagnóstico JA
Método JA
Instrumento 2 de JA
Resultados generales

EJEMPLO 20.8

Ejemplo de diagnóstico de jerarquía analítica

Los criterios por evaluar frente al objetivo de reducir los costos de mantenimiento en una empresa, al ser evaluados en forma relativa entre ellos, otorga la siguiente matriz característica de comparaciones de resultados²².

CRITERIO	IMPORTANCIA DEL CRITERIO HORIZONTAL FRENTE AL VERTICAL PARA EL LOGRO DEL OBJETIVO (FAVOR EVALÚE DE 1 A 10, CIFRA ENTERA).															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 - ORGANIZACIÓN Y PERSONAL.	1.00	0.19	0.20	0.19	0.19	0.19	0.18	0.13	0.20	0.18	0.18	0.16	0.21	0.18	0.17	0.17
2 - PRODUCTIVIDAD DE LA MANO DE OBRA.	5.17	1.00	0.20	0.18	0.17	0.18	0.21	0.18	0.17	0.18	0.19	0.16	0.19	0.19	0.20	0.21
3 - CAPACITACIÓN GERENCIAL.	4.90	4.97	1.00	0.18	0.15	0.18	0.21	0.16	0.22	0.19	0.21	0.15	0.22	0.21	0.18	0.19
4 - CAPACITACIÓN DE PLANIFICADORES.	5.23	5.57	5.50	1.00	0.19	0.19	0.19	0.22	0.18	0.20	0.23	0.21	0.19	0.21	0.16	0.24
5 - CAPACITACIÓN DE LOS TÉCNICOS.	5.60	5.73	6.47	5.33	1.00	0.19	0.18	0.17	0.19	0.19	0.16	0.19	0.22	0.20	0.20	0.20
6 - MOTIVACIÓN.	5.83	5.67	5.57	5.30	5.33	1.00	0.22	0.19	0.19	0.20	0.17	0.21	0.19	0.11	0.18	0.17
7 - ADMINISTRACIÓN Y CONTROL DEL PRESUPUESTO Y COSTOS.	5.63	4.87	4.80	5.23	5.50	4.63	1.00	0.23	0.16	0.19	0.14	0.16	0.18	0.18	0.19	0.23
8 - PLANEACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE ÓRDENES DE TRABAJO.	8.00	5.50	6.07	4.50	5.93	5.13	4.43	1.00	0.19	0.18	0.17	0.19	0.19	0.19	0.20	0.17
9 - INSTALACIONES.	5.10	5.90	4.53	5.60	5.37	5.30	6.07	5.23	1.00	0.20	0.16	0.18	0.17	0.17	0.17	0.19
10 - CONTROL DE ALMACENES, MATERIALES Y HERRAMIENTAS.	5.63	5.43	5.30	5.03	5.13	5.10	5.37	5.47	4.93	1.00	0.19	0.21	0.19	0.19	0.20	0.19
11 - MANTENIMIENTO PREVENTIVO E HISTORIA DEL EQUIPO.	5.60	5.27	4.87	4.37	6.13	5.93	7.03	5.97	6.13	5.17	1.00	0.19	0.17	0.19	0.20	0.17
12 - INGENIERÍA Y MONITOREO DE LAS CONDICIONES.	6.17	6.40	6.63	4.77	5.27	4.83	6.13	5.40	5.60	4.70	5.20	1.00	0.22	0.21	0.20	0.16
13 - MEDICIÓN DEL TRABAJO E INCENTIVOS.	4.80	5.13	4.63	5.17	4.47	5.30	5.57	5.23	5.83	5.40	5.93	4.60	1.00	0.19	0.22	0.17
14 - SISTEMAS DE INFORMACIÓN	5.70	5.17	4.70	4.67	5.03	9.00	5.57	5.13	5.80	5.13	5.23	4.87	5.17	1.00	0.22	0.19
15 - MANEJO DE INVENTARIOS Y REPUESTOS	5.90	5.00	5.50	6.27	4.93	5.43	5.27	5.10	5.93	5.07	4.93	5.03	4.63	4.53	1.00	0.21
16 - OPTIMIZACIÓN DE COSTOS	5.77	4.77	5.37	4.20	4.90	5.97	4.37	5.97	5.33	5.27	5.77	6.20	5.87	5.37	4.80	1.00

Fuente: El autor.

Al procesar la matriz de comparaciones y obtener su vector característico²³ (*eigen-vector*), se puede pasar a la segunda evaluación mediante el *Instrumento 2*²⁴, en el cual se obtiene la valoración del estado actual, que en el caso particular que se lleva a cabo aporta los resultados que se muestran a continuación.

Ayuda en la



Resultados
generales JA
Proceso JA de
Matrices Eigen
Vector en Mat Lab

Posteriormente, con el *Eigen-Vector* multiplicado con los resultados promedio de la evaluación de cada criterio del estado actual, se obtiene la valoración final de todos los criterios a la luz del objetivo propuesto, si se ejecuta la macro *Ya* que se encuentra en la *Web* en el *Programa - Resultados generales JA*, en su *Hoja Coloque acá el Eigen - Vector*. Para procesar la segunda evaluación y los resultados finales se obtiene la jerarquización de los diferentes criterios por mejorar en su orden de importancia. Ver también *Programa - Proceso JA de Matrices Eigen Vector en Mat Lab*.

23 Matriz que se obtiene en el programa de la *Web - Método JA*, en su Hoja Promedio general.

24 Para el caso particular del software *Mat Lab*, se dan unas instrucciones básicas de ayuda en el Programa de la *Web - Proceso JA de Matrices en Mat Lab*.

25 Véase en el Programa de la *Web - Instrumento 2 de JA*.

CUADRO 20.20

Fuente: El autor.

CUADRO 20.21

Y se obtiene el valor total de cada criterio, mediante la multiplicación del vector característico por el promedio de estado actual del criterio.

Proceso de mejora.

CUADRO 20.22

No.	ÁREA	VALOR	PUESTO
16	Optimización de costos	287	1
15	Manejo de inventarios y repuestos	233	2
14	Sistemas de información	202	3
13	Medición del trabajo e incentivos	146	4
12	Ingeniería y monitoreo de las condiciones	115	5
10	Control de almacenes, materiales y herramientas	96	6
11	Mantenimiento preventivo e historia del equipo	87	7
9	Instalaciones.	74	8
8	Planeación y programación de órdenes de trabajo	60	9
7	Admnsitración y control del presupuesto	45	10
6	Motivación	36	11
5	Capacitación de los técnicos	28	12
4	Capacitación de planificadores	27	13
3	Capacitación gerencial	19	14
2	Productividad de la mano de obra	13	15
1	Organización y personal	11	16

Al ejecutar la macro y ordenar los criterios en el orden en que se deben mejorar, muestra el proceso que se sigue para emprender las estrategias en orden secuencial sobre los criterios que permitan disminuir los costos de mantenimiento. Los procesos de mejora continua se realizan en el orden de la columna puesto.

CAPÍTULO 21

INSTRUMENTOS AVANZADOS ESPECÍFICOS TÉCNICOS, EN MANTENIMIENTO

La cantidad de alternativas que se pueden usar en el campo técnico y administrativo de mantenimiento es amplia y diversa. A continuación se nombran algunas de estas metodologías que tienen gran aplicación y difusión en el medio internacional.

21.1 INSTRUMENTOS AVANZADOS TÉCNICOS ESPECÍFICOS

Existen diversos métodos útiles en casos generales y otros que sólo se utilizan en situaciones especiales y particulares. A continuación se presentan los más renombrados:

21.1.1 Inspección visual, acústica y al tacto de componentes

La vigilancia permanente de máquinas durante la operación o el el mantenimiento juega un rol importante en los instrumentos avanzados, para detectar fallas o condiciones fuera del estándar. La presencia visual de desgastes, situaciones anormales y ruidos indica que se está ante un generador de falla, que puede evitarse si se emprenden las acciones correspondientes (Kelly y otros, 1998).



La cantidad de alternativas que se pueden usar en el campo técnico y administrativo de mantenimiento es amplia y diversa, y tienen gran aplicación y difusión en el medio internacional.

La vigilancia permanente de máquinas durante la operación o el mantenimiento juega un rol importante en los instrumentos avanzados, para detectar fallas o condiciones fuera del estándar.

21.1.2 Vigilancia de temperaturas

La utilización de aparatos térmicos para el control y la vigilancia de variables de condición en las máquinas es una herramienta avanzada, muy útil en la detección de fallas potenciales y situaciones fuera de estándar.

Entre dichos aparatos están: termómetros, termistores, pinturas, polvos térmicos, termostatos, cámaras de rayos infrarrojos, además de sensores de temperatura, de contacto, sensores basados en dilatación o expansión de líquidos, sensores bimetálicos en expansión, termopares, termocuplas, termorresistencias, testigos de color, bolas (*pellets*), sensores sin contacto, pirómetros ópticos y de radiación, cámaras infrarrojas, etc.

Algunas de las fallas que se pueden evidenciar con el control de temperatura son: daños en rodamientos, defectos en sistemas de refrigeración, sistemas de generación de calor o manejo energético, depósitos y sedimentos de materiales no deseados, daños en aislamientos, condiciones no estándar en sistemas eléctricos, etc. (Dounce, 1998 y Kelly y otros, 1998).

21.1.3 Control de la corrosión

Mediante instrumentos eléctricos, mecánicos o productos químicos se pueden evaluar el estado y la velocidad de corrosión o desgaste en los elementos, sistemas o máquinas. Entre las diferentes pruebas se señalan algunas, como probetas, ultrasonido, láser de pulsos, entre otras (Souris, 1992 y Kelly y otros, 1998).

21.1.4 Resistencia eléctrica

La presencia de una grieta en un sistema de medición y prueba eléctrica aumenta la resistencia medida entre dos probetas en contacto con el material que se estudia, en cuanto a la presencia de fisuras (Mora, 2007a).

21.1.5 Lubricación, engrase y aceites

La reducción de la fricción y del desgaste en las máquinas, la eliminación del calor y el arrastre de impurezas son algunos de los beneficios que tiene un adecuado manejo y operación logística de lubricantes, aceites y grasas en la función de mantenimiento y operación en las empresas. La *tribología* es una ciencia que apoya el desarrollo de planes preventivos sobre las formas de evitar la fricción y el desgaste.

Entre los tipos de fricción están deslizante, giratoria o rodante, fluida, etc. Según su origen, entre los tipos de lubricantes se pueden mencionar: animales, vegetales, minerales, sintéticos, etc. De acuerdo con su consistencia y densidad los lubricantes se pueden clasificar en líquidos, semisólidos y sólidos. Entre las características más relevantes de los lubricantes sobresalen viscosidad, punto de inflamación, punto



La utilización de aparatos térmicos para el control y la vigilancia de variables de condición en las máquinas es una herramienta avanzada, muy útil en la detección de fallas potenciales y situaciones fuera de estándar.

Mediante instrumentos eléctricos, mecánicos o productos químicos se pueden evaluar el estado y la velocidad de corrosión o desgaste en los elementos, sistemas o máquinas.

de combustión, punto de goteo, resistencia a la oxidación, resistencia a la emulsificación, etc.¹. En la Web, *ver Programa - Desgaste y análisis de fallas*, aportado por el Dr. Benítez - Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Entre los aditivos que se les agregan para mejorar sus propiedades físicas, mecánicas, químicas, etc., sobresalen: antidesgaste, detergentes, inhibidores de corrosión, antiespumantes, emulsificadores, inhibidores de corrosión, separadores de emulsiones para mejorar el punto de goteo, para presiones extremas, para condiciones exigentes y específicas, etc.

Algunos de los parámetros ambientales que se deben tener en cuenta en los lubricantes, son: temperaturas de trabajo, presiones a que son sometidos, velocidades de funcionamiento y el medio ambiente donde se encuentran en operación.

Entre las pruebas más solicitadas y utilizadas, sobresalen: residuos depositados (filtros, colectores magnéticos), residuos en suspensión (análisis del aceite con espectrómetro y análisis ferrográfico), y estado general del aceite en uso (espuma, emulsión, color, demás variables físico - químicas del lubricante) (Dounce, 1998 y Kelly y otros, 1998).

21.1.6 Monitoreo de causas y efectos eléctricos

Los métodos de monitoreo eléctrico se fundamentan en un circuito eléctrico simple que mide el grado de corrosión de elementos o sistemas. Y que utilizan diferentes metodologías, entre las cuales se menciona la del método de polarización electroquímica de un recipiente con un líquido corrosivo. Hay otra como la de los generadores de voltaje para evaluar motores o generadores, etc. (Duffuaa y otros, 1995).

21.1.7 Termografía infrarroja

Por medio de esta herramienta avanzada se puede medir la temperatura superficial mediante la evaluación de radiación infrarroja. Se utiliza en una amplia gama de máquinas y sistemas, como instalaciones eléctricas, calderas, refractarios, turbinas, etc. Trabaja mediante la medición de las variaciones de gradientes de temperatura sobre las máquinas y elementos en estudio, y puede funcionar en blanco y negro o en color. Con su interpretación gráfica y numérica se obtienen importantes análisis que contribuyen en la toma de decisiones en mantenimiento.

La generación de calor puede tener su origen en sistemas mecánicos, eléctricos o térmicos. Utiliza cartas térmicas artificiales para su análisis e interpretación, mediante análisis absoluto o por comparación con estándares normales (Sourís, 1992 y Duffuaa y otros, 1995).

Ayuda en la



Desgaste y
análisis de
fallas



Algunos de los parámetros ambientales que se deben tener en cuenta en los lubricantes, son: temperaturas de trabajo, presiones a que son sometidos, velocidades de funcionamiento y el medio ambiente donde se encuentran en operación.

Los métodos de monitoreo eléctrico se fundamentan en un circuito eléctrico simple que mide el grado de corrosión de elementos o sistemas.

Por medio de la termografía se puede medir la temperatura superficial mediante la evaluación de radiación infrarroja. Se utiliza en una amplia gama de máquinas y sistemas, como instalaciones eléctricas, calderas, refractarios, turbinas, etc.

1 Programa de la Web - *Desgaste y análisis de fallas* aportado por Dr. L. E. Benítez. Universidad Nacional de Colombia.

 El establecimiento de patrones en condiciones normales de operación permite diferenciar situaciones fuera del estándar, lo cual se logra con el análisis de vibraciones, una de las metodologías más certeras en el diagnóstico y monitoreo de equipos y elementos.

Las vibraciones se pueden definir como el movimiento de una masa desde un punto de reposo, a lo largo de todas las posiciones y de regreso al punto de reposo, en donde está lista la máquina para repetir el ciclo.

21.1.8 Análisis de vibraciones

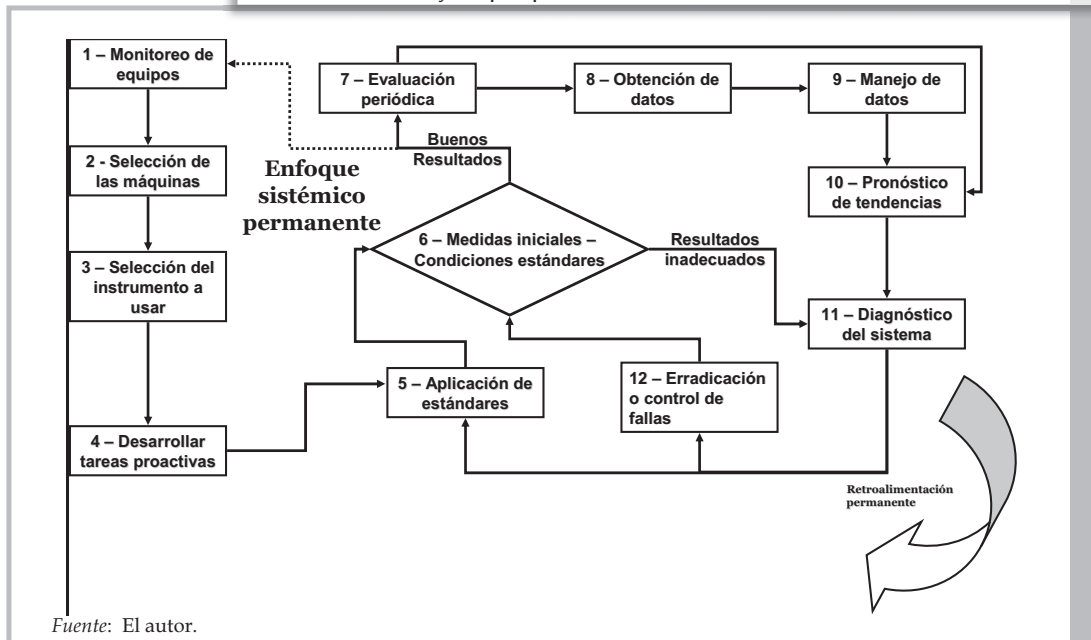
El establecimiento de patrones en condiciones normales de operación permite diferenciar situaciones fuera del estándar, lo cual se logra con el análisis de vibraciones, una de las metodologías más certeras en el diagnóstico y monitoreo de equipos y elementos. Detecta defectos internos como desalineaciones de rodamientos y poleas, desequilibrios dinámicos, desgastes de engranajes, sobrecargas, ejes defectuosos, etc.

Las vibraciones se pueden definir como el movimiento de una masa desde un punto de reposo a lo largo de todas las posiciones y de regreso al punto de reposo, en donde está lista la máquina para repetir el ciclo.

Entre los parámetros relevantes de vibraciones están: severidad de la vibración, espectros, situaciones de movimiento, velocidades pico, banda octava, desviaciones en las frecuencias de vibraciones, aceleración pico, espectros de frecuencias, ángulos de fase, bandas amplias y estrechas, etc. Su utilidad es muy alta en el monitoreo y el diagnóstico de equipos de rotación (Sourís, 1992; Duffuaa y otros, 1995; Kelly y otros, 1998 y Vibraciones@, 2008).

Sistema de monitoreo y chequeo permanente con vibraciones.

GRÁFICO 21.1



La puesta en marcha de un sistema de vigilancia en vibraciones se puede realizar en tres fases:

- Medición de los niveles de vibración con un sistema de medición portátil o con sonido, cuyo propósito es determinar varios valores iniciales (análisis de signatura, definición de los puntos por muestrear y registro de resultados previos).
- Análisis del comportamiento de frecuencia mediante filtración de banda para erradicar incidentes no deseados o parásitos.
- Vigilancia permanente con la aplicación de sistema de análisis integral y monitoreo en tiempo real.

Uno de los ensayos más comunes en máquinas de rotación es el *Run-Down*, que se realiza cuando se empieza a reducir la velocidad antes de una parada total, y tiene la particularidad de generar el efecto de amplificación de las vibraciones cuando el sistema entra en resonancia (Vibraciones@, 2008; Kelly y otros, 1998 y Navarro y otros, 1997).

21.1.9 Ferrografía. Análisis de lubricantes.

Análisis espectrométrico. Cromatografía

El análisis permanente de los aceites permite el uso de diferentes técnicas que se aplican para determinar su composición química y, por ende, deducir los parámetros de funcionamiento, materiales extraños y sus anomalías. La ferrografía y la detección de partículas como de virutas magnéticas revisan las partículas de desgaste de materiales en movimiento de base de material de hierro, que se encuentran en los aceites, lo cual permite monitorear y diagnosticar sobre los elementos en movimiento.

El análisis espectrométrico mide la presencia y la cantidad de contaminantes en el aceite; el espectrómetro de emisión atómica o absorción sirve para estas pruebas que detectan la presencia de metales ferrosos y no ferrosos, como de partículas no metálicas. La cromatografía evalúa los cambios en las propiedades de los lubricantes, como pH, presencia de agua, viscosidad, punto de inflamación, fracción insoluble de agua, etc., mediante la absorción y los análisis específicos (Duffuaa y otros, 1995).

21.1.10 Líquidos penetrantes

Los líquidos penetrantes y de tintas líquidas son usados para detectar en los elementos grietas, superficies escalonadas o fisuras provocadas por desgaste, fatiga, mantenimientos y reparaciones inadecuadas, corrosión, agentes atmosféricos, entre otros.



Uno de los ensayos más comunes en máquinas de rotación es el *Run-Down*, que realiza cuando se empieza a reducir la velocidad antes de una parada total, y tiene la particularidad de generar el efecto de amplificación de las vibraciones cuando el sistema entra en resonancia.

La ferrografía y la detección de partículas como de virutas magnéticas revisan las partículas de desgaste de materiales en movimiento de base de material de hierro que se encuentran en los aceites, lo cual permite monitorear y diagnosticar sobre los elementos en movimiento.

Los líquidos penetrantes y de tintas líquidas son usados para detectar en los elementos grietas, superficies escalonadas o fisuras provocadas por desgaste, fatiga, mantenimientos y reparaciones inadecuadas, corrosión, agentes atmosféricos, entre otros.



Inducir un campo magnético en la superficie donde existe una fisura, mediante una inducción localizada de superficie con imanes tipo U, hace que el polvo magnético se focalice alrededor de la grieta.

El ultrasonido se emplea para detectar fallas, grietas, soldaduras deficientes, huecos, corrosiones, desgastes, anomalías, roturas en elementos tales como: estructuras, ejes, tuberías, entre otros.

La constante revisión y medición de ruidos permite detectar en forma temprana las fallas o percibir elementos fuera de condiciones estándar. El sistema se fundamenta en medir las características de ruido, bajo condiciones normales y usar esta referencia para detectar anomalías.

Eventualmente, la detección de fugas o grietas en las máquinas, al utilizar como medio de contraste líquidos jabonosos, se puede considerar como una prueba sencilla de líquidos penetrantes. Es una técnica bien difundida, económica y efectiva (Duffuaa y otros, 1995; Sourís, 1992; Kelly y otros, 1998 y Mora, 2007b), que permite observar a simple vista fisuras hasta de $0,25 \mu\text{m}$; otras más finas se detectan con instrumentos más especializados².

21.1.11 Ensayo de pulverizado de partículas magnéticas

Inducir un campo magnético en la superficie donde existe una fisura, mediante una inducción localizada de superficie con imanes tipo U, hace que el polvo magnético se focalice alrededor de la grieta (Kelly y otros, 1998).

21.1.12 Ultrasonido

Se emplea para detectar fallas, grietas, soldaduras deficientes, huecos, corrosiones, desgastes, anomalías, roturas en elementos, tales como: estructuras, ejes, tuberías, etc. El método consiste en lanzar pulsos u ondas de ultrasonido al interior de los materiales, y con las respuestas obtenidas al regreso de la señal se determinan la ubicación física y la criticidad de la falla.

El tiempo de retraso entre la generación del pulso del sonido y la detección de la reflexión genera una medida de la distancia de la fuente a la superficie. La propagación de ultrasonidos de banda de frecuencias entre 0,25 y 10 MHz es bastante direccional y permite estudiar diferentes fisuras en la dirección en que ocurren, o que se presume que existen. En aceros actúan adecuadamente en espesores entre 0,5 y 300 milímetros (Duffuaa y otros, 1995 y Kelly y otros, 1998).

21.1.13 Ensayos y controles no destructivos

Clasifican en esta categoría de instrumentos avanzados de mantenimiento: la gammagrafía, los rayos X, las radiografías, las fibras ópticas para exámenes de profundidad, el ultrasonido, los procedimientos ópticos, los tratamientos de imagen, la termografía infrarroja, los ensayos bajo control, las pruebas de aceleración de vida útil, etc. (Duffuaa y otros, 1995 y Kelly y otros, 1998).

2 Lo describe la norma británica BS 3889 Methods for Non-destructive Testing of Pipes and Tube, BSI. Londres, Inglaterra, 1968.

21.1.14 Control de ruido

La constante revisión y medición de ruidos permiten detectar en forma temprana las fallas, o percibir elementos fuera de condiciones estándar. El sistema se fundamenta en medir las características de ruido, bajo condiciones normales y usar esta referencia para detectar anomalías. Puede utilizarse como un método previo a un análisis más profundo de vibraciones (Sourís, 1992; Duffuaa y otros, 1995 y Kelly y otros, 1998).

Algunas características de diferentes instrumentos avanzados técnicos de mantenimiento.

CUADRO 21.1

Método	Subdivisión del método	Estado de la máquina		Especificación de la avería de la falla	Habilidades del Personal	Condiciones complementarias
		Parada	Operación			
Por sentidos de visión, tacto o auditivo		X		Superficie	Alta Experiencia	Amplio rango de métodos
			X	Componentes internos o exterior del equipo	Baja experiencia	Revisiones periódicas y usada especialmente en motores de aviones
Térmicos			X	Superficial o interna	Variadas	Usa diferentes instrumentos: desde termómetros hasta escáner infrarrojos
Tribológicos - Revisión			X	Sistemas lubricados como medio de extracción magnética, filtro o muestra evaluativa de aceite	Entrenamiento para diferenciar entre partículas normales y de materiales por desgaste	Análisis espectrométrico y espectrográfico o de ferrogafia para definir elementos extraños en la muestra
Fugas		X	X	Diversos elementos sometidos a presión interna	Entrenamiento previo en el medio usado	Ninguna
Detección de grietas	Líquidos penetrantes *	X	X	Superficies planas, rugosas, etc. pero limpias	Entrenamiento básico y baja experiencia	Muestra solo grietas que afloran en la superficie exterior
	Partículas magnéticas *	X	X	Cerca de superficies planas, lisas y limpias	Entrenamiento básico y baja experiencia, capaz de percibir fisuras	Solo sirve para materiales magnéticos, es muy preciso para orientar la dirección vectorial de las grietas
	Resistencia eléctrica	X	X	Superficies planas y limpias, sin rugosidades fuertes	Entrenamiento básico y baja experiencia	Sirve para orientar la dirección vectorial de las grietas. Muy utilizado para medir profundidad de las fisuras
	Corrientes inducidas *	X	X	Superficies exteriores o cerca de ella. La distancia de la sonda a la grieta afecta los resultados	Alta experiencia y entrenamiento medio especializado	Sirve para encontrar un amplio rango de discontinuidades de los materiales, elementos, grietas, fuerzas, esfuerzos, tensiones superficiales, durezas, temple, etc.
	Ultrasonidos	X	X	Requiere acceso a una superficie plana y limpia, sin rugosidades fuertes	Para fisuras ocultas se requiere una alta experiencia y un entrenamiento medio especializado. En otras grietas visibles no requiere tanto	Sirve como estudio complementario a otras técnicas
	Radiografía	X	X	Debe ser posible acceder por ambos lados	Entrenamiento avanzado y alta experiencia en realización, lectura y análisis de radiografías, con alta capacidad de diagnóstico a partir de resultados	Se recomienda en superficies hasta de 50 milímetros en acero. Requiere de tener en cuenta la seguridad por exposición a la radiación. Sirve para grandes áreas de chequeo y estudio

(Continuación)

CUADRO 21.1

Análisis de vibraciones	Espectro de frecuencia, o pico a pico	x	x	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	Entrenamiento acorde al caso y a la criticidad de la falla o de la evaluación, la experiencia y el conocimiento depende de los elementos y las circunstancias a analizar	Permite tomar medidas en tiempos cortos durante la operación. Monitorea situaciones permanentemente. Va desde medidas sencillas hasta casos complejos y difíciles
Corrosión	Corrosímetro. Elementos eléctricos		x	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	Entrenamiento medio y alguna experiencia básica	Mide 1µm de pérdida de corrosión
	Resistencia de polarización y potencial de corrosión		x	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	Entrenamiento medio y alguna experiencia básica	Únicamente manifiesta si ocurre la corrosión, su valoración es débil
	Probeta de hidrógeno		x	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	No requiere ninguna práctica	El hidrógeno penetra y se esparce en las paredes delgadas de la sonda, lo que provoca aumento de presión
	Perforaciones con taladros		x	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	Necesita saber la precisión de hasta donde se debe taladrar	Mide en qué momento se llega a la cantidad de corrosión previamente fijada
	Probetas de corrosión	x	x	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	Entrenamiento bajo y poca experiencia, sólo lo básico para el manejo de probetas	Se comprueba cuando la planta se detiene
	Ultrasonidos	x		Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	Para fisuras ocultas se requiere una alta experiencia y un entrenamiento medio especializado. En otras grietas visibles no requiere tanto	Es capaz de percibir 0.5 milímetros de pérdida de espesor e incluso menos

Fuente: El autor.

21.1.15 Filtros magnéticos

Se colocan a la salida de los sistemas y unidades automáticas de lubricación, con el fin de controlar el estado de los lubricantes. El chequeo del estado del aceite y de la presencia de partículas permite diagnosticar la presencia de fallas o de pérdidas de las condiciones estándar de los sistemas o las máquinas (Kelly y otros, 1998; Souris, 1992 y Duffuaa y otros, 1995).

21.1.16 Corrientes inducidas

La circulación de corriente eléctrica por una bobina, que se coloca cerca de la superficie que se evalúa (en cuanto a desgastes o presencia de grietas), induce corrientes de Foucault en el elemento. Las corrientes son detectadas por cambios en la inductancia de la bobina generadora o de la otra bobina correspondiente al ensayo (Kelly y otros, 1998).

21.2 TÉCNICAS DE CONTROL Y MONITOREO DE CONDICIÓN DE ESTADO

Los instrumentos de medición especial o denominados de mantenimiento específico se clasifican según si se pueden usar durante la operación de los sistemas, o cuando éstos están detenidos. Las diferentes técnicas de control y monitoreo de equipos³, variables y condiciones son descritas en párrafos anteriores. Su utilización va condicionada a las circunstancias técnicas y económicas de cada caso. De las técnicas de control descritas, se pueden enunciar tres de ellas como de aplicación general: térmica, tribológica y de vibraciones.

Es importante resaltar que cada uno de los métodos de orden instrumental avanzado puede aportar resultados significativos, en el análisis de la situación que genera alguna o todas las causas raíces de fallas. Pero es más importante el estudio del conjunto de muchos de ellos, que se pueden relacionar, porque así puede haber mejores consideraciones técnicas o de ingeniería que aporten excelentes soluciones a los estados de no funcionalidad por causas de mantenimiento⁴ (Benítez, 2007, 2008).



Los instrumentos de medición especial o denominados de mantenimiento específico se clasifican según si se pueden usar durante la operación de los sistemas, o cuando éstos están detenidos.

Cada uno de los métodos de orden instrumental avanzado puede aportar resultados significativos, en el análisis de la situación que generan las causas raíces de fallas. Pero el análisis de conjunto puede aportar mejores alternativas de solución.

3 Los autores Kelly y otro las circunscriben sólo a acciones predictivas de mantenimiento, pero también se pueden aplicar a otros tipos de tareas de mantenimiento (correctivas, modificativas o preventivas), según sea el caso.

4 Por ejemplo, si se analizan independientemente las técnicas descritas en el apartado térmica, tribológica y de vibraciones, se puede realizar un análisis no muy adecuado que quizá conduzca a soluciones no apropiadas. Una “ruta de tribología” correctamente aplicada puede conducir a realizar una “ruta de confiabilidad”, para garantizar el funcionamiento correcto de los equipos.

Comparación de tres instrumentos avanzados específicos técnicos de técnicas de control.

CUADRO 21.2

Modelos generales de técnicas de instrumentos avanzados
específicos de orden técnico particular y genérico

Elementos de control	Implementación sistémica, metódica y constante bajo la forma de tareas proactivas permanentes o alguna táctica avanzada		
	Estudios y vigilancia Térmicos	Monitoreo tribológico	Vigilancia con Vibraciones
Medio para la transmisión de información a través de la máquina	Objetos o elementos sólidos o fluido, que posea conductividad térmica	Aceites lubricantes o de refrigeración, grasas u otro fluido con características medibles	Elementos sólidos Están en función de las características elásticas y másicas de los sólidos
Elementos vigilados y monitoreados	Elementos o sistemas que desprendan calor por movimiento físico o transmisión de energía. Sistemas térmicos con fluido para transferir calor. Intercambiadores	Cualquier componente que esté lubricado: cojinetes, componentes de transmisión (engranajes, acoples, levas, ejes), bomba de lubricación, etc.	Elementos, componente o máquinas con movimiento independiente o relativo entre las partes
Averías encontradas	Averías en sistemas, daños en mecanismos, bloqueo de contactos, fugas de calor, contaminación de líquidos refrigerantes, Excesos de carga en equipos estándares y convencionales	Daños, averías, fugas, grietas, etc. o cualquier otro tipo de deterioro puntual o progresivo del sistema. Características de materiales, de desgaste, de aceites o fugas en los sistemas lubricados	Elementos de reposición de elementos o materiales en movimiento, formas de desgaste en materiales por fricción. Elementos de rotación, ejes o flechas
Máquinas de vigilancia y monitoreo	Termocuplas, termómetros de fluidos o bimetálicos, termopares, termorresistencias, termistores, instrumentos asociados, registros de temperaturas, infrarrojos, aparatos ópticos, cámara de infrarrojos, etc.	Elementos o filtros cambiables en carga, clavijas magnéticas para el examen visual de restos utilizando microscopio, espectrómetro para análisis de material en suspensión, ferrógrafo para separación de residuos, medida de presión	Acelerómetro más equipos electrónicos de proceso para visualizar valores promedios en el tiempo. Filtros de frecuencias y registradores para análisis de vibraciones
Frecuencia	Permanente y cíclica	Inicialmente cíclica	Permanente y cíclica

RESUMEN

La quinta parte muestra, profundiza y compara las cuatro divisiones del Nivel 1 – Instrumental del enfoque sistémico kantiano aplicado a mantenimiento. Se dejan sentadas todas las bases, los criterios y herramientas necesarias para que mantenimiento pueda funcionar adecuadamente, en aras de prepararlo para que las empresas puedan alcanzar los niveles superiores operacional, táctico y estratégico.

PREGUNTAS, DESARROLLOS, FOROS Y EJERCICIOS

- Describa cada uno de los factores productivos y explique en qué y cómo cada uno de ellos aporta al mantenimiento industrial.
- Explique la función macroeconómica de la productividad (o de la producción), detallando lo que ocurre con la producción, el producto promedio y la productividad en cada una de las zonas. Elabore un gráfico de las tres curvas para un factor productivo.
- ¿Cuál es el punto ideal de ubicación de dos factores productivos? Explique en una gráfica con un bosquejo de las tres zonas y las tres curvas para cada uno de los dos factores productivos.
- Enuncie las diferencias básicas entre eficacia, eficiencia y efectividad.
- Defina actividad, procesos y macroprocesos.
- Esboce los conceptos fundamentales de TQC y TQM, asociados a mantenimiento.
- Describa las características de las 5S y explique cada una de ellas, sus ventajas, utilidades y aplicaciones.
- Argumente acerca de los fundamentos y aplicaciones del mejoramiento continuo en mantenimiento.
- Describa los principales aspectos que contiene el concepto de signos vitales del *Quantum Performance* y sus aplicaciones, ventajas y limitaciones frente al *Balanced ScoreCard*.
- Exponga y sustente la aplicabilidad en mantenimiento, de al menos tres herramientas estadísticas.
- Elabore una lista de los pasos requeridos en el análisis de fallas; luego describa cuándo se usa, sus ventajas y sus limitaciones.
- Realice en grupo un caso real de análisis de fallas, siguiendo todas las metodologías propuestas en el libro. Utilice las plantillas propuestas y grafique el volumen de riesgo.
- ¿Cuáles son los diferentes pasos que se siguen en el RCFA? Sustente cada uno de ellos.
- En cuanto a tablas de valoración, ¿cuáles son las diferencias y similitudes entre RPN y RCM?
- Enuncie al menos cinco diferencias entre productos o repuestos *Push* y *Pull*.
- ¿En qué momento se hacen los pedidos *Push* y *Pull*? Diga también qué cálculos se llevan a cabo para estimar las cantidades por pedir de cada uno de ellos.

- ¿Qué controles conoce que se aplican a las referencias *Pull* y para qué sirven?
- Según su criterio, ¿cuáles considera las principales razones que deben existir para realizar subcontrataciones de actividades de mantenimiento en una empresa?
- Describa las diferencias entre los modelos y métodos *Flash Audit* y jerarquía analítica, a la hora de hacer auditorías de mantenimiento.
- Practique un caso real de *Flash Audit* y otro de jerarquía analítica en un sector industrial de su localidad o en una empresa real, utilizando todos los programas aportados para ello en este libro.
- Enuncie, explique y fundamente al menos tres instrumentos avanzados técnicos específicos de mantenimiento de uso común en actividades predictivas de mantenimiento, o en análisis de fallas.

EJERCICIO 21.1

Productividad

Complete el cuadro siguiente, elabore las tres gráficas, diga cuál es el punto ideal del factor productivo y sustente su respuesta.

N F	Q	$Q_{t+1} - Q_t$	$Q_t / \text{No. Factor}$	$(Q_{t+1} - Q_t) / (NF_{t+1} - NF_t)$
No. Factor	Producción	Incremento	PP - Producto promedio	Productividad
No. Factor	Producción	Incremento	Producto promedio	Productividad
0	0	0	0	0
1	12300	12300		12300
2	110700	98400		98400
3	288558	177858	96186	177858
4	351741	273183	149435	273183
5	1216224	854483	243245	
6	2214000	1097776	369000	1097776
7	3075000	861000	439286	861000
8	4004265	929265	500533	929265
9	4674000	669735	519333	669735
10	5166000	492000	516600	492000
11	5636000	470000	503182	369000
12	5781000	246000	481750	246000
13	5965500	123000	454154	123000
14	5965500	0	454154	61500
15	5965500	0	397750	0
16	5658000	-61500	369000	
17	5658000	-307500		-246000
18	5658000	-369000	369000	-369000
19	4674000			
20	2885088			
21	984000			-1901088
22		-2502435		
23	-5535000		-240652	
24	-9551565	-4016565		-4016565
25	-13568130			
26		-4016565		-4016565

Clasificación *Push*, *Pull* o retiro de almacén

De acuerdo con los valores de demanda histórica que se dan en los cuadros, clasifique los siguientes repuestos en *Push*, *Pull* o retirar de almacén. Hágalo en la columna sugerida.

EJERCICIO 21.2

Numeral	Clasifique acá	Almacén	Ítem	Categoría	Referencia	Descripción	Inventario último Mes	Unidad	Valor
1	Pull		310	LLTT	100309	TORNILLO 5/8 X 2 (T.W.A.)	21172	UN	475
2	Push		246	LLTT	100245	ESPACIADOR AMORTIGUADOR DOBLE 954 MCM	556	UN	30800
3	Pull		309	LLTT	100308	TORNILLO 5/8 X 1.34 (T.W.A.)	21372	UN	400
4	Pull		4	LLTT	100003	BLINDAJE PARA 954 MCM	5	UN	1014836
5	Push		222	LLTT	100221	CABLE ACSR 954 MCM	30588	MR	10000
6	Pull		308	LLTT	100307	TORNILLO 1/2 X 1.34 (T.W.A.)	3615	UN	327
7	Revisar o Retirar de Portafolio		183	LLTT	100182	AISLADOR DE VIDRIO DE 48000 LBS	2363	UN	88160
8	Pull		287	LLTT	100286	EMPALME DE COMPRESION PARA 954 MCM	184	UN	41180
9	Pull		239	LLTT	100238	GRAPA BIFILAR CMA 95	72	UN	6000
10	Pull		307	LLTT	100306	TORNILLO 1/2 X 1.12 (T.W.A.)	6576	UN	280
11	Push		311	LLTT	100310	TORNILLO 5/8 X 2.14 (T.W.A.)	1831	UN	517
12	Pull		256	LLTT	100255	GRAPA TIERRA 2 BAL D7-16	78	UN	3000
13	Pull		221	LLTT	100220	CABLE ACSR 110.8 MCM	6094	MR	8000
14	Revisar o Retirar de Portafolio		330	LLTT	100329	TORNILLO 3/4 X 2 1/2 (T.W.A.)	0	UN	2216
15	Revisar o Retirar de Portafolio		291	LLTT	100290	TORNILLO 5/8 X 8 (2T)	2185	UN	1130
16	Pull		317	LLTT	100316	TORNILLO 5/8 X 1.12 (T.W.A.)	1748	UN	474
17	Revisar o Retirar de Portafolio		3	LLTT	100002	BLINDAJE PARA 110.8 MCM	0	UN	15800
18	Pull		224	LLTT	100223	CAMISA DE REPARACION PARA 954 MCM	234	UN	35000
19	Pull		329	LLTT	100328	TORNILLO 3/4 X 2 (T.W.A.)	118	UN	815
20	Pull		263	LLTT	100262	GRILLETE CH 30	90	UN	15000

Ensamble horizontalmente las figuras.

[illegible]

Números de veces de Demanda		Rotación 36 meses		Rotación 24 meses		Rotación 12 meses		Rotación 6 meses		Criterio 1		Criterio 2		Criterio 3		Criterio 4	
Suma % - 40 %		Suma % - 60 %		Ultimos doce meses - 80%		Ultimos seis meses - 90 %		Revisar		Revisar		Revisar		Revisar		Revisar	
46	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
35	69.44%	54.17%	50.00%	25.00%	25.00%	50.00%	50.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
46	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
42	88.89%	83.33%	83.33%	41.67%	41.67%	83.33%	83.33%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
15	27.78%	29.17%	29.17%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
45	97.22%	70.83%	70.83%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
19	47.22%	58.33%	58.33%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
16	36.89%	96.33%	96.33%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
38	94.44%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
34	91.67%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
36	88.89%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
46	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
45	97.22%	95.83%	95.83%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
35	69.44%	54.17%	54.17%	25.00%	25.00%	50.00%	50.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
31	58.33%	37.50%	37.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
38	77.78%	70.83%	70.83%	66.67%	66.67%	66.67%	66.67%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
39	80.56%	70.83%	70.83%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
30	58.33%	37.50%	37.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
34	66.67%	50.00%	50.00%	66.67%	66.67%	66.67%	66.67%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Criterio 5		Criterio 5		Menor a 50% cumple con 1		Respuestas	
Promedio mes	Desviación estándar	Porcentaje desviación estándar	Criterio Media / Desviación Estándar	Sugerido			
604.17	384.20	63.59%	0	4			
493.33	432.92	87.76%	0	1			
639.80	396.86	62.03%	0	4			
657.85	396.14	60.22%	0	4			
552.22	384.08	69.95%	0	4			
205.17	363.11	176.98%	0	0			
731.15	348.75	47.70%	1	5			
285.24	405.76	142.25%	0	4			
171.09	357.52	208.97%	0	1			
515.50	425.47	82.54%	0	3			
473.33	449.12	94.89%	0	4			
515.65	447.13	86.71%	0	4			
542.46	333.46	61.47%	0	4			
678.48	329.97	45.63%	1	5			
510.39	461.25	90.37%	0	1			
361.57	389.11	107.62%	0	1			
374.24	389.53	104.09%	0	3			
434.20	394.11	90.77%	0	3			
442.93	443.85	100.21%	0	1			
328.43	391.46	119.19%	0	2			

Push por asignación

EJERCICIO 21.3

Una empresa desea calcular las cantidades *Push* que se van a pedir por asignación. Diligencie y complete el cuadro siguiente, de acuerdo con las pautas dadas a este método.

		Artículo Push 1	Artículo Push 2	Artículo Push 3	
Más	Pedido - Pronóstico - Estimado - este mes nuevo	2765	876	3576	
Menos	Inventario a principio de periodo	1093	343	34	Menos
	Ventas mes anterior	1232	154	2324	
	Pedidos mes anterior	353	345	657	
	Error mes anterior	879	0		
	Disponibilidad asignada		92.00%	84.09%	
	Z	1.28			
Más	Error Mes anterior Venta mayor a pedidos mes anterior Ventas Despachos aún pendientes	1126.48	0.00	1663.94	Más
Igual a	Sub-total hasta ahora	2798.48			Igual a
	Demanda promedio = (demanda mes anterior + pronóstico mes siguiente) / 2	1998.5	515	2950	
		Tipo A	Tipo B	Tipo C	
	Producto Tipo A B o C	1.25	0.75	0.35	
Más	Inventario libre deseado a final de mes	2498.13	386.25	1032.50	Más
Prueba	Valores positivos hasta acá	5296.61			Prueba
Subtotal	Requerimiento parcial este nuevo mes		919.25	6238.44	Subtotal
	Capacidad total	23289.00	Diferencia		Cálculos
	Requerimiento total		10834.70		
	Capacidad total menor que Requerimiento total				
S u m a	Volumen total a comprar cuando Capacidad total es menor a Requerimiento total = Demanda parcial * Capacidad posible / Suma Total Demanda	0.00			
Capacidad total mayor o igual que Requerimiento total					
Excedente	Volumen adicional por referencia total a comprar cuando Capacidad total es mayor a Requerimiento total = Demanda parcial * Capacidad posible / Suma Total Pronósticos Demanda	8227.95		2606.76	5213.51
					Total
Total	Requerimiento final este nuevo mes	13524.55			25895.76

Cálculos generales de un almacén

EJERCICIO 21.4

Realice los cálculos totales para una empresa o almacén de repuestos, usando en la Web el Programa - *Inventario automático de 10.000 referencias* y aplíquelo al menos para 50 ítems.

Ayuda en la



Inventario
automático
de 10.000
referencias

NIVELES ESTRATÉGICOS, TÁCTICO Y OPERACIONAL

SEXTA PARTE

OBJETIVOS

Manejar los elementos relevantes en los niveles dos (operacional), tres (táctico) y cuatro (estratégico) de mantenimiento, de tal manera que integrados a los conceptos y aplicaciones ya vistas del nivel uno, bajo un enfoque sistémico kantiano, permitan alcanzar el grado de éxito propuesto en mantenimiento, mediante una gestión y operación del mismo, de una manera efectiva – Nivel 4 – Escala de Bloon Barret y Gagné (Gagné@ y otros, 2008).

INTRODUCCIÓN

Esta sexta y última parte propende hacia la integración total del enfoque sistémico. Detalla conceptualmente y de manera práctica los niveles dos, tres y cuatro del sistema integral de mantenimiento. Profundiza y da criterios de análisis de cada una de las cuatro operaciones (correctivas, modificativas, preventivas y predictivas), de las tácticas más usuales (*TPM*, *RCM*, *TPM* y *RCM*, Proactiva, Reactiva, *PMO*, *World Class*, etc.), e integrando los requerimientos necesarios de la fase estratégica, para evaluar, predecir y alcanzar el grado de éxito que se adquiere en mantenimiento y producción, mediante el *CMD* y el *LCC*.

La descripción de los niveles dos, tres y cuatro de mantenimiento y producción, bajo un enfoque sistémico, permite llegar al conocimiento y el control total del sistema de ingeniería de fábricas.

CONOCIMIENTOS PREVIOS REQUERIDOS

Es necesario contar con todos los conocimientos hasta ahora desarrollados en este libro. El alto nivel de análisis sólo se logra si se integran todos los conceptos y aplicaciones de los cuatro niveles de mantenimiento, que es la estructura de esta obra.

CAPÍTULO 22

NIVEL OPERATIVO

El enfoque sistémico kantiano en su segundo nivel plantea las posibles acciones que pueden ejecutarse en mantenimiento, que comprenden básicamente tareas de mantenimiento antes y después de la falla real o potencial.

Clasificación real o mental de los niveles de mantenimiento. **GRÁFICO 22.1**



El nivel dos de mantenimiento trata sobre las posibles acciones mentales que puede desarrollar el hombre sobre las máquinas, y su ejecución organizada, lógica y coherente que se da en el nivel tres (táctico). Es imprescindible tener en cuenta que se habla de mental, porque sólo el hombre puede diferenciar si la tarea que se realiza es planeada o no. Si es reparación o mantenimiento, si es correctiva, modificativa, preventiva o predictiva, a diferencia del nivel uno de mantenimiento en el que todos los instrumentos o sus aplicaciones son reales, lo mismo que el nivel tres en mantenimiento, ya que en él se diferencian de manera notoria las tácticas entre sí, en contraste con el nivel cuatro o estratégico, en el cual las situaciones que se manejan son indicadores y cifras que sólo son del entendimiento humano.



Como reparaciones se definen las tareas no planeadas de mantenimiento que se realizan después de que sucede la falla. Las hay de dos tipos: correctivas y modificativas.

El mantenimiento correctivo consiste en la pronta reparación de la falla y se le considera de corto plazo. Las personas encargadas de reportar la ocurrencia de las averías son los propios operarios de las máquinas o equipos, y las reparaciones corresponden al personal de mantenimiento.

El desvare consiste en aplicar una reparación inmediata al equipo para devolverlo a la condición de trabajo u operación, pero no necesariamente a sus condiciones estándar.

Como reparaciones se definen las tareas no planeadas de mantenimiento que se realizan después de que sucede la falla¹. Las hay de dos tipos: correctivas y modificativas; mientras que como mantenimiento se denominan las tareas planeadas que se dan antes de que suceda la avería². Entre éstas aparecen las preventivas y las predictivas, a estas últimas también se les reconoce como tareas proactivas (Moubray, 2004).

22.1 ACCIONES CORRECTIVAS

El mantenimiento correctivo consiste en la pronta reparación de la falla y se le considera de corto plazo³. Las personas encargadas de reportar la ocurrencia de las averías son los propios operarios de las máquinas o equipos y las reparaciones corresponden al personal de mantenimiento. Exige, para su eficacia, una buena y rápida reacción de la reparación (recursos humanos asignados, herramientas, repuestos, elementos de transporte, etc.). La reparación propiamente dicha es rápida y sencilla, así como su control y puesta en marcha (Navarro y otros, 1997).

El principal inconveniente que presenta este tipo de acción de mantenimiento consiste en que el usuario detecta la falla cuando el equipo está en servicio, en el preciso momento en que pierde su funcionalidad, ya sea al ponerlo en marcha o durante su utilización. Además, porque la mayoría de los operarios encargados de usar los equipos no son expertos en fallas. Entre algunos de los síntomas que determinan la presencia de fallas, pueden estar altos niveles de ruidos y/o anomalías que pueden generar otras averías mayores (Navarro y otros, 1997).

Existen dos tipos de tareas no planeadas de orden correctivo:

- El desvare, que consiste en aplicar una reparación inmediata al equipo para devolverlo a la condición de trabajo u operación, pero no necesariamente a sus condiciones estándar. Se aplica en urgencias donde no se debe paralizar el proceso operativo de bienes y/o servicios.
- Reparación correcta y definitiva, para la cual se tienen experiencias previas similares y se conoce la causa raíz

1 Con el fin de regresarle la funcionalidad al equipo.

2 Se realizan con el único fin de evitar fallas futuras de orden real o potencial.

3 Lo único que se exceptúa de este concepto de corto plazo es la organización de largo plazo que se les da en algunas empresas a los almacenes de repuestos.

de la falla. Esta reparación devuelve la máquina a sus condiciones estándar de producción y mantenimiento.

Las tareas de mantenimiento correctivo son las que se realizan con intención de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema, tras la pérdida de su capacidad para realizar la función o las prestaciones que se requieren. Una tarea de mantenimiento correctivo típica (Knezevic, 1996) consta de las siguientes actividades:

- Detección de la falla
- Localización de la falla
- Desmontaje
- Recuperación o sustitución
- Montaje
- Pruebas
- Verificación.

22.2 ACCIONES MODIFICATIVAS

La tarea no planeada, denominada acción modificativa, es una versión superior y desarrollada de las acciones correctivas. Y sucede cuando en forma continua se aplican reparaciones que no surten efecto en la recuperación de la funcionalidad del equipo. Entonces es cuando se da lugar a la aplicación de algunos de los instrumentos básicos o avanzados de mantenimiento, con el fin de determinar la razón primaria de la condición fuera del estándar.

Una vez se encuentra la causa raíz del problema, se procede a aplicar políticas de control mediante la realización de modificaciones en el equipo o el sistema, a través de la utilización de conceptos y acciones propias de la ingeniería de diseño. Estos hechos en forma sistémica se reconocen como procesos de acciones modificativas de mantenimiento.

Cuando la modificación no se hace como consecuencia de un estado de falla, sino con el fin de mejorar la productividad o elevar la confiabilidad del equipo, también califica como acción modificativa, pero en su versión del elemento producción. Téngase en cuenta que la modificación puede sugerirse a partir de cualquiera de los tres elementos propios de un sistema de mantenimiento⁴.



Las tareas de mantenimiento correctivo son las que se realizan con intención de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema, tras la pérdida de su capacidad para realizar la función o las prestaciones que se requieren.

La tarea no planeada, denominada, acción modificativa, es una versión superior y desarrollada de las acciones correctivas. Y sucede cuando en forma continua se aplican reparaciones que no surten efecto en la recuperación de la funcionalidad del equipo.

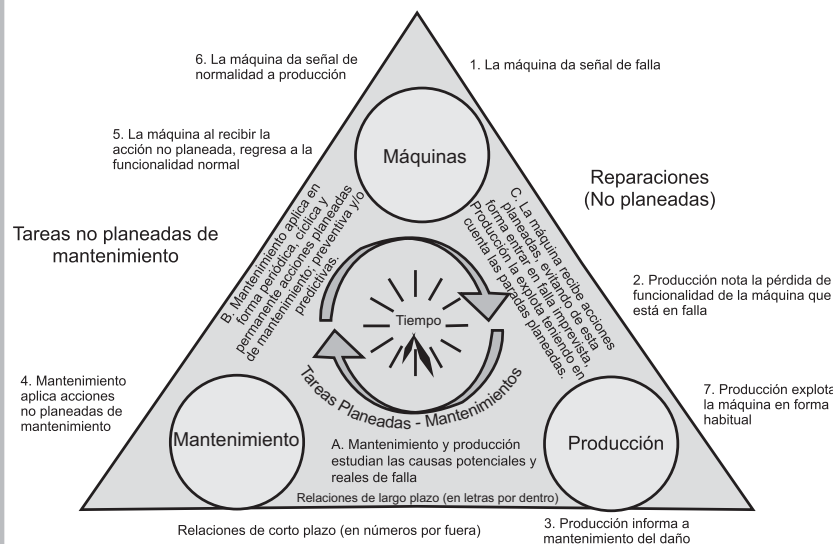
⁴ Máquina, por encontrarse en falla o en baja confiabilidad y/o productividad. Mantenimiento, por las experiencias negativas de acciones correctivas previas. Operación, con el fin de elevar la productividad o mejorar los costos de producción.



Cuando la modificación no se hace como consecuencia de un estado de falla, sino con el fin de mejorar la productividad o elevar la confiabilidad del equipo, también califica como acción modificativa, pero en su versión del elemento producción.

Reglas y relaciones cíclicas entre los elementos de mantenimiento para las acciones.

GRÁFICO 22.2



Fuente: El autor.

Las acciones modificativas de mantenimiento intentan eliminar las causas de las fallas (Kelly y otros, 1998). Dichas acciones consisten en mejorar el diseño de los equipos, ya sea por envejecimiento o por obsolescencia tecnológica, en hacerles modificaciones que permitan una mayor vida útil y/o una mejor productividad de los bienes que fabrica (Navarro y otros, 1997).

Las tareas planeadas o proactivas que se ejecutan antes de las fallas, catalogadas de largo plazo⁵, presentan algunas versiones, entre las cuales sobresalen:

22.3 ACCIONES PREVENTIVAS

La aplicación de instrumentos avanzados y básicos de mantenimiento, deriva en el conocimiento de las fallas y de su causa raíz, con todas sus connotaciones asociadas, como: características, situaciones propias y de ambiente donde se da, periodicidad,

⁵ Para su realización se estructuran andamiajes e inversiones de largo plazo en los ocho factores productivos.

ocurrencia, medidas, soluciones, síntomas, causas básicas e inmediatas, modos de falla, función que se afecta, falla funcional presente, etc. Todo lo cual permite planear en el tiempo cuándo debe hacerse la reposición o reconstrucción del elemento, antes de que entre en modo de falla por cuerpo o por función.

Lo normal es que el parámetro de medición para determinar el momento del cambio físico (o reconstrucción) o de su ajuste funcional se haga en términos tales como horas de servicio, cantidad de desgaste, unidades producidas, velocidades alcanzadas, consumo, valor de alguna variable de condición, etc. Posteriormente y una vez conocida la cifra previa del parámetro, se programa y se realiza la acción preventiva, antes de que alcance la condición fuera del estándar. En ese momento se interviene y se realiza la tarea proactiva de falla, que se conoce como preventiva.

La novedad de las acciones preventivas estriba en que nunca se debe alcanzar el estado de falla, pues en este caso se presenta el inconveniente de que cuando el elemento es sustituido o ajustado funcionalmente se pierde cierta cantidad de vida útil, ya que no alcanza su estado de falla o desarrollo completo de la vida útil. Es importante recordar que el propio nombre de la acción establece su condición, que se pueda prevenir la falla, y sobre todo que se pueda planear.

En las acciones preventivas lo que realmente interesa es el estado inicial (o en tiempo real), en condición de funcionalidad y el momento previo a la situación fuera del estándar. No evalúa con profundidad los estados intermedios, aunque realiza inspecciones y mediciones periódicas para definir las circunstancias previas a la condición fuera de estándar.

El mantenimiento preventivo es la ejecución de un sistema de inspecciones periódicas programadas racionalmente sobre el activo fijo de la planta y sus equipos. Con el fin de detectar condiciones o estados inadecuados de esos elementos, que pueden ocasionar circunstancialmente paros en la producción o deterioro grave de máquinas, equipos o instalaciones, y realizar en forma permanente el cuidado de mantenimiento de la planta para evitar tales condiciones, mediante la ejecución de ajustes o reparaciones, mientras las fallas potenciales están aún en estado inicial de desarrollo (Patton, 1995).

La función principal del mantenimiento preventivo es conocer el estado actual de los equipos, mediante los registros de control llevados en cada uno de ellos y en coordinación con el departamento de programación, para realizar la tarea preventiva en el momento más oportuno. Consiste en una serie de actuaciones sistemáticas en las que desmontan las máquinas y se observan para reparar o sustituir los elementos sometidos a desgaste.



Lo normal es que el parámetro de medición para determinar el momento del cambio físico (o reconstrucción) se haga en términos tales como horas de servicio, cantidad de desgaste, unidades producidas, velocidades alcanzadas, consumo, valor de alguna variable de condición.

En las acciones preventivas lo que realmente interesa es el estado inicial (o en tiempo real) en condición de funcionalidad y el momento previo a la situación fuera del estándar.



La función principal del mantenimiento preventivo es conocer el estado actual de los equipos mediante los registros de control llevados en cada uno de ellos, y en coordinación con el departamento de programación, para realizar la tarea preventiva en el momento más oportuno.

El mantenimiento preventivo se puede clasificar en dos versiones, una de ellas basada en el tiempo, es decir, en la frecuencia de inspección, y la segunda basada en la condición de desgaste (o denominada condición de estado), encontrada en la última revisión.

El mantenimiento preventivo se puede clasificar en dos versiones, una de ellas basada en el tiempo, es decir, en la frecuencia de inspección, y la segunda basada en la condición de desgaste (o denominada condición de estado) encontrada en la última revisión. Ambas metodologías permiten fijar con antelación la próxima inspección a que tuviere lugar en el elemento o máquina.

El primero de los métodos conduce al mantenimiento preventivo sistemático, y el segundo implica el mantenimiento preventivo condicional. Con el último se logra maximizar la vida útil del elemento y se consigue reducir los costos de mantenimiento. Ambas metodologías se basan en la permanente inspección y análisis crítico de las condiciones (Gude@, 1998).

Sus principales ventajas frente a otros tipos de tareas de mantenimiento son: Evita averías mayores como consecuencia de pequeñas fallas. Prepara las herramientas y repuestos. Aprovecha realizar las reparaciones en el momento más oportuno tanto para producción como para mantenimiento. Distribuye el trabajo de mantenimiento optimizando la cuadrilla de reparación. Y disminuye la frecuencia de los paros, pero los aprovecha para realizar varias reparaciones diferentes al mismo tiempo (Navarro y otros, 1997).

La secuencia de pasos para implementación, desarrollo, plan de inspecciones, rutas lógicas, programa de chequeos, etc., en las acciones preventivas, debe tener en cuenta los parámetros que se listan a continuación:

Algunos aspectos relevantes de las tareas o acciones preventivas.

CUADRO 22.1

Selección de maquinaria o equipos críticos:	
Criterios por los cuales se considera crítico	
Análisis de las variables críticas	
Sistemas de medición de las variables	
Inspección y periodicidad de las variables	
Rutas lógicas	
Codificación	
Se estudia un patrón de medida:	
Horas de funcionamiento	
Número de unidades producidas	
Tiempo calendario	
Ciclos de trabajo	
Horas de funcionamiento de la planta	
Kilómetros recorridos, etc.	
El valor de las variables depende del factor determinante del mantenimiento preventivo así:	
	Regularidad de la producción (plantas de producción)
	Continuidad del servicio (atención al usuario)
	Seguridad del servicio (seguridad de personas)
	Limitaciones técnicas (bajo rendimiento)
	Prestigio del producto (control de calidad)
	Otro parámetro relevante
Se adopta un límite de vida útil en servicio que puede ser:	
Durante el límite de vida útil:	
	Inspecciones periódicas
	Inspecciones menores
	Inspecciones mayores
	Recorrido parcial
	Trabajos de mantenimiento:
	Accidental
	Tareas periódicas
	Tareas programadas
Al término del límite de vida útil:	
	Ajuste o recambio del elemento
Se aplica a máquinas o instalaciones:	
Estructuras integrales	
Plantas de potencia	
Cualquier sistema, máquina o elemento que tenga fallas y causas raíces.	
Equipos, sistemas fijos	
Componentes accesorios	

Es importante señalar que las diferentes acciones requieren mayor grado de herramientas técnicas o avanzadas, en la medida en que crecen de nivel desde correctivo, pasando por modificativas, tomando las preventivas y, por último, las predictivas.



Es importante señalar que las diferentes acciones requieren mayor grado de herramientas técnicas o avanzadas, en la medida en que crecen de nivel desde correctivo, pasando por modificativas, tomando las preventivas y por último las predictivas.

Por ejemplo, en las reparaciones correctivas basta con herramientas básicas y con algunos instrumentos avanzados genéricos ocasionales. Ya en las acciones modificativas se requiere usar no sólo los instrumentos básicos, sino que se necesitan algunos de los instrumentos avanzados genéricos y específicos, en especial análisis de fallas, *FMECA*, *RPN*, etc.

Las acciones preventivas y predictivas usan la mayoría de los instrumentos básicos y genéricos. En especial, las tareas proactivas de orden predictivo usan, aparte de las anteriores y con mayor énfasis, los instrumentos avanzados específicos de orden técnico descritos en secciones previas.

Situaciones de las acciones preventivas.

GRÁFICO 22.3



Las inspecciones siempre son previas al ciclo A de vida útil, y la sustitución o el ajuste de la función se realiza en el tiempo S previo a la entrada en situación fuera del estándar, o de falla real o potencial.

Las acciones preventivas se basan en analizar periódicamente el estado de los elementos de las máquinas para planear, de una forma lógica, las tareas proactivas. Su gran ventaja consiste en que permite organizar las actividades en forma anticipada con lo cual se optimizan los recursos.

Los métodos más usuales para este tipo de mantenimiento son: control de vibraciones, control de temperatura, termografía, inspección visual, control de fisuras, teoría de vibraciones, rayos x, control de corrosión, etc. Normalmente las inspecciones y mediciones son de orden cualitativo más que cuantitativo.

Entre las formas como pueden aparecer las acciones preventivas sobresalen: el denominado de uso, que consiste en que el mismo operario vela constantemente por todas las funciones sencillas de mantenimiento, de modo que puede anticiparse a graves averías. El *Hard Time* que se basa en revisiones constantes en ciertos intervalos de tiempo en que se examinan ciertas variables de operación y del equipo. De allí se desprende el estado actual la programación de las tareas planeadas. Y, por último, un mantenimiento preventivo muy evolucionado que sólo usa herramientas avanzadas específicas de orden técnico denominado predictivo (Wireman, 2004; Ávila, 1992 y Patton, 1995).

22.4 ACCIONES PREDICTIVAS

La revisión y el estudio permanentes de las variables⁶ internas o externas, asociadas (directa o indirectamente) al proceso de operación de una máquina, permite diagnosticar el comportamiento futuro en tiempo real de la posible aparición de fallas o situaciones fuera de las condiciones estándar, con el fin de evitarlas a toda costa y alargar los períodos de funcionalidad del equipo y, por ende, de la vida útil total.

El mantenimiento predictivo estudia la evolución temporal de ciertos parámetros para asociarlos a la ocurrencia de fallas, con el fin de determinar en qué período de tiempo esa situación va a generar escenarios fuera de los estándares, para planificar todas las tareas proactivas con tiempo suficiente, para que esa avería no cause consecuencias graves ni genere paradas imprevistas de equipos.

La predicción del comportamiento de los parámetros se hace por medio de las ciencias matemáticas, estadísticas, proyectivas, prospectivas, correlacionales, aleatorias, univariantes o multivariantes, etc. Una de sus características más importantes es que no debe alterar el funcionamiento normal de la planta mientras se está aplicando.

La inspección y la evaluación de los parámetros se pueden realizar en forma periódica, o en forma continua, dependiendo de diversos factores como son: el tipo de planta, los tipos de fallas por diagnosticar y la inversión que se quiera realizar.

Las acciones predictivas usan en forma exhaustiva y excluyente (o compartida) todos los instrumentos específicos de orden técnico de mantenimiento, como los básicos y avanzados genéricos en toda su



Las acciones preventivas se basan en analizar periódicamente el estado de los elementos de las máquinas, para planear de una forma lógica las tareas proactivas. Su gran ventaja consiste en que permite organizar las actividades en forma anticipada, con lo cual se optimizan los recursos.

Entre las formas como pueden aparecer las acciones preventivas sobresalen: el denominado de uso que consiste en que el mismo operario vela constantemente por todas las funciones sencillas de mantenimiento, de modo que puede anticiparse a graves averías.

⁶ Presión, temperatura, corrosión, desgaste, etc.



La inspección y la evaluación de los parámetros se pueden realizar en forma

periódica, o en forma continua, dependiendo de diversos factores como son: el tipo de planta, los tipos de fallas por diagnosticar y la inversión que se quiera realizar.

El mantenimiento predictivo basa sus principios en el conocimiento permanente del estado y la operatividad de los equipos, mediante la medición de diferentes variables. El control que se tiene de estas variables determina la utilización del predictivo.

plenitud. La condición de estado, que es otra de las denominaciones que se dan a las tareas proactivas de índole predictivo, consiste en la parametrización y el análisis futuro del comportamiento de los parámetros relevantes de las máquinas asociados a los estados de falla *SoFa*.

El mantenimiento predictivo basa sus principios en el conocimiento permanente del estado y la operatividad de los equipos, mediante la medición de diferentes variables. El control que se tiene de estas variables determina la utilización del predictivo.

La principal ventaja radica en la velocidad de detección de la avería (en forma anticipada y temprana al hecho), mientras que en otros casos sólo es posible establecer una frecuencia. A su vez, las acciones predictivas incorporan algunas variables que aumentan la información del estado de los equipos. La cantidad de información que proporciona este tipo de mantenimiento, sumado a la rapidez con que se mida la información, supera ampliamente a las acciones de mantenimiento descritas anteriormente (Navarro y otros, 1997).

Entre las técnicas descritas en secciones anteriores, las acciones predictivas utilizan bastante la metodología de predicciones bajo modelos clásicos y/o AR.I.MA. de series temporales (Mora, 2007c).

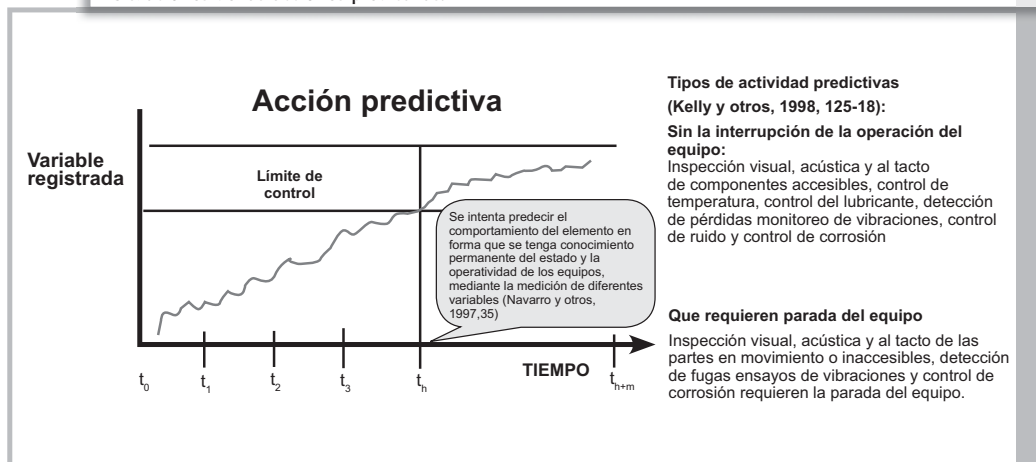
Algunas de las ventajas del mantenimiento predictivo son:

- Reduce el tiempo de parada al conocerse exactamente el órgano que falla.
- Permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo.
- Optimiza la gestión del personal de mantenimiento.
- Realiza la verificación de la condición de estado y monitoreo en tiempo real de la maquinaria, tanto la que se realiza en forma periódica como la que se hace de carácter eventual.
- Maneja y analiza un registro de información histórica vital a la hora de la toma de decisiones técnicas en los equipos.
- Define los límites de tendencia relativos a los tiempos de falla o de aparición de condiciones no estándar.
- Posibilita la toma de decisiones sobre la parada de una línea de máquinas en momentos críticos.
- Facilita la confección de formas internas de funcionamiento, o compra de nuevos equipos.
- Provee el conocimiento del historial de actuaciones, para ser utilizado por el mantenimiento correctivo.

- Facilita el análisis de las averías.
- Aplica el análisis estadístico del sistema.

Situaciones de las acciones predictivas.

GRÁFICO 22.4



El principal inconveniente del mantenimiento predictivo es económico. Para cada máquina es necesaria la instalación de equipos de medición de parámetros que puedan ser: presión, pérdidas de carga, caudales, consumos energéticos, caídas de temperatura, ruidos, vibraciones, agrietamientos, etc. (Latino@, 1999a; Latino, 1999b y De Groote, 1994).

Las acciones de mantenimiento, sean planeadas o no (como las modificativas y las correctivas), no son ni buenas ni malas en sí mismas. Sólo llegan a ser más adecuadas unas que otras en la medida en que se realicen a partir de una táctica dada (*TPM*, *RCM*, combinada, clase mundial, reactiva, proactiva, etc.). Y de unos criterios técnicos que permitan establecer si la estrategia utilizada es la más económica y conveniente a la luz del *LCC* y de los beneficios obtenidos en confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad por unidad económica invertida en ese tipo específico de acción (correctiva, modificativa, preventiva y/o predictiva).

Las acciones se deben seleccionar a la luz de los requerimientos de los cuatro niveles y en especial del grado de desarrollo que tenga la empresa en cuestión, en el nivel instrumental, pues es este último el que condiciona la viabilidad de la aplicación de reparaciones o mantenimientos.



Las acciones de mantenimiento, planeadas o no, no son ni buenas ni malas en sí mismas. Sólo llegan a ser más adecuadas unas que otras en la medida que se realicen a partir de una táctica dada (*TPM*, *RCM*, combinada, clase mundial, reactiva, proactiva).

CAPÍTULO 23

NIVEL TÁCTICO

23.1 NIVEL TÁCTICO

El nivel tres del enfoque sistémico kantiano de mantenimiento se refiere a las diferentes formas de organización que pueden adoptar las empresas, para manejar y operar el mantenimiento.

La táctica es la forma como las diferentes compañías organizan la ejecución y la administración del mantenimiento de una forma coherente, lógica y sistémica. La implementación de una táctica implica la existencia de normas, leyes, reglas que gobiernan la forma de actuar. Existen diferentes alternativas internacionales de tácticas. Entre ellas sobresalen: TPM, RCM, TPM y RCM combinados, PMO, proactiva, reactiva, clase mundial, por objetivos, etc., y en especial la propia táctica que cada organización construye a través del tiempo. Se resalta que ninguna táctica es buena, mala o mejor que otra per se, pues cada una es beneficiosa en la medida en que sea la más adecuada para las circunstancias y el tiempo que viva la empresa donde se implementa.

Para que una empresa alcance el nivel tres (táctico) debe manejar con suficiencia la mayoría de los instrumentos básicos, avanzados genéricos y específicos de mantenimiento y debe comprender las diferentes acciones factibles de realizar. En el evento en que desee implementar cualquiera de las tácticas y tenga falencias en el nivel instrumental, es necesario devolverse hasta superar la implementación de las herramientas específicas requeridas para su implementación.



El nivel tres del enfoque sistémico kantiano de mantenimiento se refiere a las diferentes formas de organización que pueden adoptar las empresas, para manejar y operar el mantenimiento.

La táctica es la forma como las diferentes compañías organizan la ejecución y la administración del mantenimiento de una forma coherente, lógica y sistémica.

Al igual que en el nivel dos, las diferentes tácticas no son por sí mismas buenas ni malas. Serán exitosas o no en la medida en que logren alcanzar las metas de la compañía, de acuerdo con su visión y misión, con rangos atractivos de CMD, bajos costos LCC y un grado de desarrollo tecnológico (Smith, 1983) y de mercadeo importante. Todo en el marco de una planeación de largo plazo, con planes específicos de mantenimiento que integren los cuatro niveles de una forma coherente.

23.2 IMPLICACIONES DE LAS DIFERENTES CLASES DE TÁCTICAS DE MANTENIMIENTO



Para que una empresa alcance el nivel táctico debe manejar con suficiencia la mayoría de los instrumentos básicos, avanzados genéricos y específicos de mantenimiento, y debe comprender las diferentes acciones factibles de realizar.

En gran parte, la selección de la táctica que se va a implementar debe partir de la premisa de la fase en que se encuentran, en la curva de la bañera, los equipos importantes, las líneas de producción y, sobre todo, la empresa en conjunto.

La selección de una táctica se hace con base en las necesidades específicas de cada empresa. Para esto existen suficientes diferencias y alternativas entre las diferentes opciones. Lo importante es que la táctica seleccionada sea afín a los dos primeros niveles de mantenimiento, y que la táctica siga un lineamiento estratégico de cuarto nivel.

De por sí, la escogencia individual de una táctica es indiferente del momento y el estado que viva la empresa. Puede llegar a ser uno de los grandes pecados estratégicos que conduzcan a resultados deficientes de mantenimiento en el mediano o en el largo plazos.

Se debe proceder con un diagnóstico inicial integral con alguna de las dos herramientas propuestas (JA o *Flash Audit*) o con otra similar, para determinar el nivel actual de desarrollo. Se debe tener muy claro con qué instrumentos se cuenta y cuáles faltan por desarrollar. Y, en especial, se debe tener un panorama claro de la ubicación física¹ de los equipos relevantes y/o críticos en sus curvas de tasas de fallas. De tal forma que haya coherencia entre los estados de los equipos y la táctica que se desea implementar.

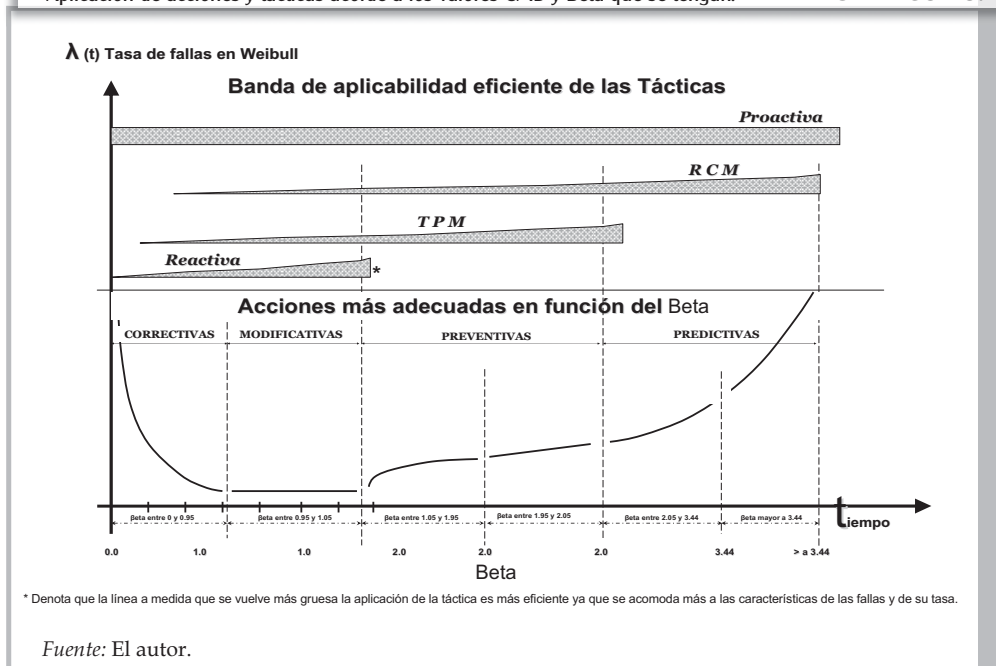
En gran parte, la selección de la táctica que se va a implementar debe partir de la premisa de la fase en que se encuentran, en la curva de la bañera, los equipos importantes, las líneas de producción y, sobre todo, la empresa en conjunto.

De acuerdo con las características de comportamiento de las fallas, de la tasa de fallas y reparaciones, se plantean diferentes alternativas de aplicabilidad eficiente tanto para las cuatro acciones de mantenimiento como para las tácticas más usadas. Este factor es vital en la selección de la táctica acorde con el momento CMD que viva la empresa.

1 Tener una medición clara de los diferentes valores CMD de los equipos en la curva de la bañera, ya que de acuerdo con ello se puede diagnosticar la preferencia en sí de una táctica.

Aplicación de acciones y tácticas acorde a los valores CMD y Beta que se tengan.

GRÁFICO 23.1



23.2.1 TPM, mantenimiento productivo total

Las industrias japonesas, después de la Segunda Guerra Mundial, determinan que para competir eficazmente en el mercado internacional deben mejorar la calidad de sus productos. De esta forma se importan del continente americano técnicas de manufactura y de administración, las cuales adaptan rápidamente a sus sistemas industriales.

Entre los conceptos importados se encuentra el mantenimiento preventivo, al que posteriormente le incorporan otros conceptos, como mantenimiento productivo, prevención del mantenimiento, ingeniería de confiabilidad, etc. Con lo cual modifican en forma radical el ambiente industrial japonés para conformar lo que se conoce como *TPM* (mantenimiento productivo total), algunas veces definido como mantenimiento productivo implementado por todos los empleados, basado en que la mejora del equipo debe involucrar a todos los funcionarios de la organización, desde los operadores hasta los empleados de la alta dirección (Nakajima y otros, 1991 y Rey, 2003).

La introducción del *TPM* en la fábrica debe contar con el apoyo de la alta dirección para incorporarlo en las políticas básicas de la compañía, y concretar metas, tales como incrementar el período de uso del equipo a más del 80%, reducir las fallas en al menos un 50%, entre otros.



La introducción del *TPM* en la fábrica debe contar con el apoyo de la alta dirección para incorporarlo en las políticas básicas de la compañía, y concretar metas, tales como incrementar el período de uso del equipo a más del 80%, reducir las fallas en al menos un 50%, entre otros.

La mejora continua que involucra el *TPM* desarrolla en las organizaciones: la innovación, la mejora continua propiamente dicha y el mantenimiento de estándares y su superación.

Una vez que se establecen las metas, cada empleado debe entender, identificar y desarrollar las actividades de pequeños grupos en el lugar de trabajo, que aseguren el cumplimiento de los objetivos de la empresa. En *TPM* los grupos pequeños establecen sus propios alcances basados en las metas globales (Tsuchiya, 1995 y Yamashina, 1995 y Rey, 2003). La calidad es un aspecto fundamental y muy ligado al *TPM* (Wakefield, 1985).

La implementación de un programa de *TPM* se puede lograr en intervalos de tiempo que van desde uno hasta tres años. Para eso requiere un plan marco que sirve como plan de trabajo en el desarrollo de las actividades que se pueda dividir en etapas, de tal manera que los pequeños grupos adecuen sus funciones en cada nivel.

Los pasos específicos para desarrollar el programa de *TPM* deben ser desarrollados por cada compañía, es decir, ajustados a sus propios requerimientos. Hay cinco metas interdependientes (Nakajima, y otros, 1991 y Nakajima5S@, 2005) que representan los mínimos requerimientos para desarrollar el programa *TPM*:

- Mejora en la eficacia del equipo.
- Mantenimiento autónomo por los operadores.
- Un plan de mantenimiento administrado por el departamento de mantenimiento.
- Entrenamiento para mejorar las destrezas y operaciones de mantenimiento.
- Un programa de administración del equipo para prevenir problemas que ocurran durante nuevas instalaciones o arranque de máquinas.

La mejora continua que involucra el *TPM* desarrolla en las organizaciones: la innovación, la mejora continua propiamente dicha y el mantenimiento de estándares y su superación. Rey Sacristán define *TPM* como el conjunto de disposiciones técnicas, medidas y actuaciones que permiten garantizar que las máquinas, instalaciones y organización que conforman un proceso básico o línea de producción, puedan desarrollar el trabajo que tienen previsto en un plan de producción en constante evolución por la aplicación de la mejora continua (Nakajima y otros, 1991 y Nakajima5S@, 2005).

El principal objetivo del *TPM* es cuidar, y utilizar los sistemas productivos, manteniéndolos en su estado base (de origen o de referencia)², y aplicando sobre ellos mejora continua.

El *TPM* procura cuatro principios fundamentales: satisfacción del cliente, dominio de los procesos y sistemas de producción, implicar a personas a través del mantenimiento autónomo y el aprendizaje y la mejora continua (Rey, 1996, 2003).

2 Estado de referencia, procura mantener características de: tiempos de vida útil, parámetros de proceso, de engrase, de calibración, de electricidad, de calidad, mecánicos, hidráulicos, etc.

El efecto del *TPM* sobre una organización consiste en que pretende eliminar las averías y los problemas periódicos repetitivos, para lograr una buena disponibilidad y operatividad mediante la metodología de análisis de pérdidas en seis fases: averías, reglajes, falta de piezas o corta vida de elementos, tiempo de vida útil de elementos más cortos que lo esperado, defectos de proceso y rendimiento reducido entre la operación y su estabilidad.

Los pilares básicos del *TPM* son el mantenimiento planeado, la ingeniería de mantenimiento, los grupos que procuran elevar los indicadores CMD y la mejora técnica continua. Como táctica es la más básica de todas y es la pionera en este campo. Sus dos grandes propósitos son elevar la productividad y aunar esfuerzos del personal de producción alrededor del mantenimiento, aglutinando todo el recurso humano alrededor de la gestión y la operación del mantenimiento. Los pasos básicos para su implementación son:

23.2.2 Pilares del TPM

Son los puntos de apoyo vitales del *TPM* para ser implementado, lo cual se logra con una metodología con mucho orden y disciplina (PilaresTPM@, 2006); son:

- *Mejoras enfocadas*: Son el conjunto de diferentes tareas por realizar en grupos de personas, que permiten optimizar la efectividad de los equipos, plantas y procesos. Su esfuerzo radica en evitar cualquiera de las 16 pérdidas existentes en las empresas.
- *Mantenimiento autónomo*: Se basa en la activa participación de los operarios y del personal de producción en mantenimiento, y consiste en que éstos realizan algunas actividades menores de mantenimiento (de baja o mediana tecnología), a la vez que conservan el sitio de trabajo en estado impecable.
- *Mantenimiento planificado*: El personal realiza acciones predictivas, preventivas y de mejoramiento continuo, que permiten evitar fallas en los equipos o sistemas de producción.
- *Mantenimiento de la calidad*: Se trata de mantener las condiciones óptimas de funcionalidad de los equipos, con el fin de no desmejorar la calidad de los productos en esos momentos en que se inicia y se mantiene la no funcionalidad adecuada de las máquinas o equipos.
- *Mantenimiento temprano, prevención del mantenimiento*: Son todas las tareas de la fase de diseño, construcción, montaje y operación de los equipos, que permiten garantizar la calidad de la operación y de los productos o bienes que generan las máquinas. Pretende elevar y mantener al máximo posible la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos.



El *TPM* procura cuatro principios fundamentales:

satisfacción del cliente, dominio de los procesos y sistemas de producción, implicar a personas a través del mantenimiento autónomo y el aprendizaje y la mejora continua.

Los pilares básicos del *TPM* son el mantenimiento planeado, la ingeniería de mantenimiento, los grupos que procuran elevar los indicadores CMD y la mejora técnica continua. Como táctica es la más básica de todas y es la pionera en este campo.

- *Mantenimiento de las áreas administrativas:* Se trata de que las áreas de apoyo logístico a operación, producción y mantenimiento sean las más adecuadas para evitar pérdidas. Dichas áreas son el ADT, LDT, LDT y otras, utilizadas con el fin de mejorar los procesos administrativos y de operación indirecta.
- *Entrenamiento, educación, capacitación y crecimiento:* Se trata de establecer políticas que permitan que todos los empleados de producción y de otras áreas de la compañía, que inciden en la ingeniería de fábricas, se mantengan educados, entrenados, motivados, etc., con las mejores prácticas internacionales y que permanentemente estén creciendo en lo personal e institucional.

De esta forma se pueden evitar o solucionar problemas de una manera eficaz, pues se busca que todos los empleados conozcan el funcionamiento de cada máquina, que detecten la incidencia de la funcionalidad de las máquinas en la calidad de los productos y que posean en todo momento las mejores habilidades y competencias para su trabajo.

- *Seguridad, higiene y medio ambiente:* Por medio de la aplicación de los instrumentos de mejoramiento continuo y 5S, se garantiza la inexistencia o la minimización de accidentes laborales o industriales. Se procura que todo el personal sea capaz de prevenir y evitar riesgos, de mantener unas condiciones adecuadas de higiene y seguridad en el puesto de trabajo y en las áreas productivas, y pretende proteger y conservar el medio ambiente.

Plan maestro para la aplicación de una táctica TPM en una empresa.

CUADRO 23.1

I. FASE: INTRODUCCIÓN PREPARACIÓN. (Etapa 1 a 5)	
	ETAPA 1. DECLARACIÓN DE INTRODUCCIÓN DE TPM La alta dirección de la compañía proclama su decisión de iniciar el proceso de aplicación del TPM.
	ETAPA 2. CAMPANA DE EDUCACIÓN EN TPM Se le da entrenamiento al personal de apoyo logístico y se hacen acciones de divulgación para todos los empleados.
	ETAPA 3. FORMACIÓN DE COMITÉS Y EQUIPOS TPM Se forman comités de promoción de TPM y se establecen los vínculos con otros departamentos de la compañía.
	ETAPA 4. FIJACIÓN DE PRINCIPIOS Y METAS Se hacen comparaciones con otras empresas respecto a las metas y se muestran los logros que se deben alcanzar al final.
	ETAPA 5. PREPARACIÓN DE UN PLAN MAESTRO El plan contempla la preparación, la evaluación de metas intermedias y la evaluación de objetivos a lograr al final de la implantación de cada pilar.
II. FASE: INICIO DE INTRODUCCIÓN (Etapa 6)	
	ETAPA 6. INAUGURACIÓN DE TPM Ceremonia donde participan todos los miembros de la compañía, proveedores, filiales y otros. La dirección de la compañía declara formalmente el inicio de la implementación.

Continuación

CUADRO 23.1

III. FASE: EJECUCIÓN (Etapa 7 A 11)	
	ETAPA 7. ESTABLECER UN SISTEMA DE ALTO DESEMPEÑO ENFOCADO A LA PRODUCCIÓN Se inicia la realización de los cuatro pilares básicos: 1. Aumentar La Eficiencia En Los Procesos Y Equipos 2. Mantenimiento Autónomo 3. Mantenimiento Programado 4. Capacitación en la operación y mantenimiento de equipos
	ETAPA 8. ESTABLECER UN SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE NUEVOS EQUIPOS, PRODUCTOS O ELEMENTOS AL SISTEMA TPM
	ETAPA 9. ESTABLECER UN SISTEMA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD
	ETAPA 10. ESTABLECER UN PROCESO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA EN LAS ÁREAS DE ADMINISTRACIÓN Y SUPERVISIÓN
	ETAPA 11. ESTABLECER UN SISTEMA DE LA SEGURIDAD E HIGIENE (ISO 18000) Y DEL MEDIO AMBIENTE (ISO 14000)
IV. FASE: ESTABILIZACIÓN (Etapa 12)	
	ETAPA 12. IMPLEMENTACIÓN COMPLETA DE TPM EN EL LOGRO DE LAS METAS PROPUESTAS, BÚSQUEDA DEL PREMIO TPM Y REPLANTEAR NUEVOS OBJETIVOS - MONITOREO TOTAL DEL PLAN Y APLICACIÓN DEL TPM

El *TPM* desempeña una labor importante en la motivación para la implementación de la primera táctica (cuando se desea progresar del nivel dos operacional de mantenimiento e ingresar en el nivel táctico tres). Y es la base de otras tácticas, como el *RCM* o la proactiva. Puede presentar algunas limitaciones cuando se trata de equipos de alta tecnología, caso en el cual se recomienda combinarla con *RCM* (Rath@, 1999 y Marks, 1997).

El *TPM* básicamente usa las acciones correctivas, modificativas, preventivas y esporádicamente las predictivas (el *RCM* es el que enfatiza más en ellas). Es una táctica netamente de perfil humanista muy útil para empresas con situaciones difíciles en el recurso humano en producción y mantenimiento. Y es una metodología ideal para empresas en proceso de crecimiento rápido y con deficiencias en el clima organizacional.

RCM, Mantenimiento centrado en la confiabilidad

El *RCM* se puede definir como un proceso usado para determinar lo que debe hacerse para asegurar que cualquier recurso físico continúe realizando lo que sus usuarios desean que realice en su producción normal actual (Moubray@, 2001, 2004).

La filosofía del *RCM* se fundamenta en:

- Evaluación de los componentes de los equipos, su estado y su función.



El *TPM*
desempeña una
labor importante
en la motivación
para la implementación
de la primera táctica
(cuando se pasa del nivel
dos operacional al nivel
táctico tres), y es la base
de otras tácticas, como el
RCM o la proactiva.



El mantenimiento centrado en confiabilidad es una filosofía de gestión de mantenimiento, que sirve de guía para identificar las actividades de mantenimiento, con sus respectivas frecuencias a los activos más importantes de un contexto operacional.

El RCM es una técnica de organización de las actividades y de la gestión del mantenimiento, para desarrollar programas organizados que se basan en la confiabilidad de los equipos, en función de su diseño y de su construcción.

- Identificación de los componentes críticos.
- Aplicación de las técnicas de mantenimiento proactivo y predictivo.
- Chequeo en sitio y en operación del estado corpóreo y funcional de los elementos, mediante revisión y análisis permanentes.

El mantenimiento centrado en confiabilidad es una filosofía de gestión de mantenimiento, que sirve de guía para identificar las actividades de mantenimiento con sus respectivas frecuencias a los activos más importantes de un contexto operacional.

Ésta no es una fórmula matemática. Su éxito se apoya principalmente en el análisis funcional de las fallas de un determinado contexto operacional realizado por un equipo de trabajo multidisciplinario, el cual desarrolla un sistema de gestión de mantenimiento flexible que se adapta a las necesidades reales de mantenimiento de la organización, tomando en cuenta la seguridad personal, el ambiente, las operaciones y la relación costo-beneficio (Jones, 1995).

El RCM es una técnica de organización de las actividades y de la gestión del mantenimiento para desarrollar programas organizados que se basan en la confiabilidad de los equipos, en función de su diseño y de su construcción. El RCM asegura un programa efectivo de mantenimiento que se centra en que la confiabilidad original inherente al equipo se mantenga (Marks, 1997).

Los objetivos del RCM son los siguientes:

- Eliminar las averías de las máquinas.
- Suministrar fuentes de información de la capacidad de producción de la planta a través del estado de sus máquinas y equipos.
- Minimizar los costos de mano de obra de reparaciones, con base en el compromiso, por parte de los responsables del mantenimiento, en la eliminación de fallas de máquinas.
- Anticipar y planificar con precisión las necesidades de mantenimiento.
- Establecer horarios de trabajo más razonables para el personal de mantenimiento.
- Permitir a los departamentos de producción y de mantenimiento una acción conjunta y sincronizada, a la hora de programar y mantener la capacidad de producción de la planta.
- Incrementar los beneficios de explotación directamente mediante la reducción de los presupuestos del departamento de mantenimiento.

El RCM tiene numerosas ventajas en cuanto al aumento de la disponibilidad y confiabilidad de la maquinaria; a continuación se mencionan las más importantes:

- Crea un espíritu altamente crítico en todo el personal frente a condiciones de falla y averías.
- Logra importantes reducciones del costo del mantenimiento.
- Optimiza la confiabilidad operacional, maximiza la disponibilidad y/o mejora la mantenibilidad de las plantas y sus activos.
- Integra las tareas de mantenimiento con el contexto operacional.
- Fomenta el trabajo en grupo, lo cual se convierte en rutinario.
- Incrementa la seguridad operacional y la protección ambiental.
- Optimiza la aplicación de las actividades de mantenimiento, tomando en cuenta la criticidad y la importancia de los activos dentro del contexto operacional.
- Establece un sistema eficiente de mantenimiento preventivo.
- Aumenta el conocimiento del personal tanto de operaciones como de mantenimiento, con respecto a los procesos operacionales y sus efectos sobre la integridad de las instalaciones.
- Involucra a todo el personal que tiene que ver con el mantenimiento en la organización (desde la alta gerencia hasta los trabajadores de planta).
- Facilita el proceso de normalización a través del establecimiento de procedimientos de trabajo y de registro (Moubray, 2004).

Las limitaciones del RCM radican más que todo en el factor humano con que cuenta la organización, ya que de éste depende el éxito de la metodología. En este punto el equipo natural de trabajo juega un papel muy importante, debido a que será el único responsable de divulgar de manera correcta y eficiente esta filosofía de modo que las personas involucradas con el RCM no vean este cambio como un problema, sino como una solución a sus problemas³.

El equipo natural de trabajo será el que defina a qué equipos y componentes se les aplicará dicha filosofía, ya que no se puede esperar aplicar RCM a toda una planta y a todos sus equipos, pues sería un proceso demasiado lento e inoficioso. Por todo lo mencionado anteriormente, se debe tener demasiado cuidado a la hora de seleccionar las personas que conformarán el equipo natural de trabajo (Moubray, 2001).



El equipo natural de trabajo juega un papel muy importante, porque es el único responsable de divulgar de manera correcta y eficiente la filosofía según la cual las personas involucradas con el RCM no vean este cambio como un problema, sino como una solución a sus problemas.

3 Existen desarrollos que permiten evaluar la labor del RCM como un proceso empresarial, con índices para cada una de sus actividades se conoce como RCM *Balanced ScoreCard*.

Beneficios del mantenimiento centrado en confiabilidad.

CUADRO 23.2

Calidad	Tipo de servicio	Costo	Tiempo	Riesgo
Aumenta la disponibilidad en al menos un 8%, por el sólo hecho de implementar. Elimina las fallas crónicas y elimina causas raíces. Aumenta la flexibilidad operacional. La programación de mantenimiento se basa en hecho reales. Proporciona el completo conocimiento de las fallas reales y potenciales de las máquinas, así como de sus causas	Proporciona un mejor clima organizacional para el trabajo en equipo. Ayuda a entender mejor las necesidades y los requerimientos de los clientes. Disminuye las paradas imprevistas. Genera un ambiente de investigación y desarrollo al rededor de los análisis de fallas.	Reduce los niveles de mantenimiento al menos en un 40% Optimiza los programas de mantenimiento. Reduce los costos planeados o no de mantenimiento al menos en un 40%. Alarga la vida de los equipos para propósitos especiales. Todas las actividades de mantenimiento se analizan en un contexto de costo/ beneficio.	Mejora los tiempos medios de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad al menos en un 25%. Aumenta los tiempos de funcionalidad de los equipos al menos en un 150% en promedio. Reduce o elimina los tiempos de demora en suministros o búsqueda de recursos o repuestos. Jerarquiza las actividades de mantenimiento, logrando su reducción en el tiempo.	Brinda seguridad e integridad ambiental en todo el desarrollo del proceso, a niveles muy superiores de los que se tienen antes de implementarlo. Las fallas con consecuencias sobre el medio ambiente o la seguridad son las que más se atacan y eliminan. Reduce al mínimo la posibilidad de fallas en cadena o superpuestas. Su razón de calificación al riesgo la hace como una de las tácticas más seguras.

Fuente: El autor.

Las siguientes son algunas acciones que se pueden diferenciar dentro del RCM:

- *Acción correctiva:* Reparación o remplazo sobre las fallas. El costo de control o detección de fallas excede los beneficios.
- *Acción preventiva:* Reparación o reemplazo sobre tiempos o ciclos.
- *Acción predictiva:* Se emplean condiciones de monitoreo para detectar fácilmente etapas de falla. Reemplazo o reparación sobre condición.
- Además de estas acciones, el mantenimiento centrado en la confiabilidad combina algunas actividades del mantenimiento proactivo para detectar y analizar la presencia de causas de falla, para reducirlas en un período determinado (Troyer@, 2001).

El RCM es una táctica procedimental que basa su esquema en el permanente cuestionamiento de las actividades de mantenimiento, y que sigue un proceso lógico, coherente y normativo; las preguntas a que da lugar son:

- ¿Funciones y parámetros asociados al equipo en su ambiente operacional normal actual?
- ¿De qué manera puede fallar y no cumplir las funciones anteriores?
- ¿Cuál o cuáles son las causas inmediatas o básicas? ¿Cuál es su causa raíz?
- ¿Qué pasa y qué impactos genera cada falla funcional?
- ¿Cuál es la importancia de cada falla?
- ¿Cómo se puede predecir, prevenir o eliminar cada falla?

- ¿Qué controles se deben ejecutar para controlar la falla, si no hay tareas que permitan anticiparse a ella o anularla?

Existen varios procedimientos de orden universal que plantean las normas y reglas que rigen la implementación del RCM. En sí son procedimientos parecidos, algunos con mayor validez o no, pero en el fondo apuntan a unos propósitos generales comunes.

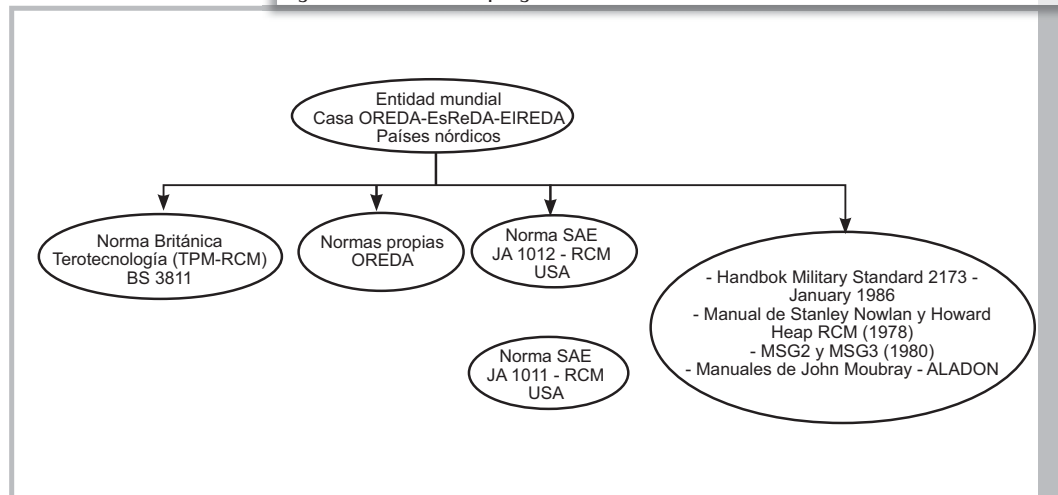
En la Web se presenta un modelo de ensayo sobre la unificación de normas, que pretende mostrar los elementos básicos y fines comunes de algunas de estas normas sobre RCM, que pueden verse en *Programa - Video RCM*⁴.



El RCM es una táctica procedimental que basa su esquema en el permanente cuestionamiento de las actividades de mantenimiento, y que sigue un proceso lógico, coherente y normativo.

Algunas de las normas que gobiernan el RCM

GRÁFICO 23.2



El desarrollo para la aplicación del RCM tiene en cuenta lo siguiente:

Ver en la Web el Programa - *Aplicación RCM fundamentada en normas SAE JA 1011 y 1012*

La utilización del procedimiento RCM se logra al ejecutar cada una de las siguientes etapas:

Ayuda en la



Video RCM
Aplicación RCM
fundamentada
en normas SAE
JA 1011 y 1012

- 4 Para poner en ejecución el video de RCM, accione el archivo denominado autorun.exe; cuando aparezcan las primeras imágenes en html, en la pantalla arriba a la izquierdo, le aparece un cuadro de fondo gris con línea superior verde, donde dice producido por Alberto Mora G. RCM Mil St 2173, coloque el mouse en el centro del lado izquierdo de este recuadro y le aparecerá una pequeña mano, donde le sale un letrero pequeño *reproducir*, haga allí doble click izquierdo del mouse y empezará la presentación.

Etapas de aplicación del RCM.

CUADRO 23.3

Pasos para la implementación

1. Formación del equipo natural de trabajo
2. Selección y definición de las áreas y equipos, restricción donde se implementará el RCM
3. Definición de criticidad y selección de los sistemas críticos, estableciendo sus funciones primarias, secundarias, auxiliares y de apoyo logístico
4. Análisis de las fallas funcionales reales o potenciales para cada una de las funciones
5. Realización del análisis de los modos y de los efectos de las fallas, para determinar los modos de fallos a que se tiene lugar en cada falla funcional para cada función (utiliza el procedimiento FMECA)
6. Selección de las estrategias y procedimientos de mantenimiento (árbol lógico de decisión)
7. Implantación y evaluación del CMD en cada caso.
8. Asigna estrategia y los recursos adecuados para el plan general de priorización asignado con base en el RPN y los costos/beneficios asociados a cada modo de falla.
9. Revisión y monitoreo periódico de todo el esquema general y específico

Pasos del procedimiento individual RCM (archivo RCM.xls de la Web.

CUADRO 23.4

1. Numere Tabla RCM
2. Ingrese Código Activo
3. Defina prioridad del Activo
4. En la hoja 1: Funciones primaria secundaria introduzca todas las funciones relevantes para evaluar
5. En la hoja 2: Fallas funcionales asigne todas las fallas funcionales a cada función descrita
6. En la hoja 3: Modos de fallas asigne éstos a cada falla funcional enunciada
7. En la hoja 4: Cálculos asigne las calificaciones respectivas de Severidad y Ocurrencia desde la columna H hasta la O inclusive, siguiendo las tablas y opciones mostradas, en las secciones múltiples de cada casilla, valore esto para todos los modos de falla de cada falla funcional en todas las funciones
8. En la columna R de la Hoja 4: Cálculos asigne la clase de falla según las opciones OREDA descritas en la opción múltiple dentro de la casilla.
9. Ejecute la Macro Priorizar de la columna U de la Hoja 4: Cálculos. El resultado obtenido es el plan de Acción jerarquizado con base en el valor del Riesgo.
10. Organice el árbol lógico de reparaciones y mantenimiento a ejecutar sobre las fallas, en la zona entre las columnas AA hasta AK, de tal manera que se pueda realizar en forma lógica y coherente, acorde con los recursos disponibles.
11. Una vez ejecutadas todas las acciones de mantenimiento, se debe volver a calificar los criterios de Severidad y Ocurrencia desde la columna AN hasta AU, luego se ejecuta la Macro Priorizar de la columna BA de la Hoja 4: Cálculos, para conocer los nuevos valores de riesgos.
12. Se asignan los valores de Costos y de CMD en las columnas BF a BM de la Hoja 4: Cálculos para determinar los parámetros estratégicos y encontrar los beneficios obtenidos con el RCM.
13. Reinicia el proceso después de un tiempo prudencial

Para realizar el ejercicio integral y específico del RCM, se pueden utilizar el modelo de ayuda RCM y el organizador, que se encuentran en la Web con las denominaciones *Programa - Formato Word RCM* y *Programa - Organizador RCM o FMECA*.

El RCM utiliza no sólo los cuatro tipos de acciones (correctivas, modificativas, predictivas, preventivas), sino la mayoría de los instrumentos avanzados específicos de orden técnico. Y se apoya en la mayoría de herramientas básicas y avanzadas genéricas; esta es la gran diferencia con el TPM, que es de enfoque social humanista, mientras que el RCM es básicamente técnico.

Ayuda en la



Formato Word
RCM
Organizador
RCM o FMECA

Etapas en la implementación global del RCM.

CUADRO 23.5

1. Planeación	1. Activos físicos bajo RCM
	2. Definir recursos físicos y humanos requeridos
	3. Define cronogramas de entrenamiento, realización, análisis, fechas y lugar de las personas.
	4. Estudiar integral y específicamente cada activo
2. Grupos de realización y revisión	1. Debe hacer personal de operación, mantenimiento e ingeniería de fábricas y de otras dependencias que soporten el proceso.
	2. Los núcleos o grupos primarios deben al menos tener seis personas: ingeniero supervisor de mantenimiento, ingeniero supervisor de producción, operario, mantenedor, experto externo y facilitador (preferiblemente externo)
3. Facilitadores	1. Análisis exhaustivo y excluyente con todo: funciones, fallas funcionales, modos de fallas, tareas, etc., en todos los equipos críticos y elementos clave.
	2. RCM entendido por todos
	3. Método de El Vaticano por consenso en forma rápido y ágil, con dosis motivacional.
	4. Calendario de trabajo con cumplimientos.
4. Resultados de análisis RCM	1. Planes de mantenimientos y reparaciones a ser efectuados.
	2. Rediseño de procesos de operación, validados, entendidos y practicados por quienes ejecuten.
	3. Involucran los mecanismos en el CMMS o programas manuales.
	4. Tareas descritas a cabalidad con conocimiento de causa de quienes las practicaban y practicarán.
	5. Modificaciones, con cálculos y estudios, responsables y fechas.
	6. Control de seguimiento de tareas y operaciones nuevas o rediseñadas en frecuencias
5. Auditoría e implementación	1. Revisión integral de nivel gerencial por cada activo terminado.
	2. Auditoría, costos, CMD.
	3. Revisión a la luz de las normas internacionales SAE JA101, SAE JA1012, OREDA, Military Standard y British Norm Standard 318
	4. Beneficios, limitaciones, cambios y su nueva aplicación.
	5. Revisión cada dos años de los activos con modificación o cambios en calidad repuestos, bajo control de la curva de Davies o de la Bañera.

Fuente: El autor.



La aplicación del RCM es muy útil en empresas con un gran clima organizacional, donde el recurso humano es motivado y consciente de la importancia del trabajo en equipo de mantenimiento y producción alrededor de las máquinas.

La combinación RCM y TPM tiene la ventaja de mejorar el proceso para facilitar el trabajo en equipo entre mantenimiento y las funciones de producción, mejorar la fiabilidad de las máquinas y reducir los costos de operación.

La aplicación del RCM es muy útil en empresas con un gran clima organizacional, donde el recurso humano es motivado y consciente de la importancia del trabajo en equipo de mantenimiento y producción alrededor de las máquinas. Esto hace posible aplicar el RCM, sin tener que haber desarrollado en forma previa el TPM, pero se requiere ese componente humano muy desarrollado en la empresa donde se desea aplicar el RCM sin el TPM.

Es muy recomendable que la organización esté madura en los niveles uno y dos de mantenimiento, con al menos unos cinco años de experiencia, para luego proceder a implementar alguna táctica.

23.2.3 Mantenimiento combinado TPM y RCM

La combinación RCM y TPM tiene la ventaja de mejorar el proceso para facilitar el trabajo en equipo entre mantenimiento y las funciones de producción, mejorar la fiabilidad de las máquinas y reducir los costos de operación. Ambas tácticas son complementarias, pues mientras el TPM mejora la productividad, el RCM aumenta la confiabilidad y la competitividad (Marks, 1997 y Moore@, 2008).

Los pilares básicos del TPM y algunas ideas sobre su relación con una estrategia RCM son:

- El TPM trata de restaurar el equipo a una condición parecida a la nueva, y ayuda a reducir al mínimo las fallas que ocurren en la etapa de mortalidad infantil, durante la instalación y puesta en marcha o a partir de ellas con la restauración del equipo y el cuidado básico por parte del operador, mientras el RCM erradica o controla las fallas.
- El TPM contribuye a la participación del operador en el mantenimiento del equipo. Sin embargo, el operador necesita el trabajo de especialistas cuando el problema en la maquinaria implica tecnologías más avanzadas. Dichos especialistas usan los principios del RCM para analizar los modos de fallas y sus efectos, y usan herramientas de monitoreo de condición como el análisis de vibraciones y otros instrumentos avanzados de mantenimiento que facilitan la identificación de la causa del problema.
- El TPM procura mejorar la eficacia y la eficiencia del mantenimiento, al igual que el RCM.
- El TPM exige que las personas se entrenen para mejorar sus habilidades de trabajo, mientras que el RCM ayuda a identificar las fallas del personal e indica las áreas que requieren entrenamiento.
- El TPM usa el control y la prevención del mantenimiento. Esto es inherente en el RCM que se encarga de identificar y evitar los modos de falla.
- El TPM intensifica el uso del mantenimiento preventivo, el RCM lo complementa al utilizar intensivamente el predictivo. El RCM ayuda a identificar cómo y cuándo

usar el mantenimiento preventivo o predictivo mediante el análisis de los modos de falla.

- La combinación de ambas modalidades de mantenimiento es una costumbre que se incrementa día a día en las empresas modernas, para mejorar y conservar los equipos y sus funciones. Con la combinación de las dos tácticas complementarias se logra evitar crisis y fallas en el proceso productivo, se minimizan los costos y se mejoran constantemente los procesos de planta.
- La relación clave entre *TPM* y *RCM* estriba en que sus principios clave de organización y confiabilidad se combinan, para garantizar una excelente operación y gestión de mantenimiento. El *RCM* sirve para determinar los requerimientos de mantenimiento para operaciones físicas con su correspondiente contexto operativo tecnológico. Y con el *TPM* se logra que estos requerimientos se difundan como los más efectivos y económicos (Geraghty, 1996).

La utilización conjunta de ambas tácticas permite alcanzar un manejo intensivo y exitoso de los instrumentos básicos y avanzados de mantenimiento, en especial del recurso humano (*TPM*) y de la tecnología (*RCM*). Su utilización progresiva al iniciar con *TPM* para lograr la superación del recurso humano, y luego el énfasis técnico y logístico del *RCM*, permiten una utilización extensiva de los dos niveles iniciales de mantenimiento. La combinación ideal es implementar el *TPM* y una vez logrado seguir con *RCM*, para posteriormente ingresar en una táctica proactiva (que las cobija a ambas) (Marks, 1997).

23.2.4 Mantenimiento proactivo

El mantenimiento proactivo es una táctica de mantenimiento dirigida fundamentalmente a la detección y la corrección de las causas que generan el desgaste y que conducen a la falla de la maquinaria. Una vez localizadas las causas que generan el desgaste, no se debe permitir que éstas continúen presentes en la maquinaria ya que, de hacerlo, su vida y desempeño se ven reducidos.

La longevidad de los componentes del sistema depende de que los parámetros de causas de falla sean mantenidos dentro de límites aceptables, utilizando una práctica de detección y corrección de las desviaciones, según el programa de proactivo. Límites aceptables significan que los parámetros de causas de falla están dentro del rango de severidad operacional, que conducirá a una vida aceptable del componente en servicio.

El proactivo se define como la metodología en la cual el diagnóstico y las tecnologías de orden predictivo son empleados para lograr aumentos significativos de la vida de los equipos y disminuir las tareas de mantenimiento, con el fin de erradicar o de controlar las causas de fallas de las máquinas. Mediante este mantenimiento lo que se busca es la causa raíz de la falla, no sólo el síntoma.



La relación clave entre *TPM* y *RCM* estriba en que sus principios clave de organización y confiabilidad se combinan para garantizar una excelente operación y gestión de mantenimiento.

El mantenimiento proactivo es una táctica de mantenimiento dirigida fundamentalmente a la detección y corrección de las causas que generan el desgaste y que conducen a la falla de la maquinaria.

El proactivo representa el próximo paso en la evolución hacia un mantenimiento planeado, y dentro de este procedimiento el personal de mantenimiento lleva estadísticas específicas sobre los equipos que se van a monitorear, para cumplir con los requerimientos necesarios (Fitch@, 2002).

La táctica proactiva evita elevados costos de inversión en mantenimiento y en reposición de maquinaria. Haciendo una analogía con el cuerpo humano, imagínese localizar y eliminar una enfermedad mucho antes de que los síntomas aparezcan, ahorra dinero en cuentas de hospitales y médicos y mantiene al paciente en buen estado de salud por un largo período de tiempo. Esta es la ventaja del proactivo sobre otras tácticas (Diagnetics@, 1998).

La revista *Fluidos, Oleohidráulica, Neumática y Automación* de la Organización Oiltech Análisis, en su artículo titulado *Mantenimiento proactivo de sistemas mecánicos lubricados*, publica:

“La causa raíz de las fallas resulta a partir de que una o más condiciones del sistema no estén normales, y causa una situación inestable en éste. Las condiciones no estándar que dan lugar a las fallas en sistemas mecánicos son las siguientes: excesiva contaminación del fluido, fugas del fluido, inestabilidad química, inestabilidad física, cavitaciones, inestable temperatura del fluido, condiciones severas de desgaste, desbalanceo, desalineación, deformación de materiales, entre otros. Si se asume que el fabricante diseña y construye la máquina en forma correcta, cualquier falla en la máquina puede ocurrir sólo cuando una de las causas raíces enunciadas anteriormente suceda.

Por lo tanto, la falla condicional depende totalmente de la existencia de una o más causas raíces en estado inestable en el sistema, en este estado condicional no se produce todavía una degradación del material; por lo tanto, el usuario no puede emplear ningún instrumento avanzado o técnico específico de mantenimiento (desgaste, vibraciones, etc.), que pueda predecir o detectar condiciones no estándar en el sistema. El usuario puede arreglar el estado inestable de las causas raíces de las fallas mediante técnicas proactivas. Como además no ha ocurrido ningún problema en el material, el usuario puede eliminar la causa de la inestabilidad y romper la cadena que conduce a la falla catastrófica.

Cuando ocurre una falla incipiente se produce una degradación de material, pero no se alcanza un estado en el cual el sistema se vea afectado. En otras palabras, el operario no es consciente de la pérdida de productividad del sistema. La única evidencia de la degradación del material que puede prevenir el desgaste, el ruido y/o las vibraciones es la metodología proactiva.

Si el usuario no ha corregido las causas raíces de la falla detectada, ésta es inminente. En este estado de falla el material se encuentra dañado y el rendimiento de la máquina es bajo.

Cuando la máquina alcanza este estado, el operario debe programar acciones planeadas de mantenimiento lo más pronto posible para evitar averías por rotura e intervenciones no planeadas.

En el caso de ignorar cualquier degradación del material o pérdida de rendimiento, lo más probable es que ocurra una falla en forma precipitada de la máquina. Este es un estado en el cual la degradación del material llega a ser grande, los elementos irreparables y la pérdida de comportamiento alta. En estas condiciones, la falla está al alcance de la mano y el sistema debe ser parado y revisado.

Finalmente, si se continúa la operación del equipo, se produce la falla catastrófica, donde la máquina pierde la funcionalidad y se requiere una reparación mayor de carácter urgente para que pueda volver a producir bienes o servicios” (Oiltech, 1995 Analysis, 1995).

El mantenimiento proactivo utiliza las acciones correctivas de acuerdo con la criticidad encontrada; y con sus efectos potenciales en los sistemas (Klusman, 1995) desarrolla acciones predictivas y preventivas de mantenimiento para detectar y analizar las causas de falla. A su vez, estas acciones incluyen un rediseño o modificación de los equipos para prevenir o eliminar los problemas una vez ocurran (Piotrowski@, 2001).

El mantenimiento proactivo recibe mucha atención en el mundo entero como uno de los medios más importantes para lograr ahorros insuperables por técnicas convencionales de mantenimiento. Al sustituir una filosofía reactiva del mantenimiento por una proactiva se evita seguir en las condiciones no estándar de falla y el desgaste prematuro de los equipos (Fitch@, 2002).

La integración de herramientas del *TPM* y *RCM* (que pueden utilizarse individualmente o combinados) se logra mediante la táctica proactiva.

Conjuntamente con el *TPM* y el *RCM* también se utiliza la mayoría de instrumentos básicos (en especial información, recurso humano, tecnología, información, planeación, etc.) y avanzados genéricos y específicos (particularmente todos los asociados a fallas). También maneja los indicadores *CMD*, con lo cual se puede deducir que es una táctica integradora de *TPM*, *RCM* y *TPM* y *RCM* en el tiempo (Klusman, 1995).

Los tres pasos para implementar la táctica proactiva, según *Tribology Data Handbook*, con el fin de lograr el éxito de la aplicación y lograr sus inmensos beneficios, son:

- Fijar metas o estándares basados en el análisis de causa raíz de las fallas, ya que, por definición, proactivo implica constante análisis, monitoreo y control de las fallas y de su causa raíz.
- El segundo paso es mantener el control de la causa raíz y conservarla en el tiempo de una manera sostenible.
- El tercer paso es la permanente vigilancia microscópica de los elementos de control de la causa raíz, para mantenerla dentro de las condiciones estándar y evitar de una manera disciplinada que ésta salga de ella.



El mantenimiento proactivo recibe mucha atención en el mundo entero como uno de los medios más importantes para lograr ahorros insuperables por técnicas convencionales de mantenimiento.

Estructura proactiva empresarial.

CUADRO 23.6

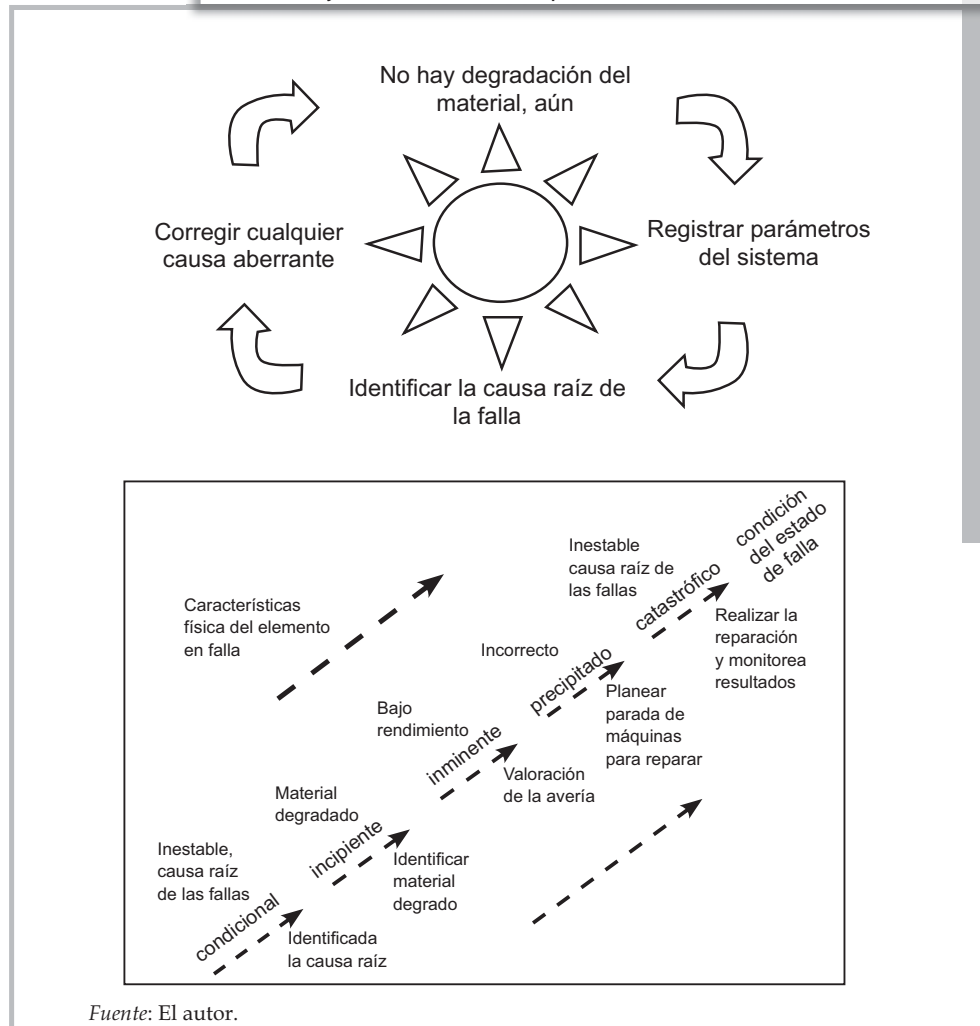
Filosofía o táctica de mantenimiento	Táctica de mantenimiento proactivo	
Categorías del mantenimiento	Acciones preventivas	Correctivas
Divisiones categóricas del mantenimiento, acciones o tareas	Planificado predictivo basado en condición	Averías Reparaciones
Organización	Planeado	No planeado
Plan presupuestal	Normal	Gastos extras

SKF enumera cuatro pasos en las aplicaciones de la táctica proactiva:

- Establecimiento de un sistema planeado de mantenimiento basado en confiabilidad y en el recurso humano, con utilización intensiva de métodos predictivos y preventivos.
- Diagnósticos y análisis de la causa raíz.
- Mejora a través de indicadores clave de rendimiento (KPI).
- Proceso de medición, revisión y monitoreo integral de la gestión y la operación industrial.

Ciclos de vida y actividades de la táctica proactiva.

GRÁFICO 23.3



El principal objetivo del mantenimiento proactivo es identificar y eliminar las causas básicas, inmediatas y raíces de las fallas. Es una táctica que trata de frenar las causas inmediatas por fallas incipientes en los sistemas o máquinas. El operario puede revisar todos los parámetros para determinar la estabilidad de la máquina e identificar si existen condiciones de falla. Es realmente una nueva dimensión dentro de la tecnología del mantenimiento. Requiere que el personal tenga un alto nivel de conocimiento y familiarización con la máquina.

El personal debe entender los principios de funcionamiento y las características de la máquina, con el objeto de identificar las causas raíces de la falla. En otras palabras, el personal de mantenimiento debe estar entrenado para reconocer condiciones defectuosas de funcionamiento.



El principal objetivo del mantenimiento proactivo es identificar y eliminar las causas básicas, inmediatas y raíces de las fallas. Es una táctica que trata de frenar las causas inmediatas por fallas incipientes en los sistemas o máquinas.

El resultado que produce la implementación de una táctica proactiva consiste en que se crea en la empresa un cambio en la conducta, que es el generador de innumerables ahorros para las empresas.

El resultado que produce la implementación de una táctica proactiva consiste en que se crea en la empresa un cambio en la conducta, que es el generador de innumerables ahorros para las empresas. Con esto la empresa sufraga su instalación e implementación y genera situaciones positivas como mejor imagen del cliente, mayor garantía de calidad de los equipos, superior confiabilidad en los equipos, alta seguridad y gran economía en los costos (Oiltech Analysis, 1995, 361-368).

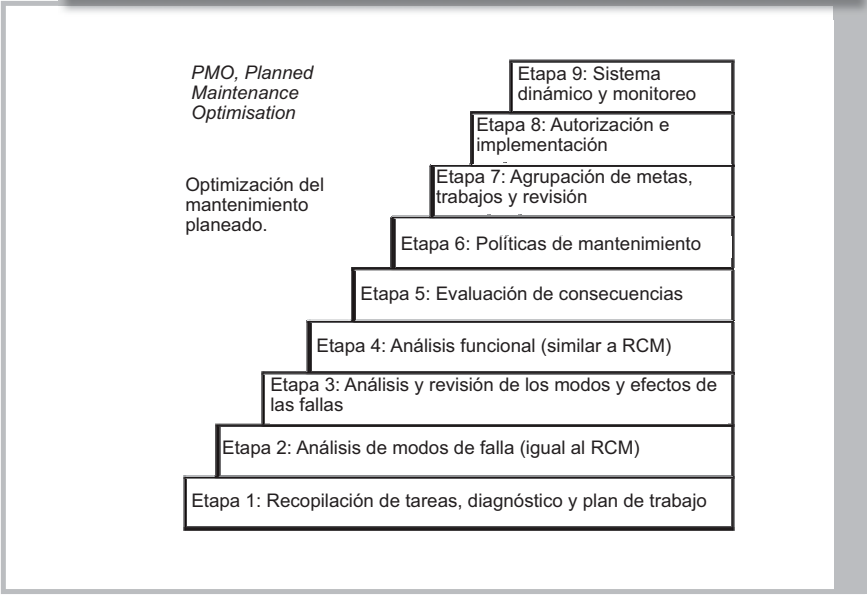
Las tareas proactivas (Moubray, 2004) están en el nivel dos de mantenimiento; el tratamiento de la táctica proactiva se logra al aplicar los conceptos enunciados con todas sus reglas, normas y condiciones expuestas en el nivel tres de mantenimiento.

Táctica PMO, *Planned Maintenance Optimisation*

El *PMO* aparece como una opción interesante donde, por su complejidad, no se ha logrado implementar muy bien el *RCM*. El *RCM* está muy recomendado en equipos o máquinas nuevas o que inician en una planta. Y en yuxtaposición el *PMO* es ideal para equipos o máquinas en funcionamiento.

Pasos del PMO.

GRÁFICO 23.4

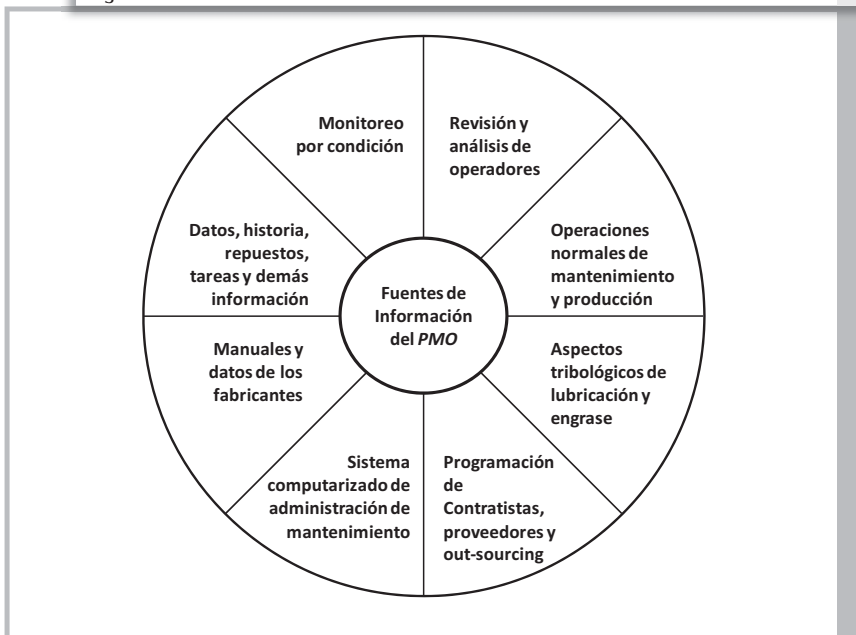


EL *PMO* es una metodología basada en el largo plazo y que trata el mantenimiento como un proceso y no como una función o división dentro de la compañía. Pretende, en general, mejorar la confiabilidad, la mantenibilidad, la confiabilidad y reducir las horas de trabajo necesarias para atender las necesidades de mantenimiento.

Un pilar fundamental del *PMO* es el buen manejo de la información en los aspectos de la recolección, el manejo y la obtención en tiempo real. Requiere excelente información para determinar los análisis de fallas en el nivel de función, falla funcional, modos de fallas, efectos y consecuencias de ellas. Aparte de que trabaja a partir de varios sistemas de planeación y programación de las tareas de mantenimiento, exige que toda la información sea sistematizada y centralizada en una sola plataforma de información. Y que contenga todos los parámetros de personal, administración y demás datos pertinentes sobre el recurso humano y los equipos (Turner@, 2007).

Orígenes de la información en PMO.

GRÁFICO 23.5



El *PMO* emerge como una opción interesante donde, por su complejidad, no se ha logrado implementar muy bien el *RCM*, el cual es muy recomendado en equipos o máquinas nuevas o que inician en una planta, mientras que el *PMO* es ideal para equipos en funcionamiento.

Las acciones en que más se apoya el *PMO* son las planeadas y exige el trabajo multidisciplinario en equipo para alcanzar sus objetivos, los cuales deben tener estricto seguimiento, monitoreo y control, hasta su total culminación e implementación.

Las acciones en que más se apoya el *PMO* son las planeadas (preventivas y/o predictivas) y exige el trabajo multidisciplinario en equipo para alcanzar sus objetivos, los cuales deben tener estricto seguimiento, monitoreo y control, hasta su total culminación e implementación.

La eficacia del *PMO* se fundamenta en los sistemas de gestión y operación del mantenimiento, bajo un enfoque de proceso, lo cual garantiza que no haya dualidad de funciones en los departamentos, metas comunes, grupos poco efectivos de trabajo, muchos roles y funciones en el personal de mantenimiento y producción, mucha especialización en la realización de los análisis, control y eliminación de fallas, bases



La columna vertebral del *PMO* es el tratamiento y el análisis estadístico de la información histórica y presente, en tiempo real, lo cual exige que la información se maneje de una forma exquisita y eficiente.

La tarea de seleccionar una o varias de las cuatro tácticas genéricas se debe basar en las expectativas y el nivel de desarrollo de la empresa. Si se desea una táctica rápida y eficiente con un buen desarrollo en los niveles uno y dos de mantenimiento puede optar por el TPM.

Es importante resaltar que la táctica proactiva tiene la condición de implementarse en etapas en el largo plazo, con lo cual llega a ser muy efectiva.

de datos independientes para cada uno de los departamentos, sino que todo esté en una misma plataforma de información.

La columna vertebral del *PMO* son el tratamiento y el análisis estadístico de la información histórica y presente, en tiempo real, lo cual exige que la información se maneje de una forma exquisita y eficiente. A pesar de que el *PMO* y el *RCM* manejan modos de fallas, son más simples en el primero y más fáciles de controlar.

El *PMO* es un proceso constante de revisión y monitoreo de todas las actividades y tareas relevantes de mantenimiento, mientras que el *RCM* es un programa rígido y duro de constante trabajo; en general, el *PMO* es más flexible y efectivo que el *RCM* (Turner, 2005 y Johnson, 1995).

Se puede considerar el *PMO* como opción seria e interesante frente a la fortaleza del *RCM*, dado que el *PMO* es más efectivo, porque sólo analiza las fallas y modos de fallas relevantes (y no los insignificantes o indiferenciados), trabaja con equipos en funcionamiento y es más fácil de implementar.

23.4 DECISIONES CONJUNTAS O MÚLTIPLES SOBRE TÁCTICAS

La tarea de seleccionar una o varias de las cuatro tácticas genéricas expuestas hasta el momento se debe basar en las expectativas y el nivel de desarrollo de la empresa. Si el caso es una empresa que desea tener una táctica rápida y eficiente con un buen desarrollo en los niveles uno y dos de mantenimiento, puede optar por las mejores prácticas del TPM o su implementación completa.

Si se está en la situación de una empresa que desea aplicar *RCM* directamente con un buen clima organizacional, puede optar por las mejores prácticas del *RCM* o su implementación integral completa. Si la organización quiere un desarrollo de mediano plazo (entre cinco y seis años), en su parte táctica puede decidir por el TPM y *RCM* combinados (contando con que tiene desarrollados los niveles uno y dos de mantenimiento). Pero si se desea un desarrollo de largo plazo con un mejoramiento continuo permanente a unos diez o quince años vista, debe optar por una táctica proactiva, siguiendo cada una de sus etapas: TPM, *RCM*; TPM y *RCM* combinados y proactiva.

Es importante resaltar que la táctica proactiva tiene la condición de implementarse en etapas en el largo plazo, con lo cual llega a ser muy efectiva.

Las tácticas que se presentan a continuación son específicas, para situaciones muy especiales y particulares:

23.4.1 Mantenimiento reactivo

Según Christer Idhammar:

“...en una organización de producción y mantenimiento mal constituidas, la organización reacciona frente a los problemas antes de prevenirlos. No hay tiempo para tomar medidas que rompan este esquema. Es más, cuando los equipos trabajan con problemas graves, el mantenimiento se vuelve lento y espera el próximo problema, lo que genera que entre los trabajos reactivos es poco lo que mantenimiento hace. Desde el punto de vista de operación, es una situación cómoda, ya que el mantenimiento puede atender problemas en los equipos de manera rápida...” (Idhammar, 1997a, 1997b).

No debe entenderse la táctica reactiva como el conjunto de actividades que desarrolla una empresa para organizar sus acciones correctivas deficientes e inadecuadas⁵.

La reactiva es una táctica interesante para aquellas organizaciones industriales y de servicio que no permanecen mucho tiempo con sus equipos, que son desarrolladoras o usuarias de tecnologías avanzadas, que sus productos y áreas de negocio cambian constantemente. Por lo cual necesitan crear una infraestructura y aprender habilidades y competencias que les permitan reaccionar rápidamente ante las nuevas fallas y situaciones complejas de mantenimiento. Son empresas que tienen la particularidad de atender en forma oportuna las necesidades de mantenimiento (Beck@, 2003 y Chute@, 2003).

23.4.2 Mantenimiento orientado a resultados

La táctica de mantenimiento orientado a resultados se basa en la intuición, en las soluciones de sentido común para problemas recurrentes. Por lo tanto, la usan mucho las personas con más habilidades dentro de la compañía. Cada departamento hace una inversión en este proyecto, que se puede medir con la siguiente fórmula:

► ECUACIÓN 23.1 - Táctica hacia resultados

$R = A * Q$ = Resultado o Producto, Q es la calidad de la idea y A es el nivel de aceptación

El concepto central de esta táctica es ver a mantenimiento como una actividad productiva de mejora continua (Idcon@, 2000).

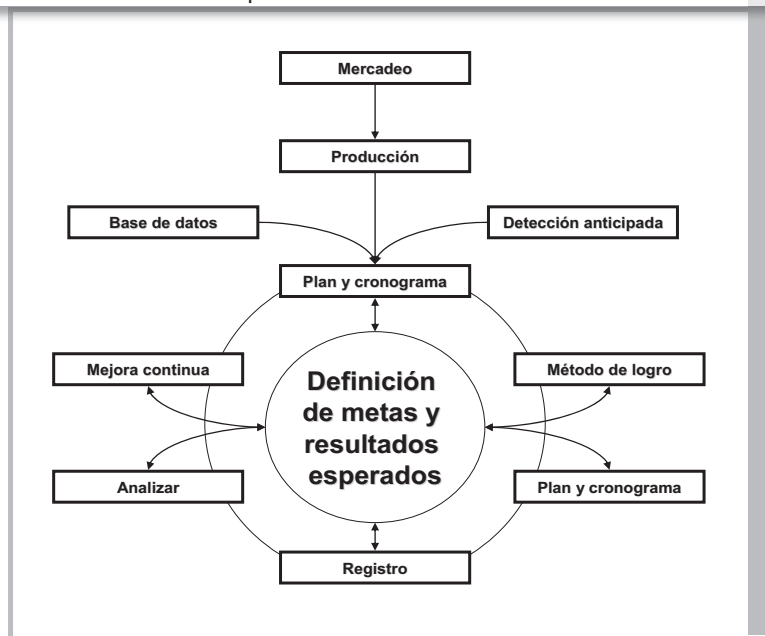


La reactiva es una táctica interesante para aquellas organizaciones industriales y de servicio que no permanecen mucho tiempo con sus equipos, que son desarrolladoras o usuarias de tecnologías avanzadas, y que sus productos y áreas de negocio cambian constantemente.

⁵ No es propiamente un mantenimiento correctivo mejorado; recuérdese que las acciones de mantenimiento correctivo son del nivel dos y la táctica es del tres. En esta sección se hace alusión a este nivel táctico de mantenimiento.

Líneas de acción de la táctica por resultados.

GRÁFICO 23.6



Táctica por resultados puede resultar conveniente como táctica de mantenimiento para empresas que no tienen mucho tiempo disponible para organizarse. Su uso debe ser temporal mientras se define por una táctica más estable, como las cuatro enunciadas⁶ al principio de la sección. Si mantenimiento hace las cosas correctas y se dirige hacia el logro del cambio de la cultura organizacional, la fábrica logra que esas cosas se hagan bien (Idhammar, 1997b).

La táctica de mantenimiento orientado a resultados se basa en la intuición, en soluciones de sentido común para problemas recurrentes. Por lo tanto, la usan mucho las personas con más habilidades dentro de la compañía.

Pero se enfatiza que esta táctica sólo se debe usar en casos de emergencia durante un tiempo limitado, ya que son dóciles la planeación integral y el estudio completo del proceso de mantenimiento bajo este modelo administrativo de organización de mantenimiento. Su ventaja es que se centra en las necesidades finales del cliente, es decir, en mercadeo y desde allí desarrolla las metas o los resultados que desea alcanzar.

23.4.3 Mantenimiento de clase mundial (World Class Maintenance, WCM)

Un anhelo de las áreas de mantenimiento es llegar a ser una organización de clase mundial, definidas como el mantenimiento sin desperdicio, en el cual éste es la diferencia entre la manera como se realizan las

⁶ TPM, RCM, TPM y RCM o proactiva.

diferentes acciones en la actualidad y en cómo se deben hacer con un nivel óptimo.

Se basa en anticiparse a lo que suceda en el futuro, y su función básica es convertir toda clase de reparación o modificación en actividades planeadas que eviten fallas a toda costa. Una organización de clase mundial no sólo se basa en el hacer, también en el pensar (Idhammar, 1997a, 1997b, 1999).

La orientación de la gestión de mantenimiento hacia clase mundial exige cambiar de actitud y de cultura en la organización. Requiere que se tenga un alto nivel de prevención y planeación, soportado en un adecuado sistema gerencial de información de mantenimiento (CMMS), muy orientado hacia las metas y objetivos fijados previamente y realizando las cosas que haya que hacer en la forma más correcta posible con el mayor grado de profundidad científica.

Utiliza el *benchmarking*⁷ como herramienta para alcanzar mejores costos, mejor productividad y máxima competitividad a través del mejoramiento continuo (Boxwell, 1994).

Los pasos fundamentales para implementar una táctica de clase mundial son: planeación, prevención, programación, anticipación, fiabilidad, análisis de pérdidas de producción y de repuestos, información técnica y cubrimientos de los turnos de operación, todo ello soportado en una organización adecuada y apoyada por sistemas de información computarizados, con un cambio de actitud y cultura hacia el cliente (producción u otro departamento interno o externo que añada valor agregado) (Idhammar, 1997a).

Según Herman Ellis:

“...el mantenimiento de clase mundial representa los niveles de funcionamiento del mantenimiento. Al transformar el mantenimiento a uno de clase mundial se deben tener en cuenta sus principios básicos, el entrenamiento de la mano de obra enfocado hacia una nueva actitud de las personas involucradas en mantenimiento y la estratificación del mantenimiento. Si se quiere que la función de mantenimiento alcance sus objetivos y se desarrolle en categoría de clase mundial no se deben bajar las finanzas de sus sistemas de apoyo (administración del mantenimiento, instrumentos, piezas de recambio, planificación, control, cultura, etc.), ya que de las relaciones entre ellos depende la formación de una acción dinámica para establecer la función de mantenimiento firmemente sobre el camino para hacerla de clase mundial. El cambio de actitud de las



Un anhelo de las áreas de mantenimiento es llegar a ser una organización de clase mundial, definidas como el mantenimiento sin desperdicio, en el cual éste es la diferencia entre la manera como se realizan las diferentes acciones en la actualidad y en cómo se deben hacer con un nivel óptimo.

La orientación de la gestión de mantenimiento hacia clase mundial exige cambiar de actitud y de cultura en la organización. Requiere que se tenga un alto nivel de prevención y planeación, soportado en un adecuado sistema gerencial de información de mantenimiento.

Los pasos fundamentales para implementar una táctica de clase mundial son: planeación, prevención, programación, anticipación, fiabilidad, análisis de pérdidas de producción y de repuestos, información técnica y cubrimientos de los turnos de operación.

7 Francisco Rey Sacristán define *benchmarking* como “un método de ayuda a la mejora continua, cuyo objetivo es llegar a desarrollar sobre el terreno las gestiones empresariales reconocidas como las mejores por el entorno empresarial mundial, con el fin de lograr incluso superarlas a través de la obtención de altas cotas de productividad y, por tanto, mantener un buen nivel de competitividad”.



Las empresas que están ubicadas en varios países o continentes en el mundo son las llamadas a utilizar intensivamente la táctica de clase mundial, pero eso las obliga a cumplir normas y tratados internacionales.

personas es uno de los puntos más complejos para implementar el WCM, ya que se deben entrenar en las profesiones específicas que se van a desarrollar en él y se debe recompensar el esfuerzo hecho por estas personas..." (Ellis@, 1999).

Algunos principios estratégicos que se deben tener en cuenta en la táctica de clase mundial, son:

- Es un proceso de largo plazo, es decir, no se deben esperar resultados inmediatos.
- Implementar el mantenimiento de clase mundial sobre la situación real de la empresa.
- Los sistemas que se basan en cambios estructurales, culturales y organizacionales de la empresa duran más tiempo y son de mediano y de largo plazos.
- Un modelo bien estructurado simple es más efectivo que uno complejo, ya que es más duradero y necesita menos entrenamiento.
- Los cambios de actitud y cultura requieren que las personas de la empresa tengan mucha capacitación, entrenamiento y práctica.
- Mientras mejor sea la estrategia, mejores serán los resultados.
- Ninguna iniciativa de clase mundial debe ser lanzada de forma imprevista, urgente y con apremio.
- La táctica de clase mundial se centra en las normas y en la solución de problemas.
- El WCM requiere la estratificación del mercado objetivo en función de continentes, países, regiones, normas y costumbres.
- Debe haber un alto compromiso de los empleados y un alto nivel de apropiación de todas las personas que forman parte del proceso de clase mundial. Todas las personas que participan en la implementación de la táctica de clase mundial lo hacen en forma voluntaria, impulsadas más por la motivación que por obligación.

Las empresas que están ubicadas en varios países o continentes en el mundo son las llamadas a utilizar intensivamente la táctica de clase mundial, pero eso las obliga a cumplir normas y tratados internacionales.

Las organizaciones que siguen esta táctica normalmente se apoyan en leyes de clase mundial en mantenimiento, como: Oreda, Afnor⁸, British Standard, Eireda, SAE, Military Standard, ESReDA, ISO, DIN, ASME y muchas otras propias de regiones o países. Esta técnica también la utilizan las empresas que exportan gran parte de sus productos o servicios y se tienen que acoger a las normas de las naciones donde llevan sus bienes (Schultz@, 2005).

8 Normas de mantenimiento en Francia.

La táctica proactiva se fundamenta en la mayoría de instrumentos básicos, avanzados genéricos y específicos técnicos, usa los cuatro tipos de acciones del nivel dos de mantenimiento, se apoya en las mejores prácticas de las cuatro tácticas básicas de mantenimiento. Y pone en práctica las mejores costumbres encontradas en el ámbito internacional, mediante el *benchmarking*.

Lo más aconsejable es que las organizaciones que deseen alcanzar el WCM tengan muy desarrollados los niveles uno y dos de mantenimiento, y al menos hayan puesto en práctica una de las tácticas básicas de mantenimiento.

23.4.4 Mantenimiento centrado en habilidades y competencias (*Core Competences Maintenance*)

Las organizaciones procuran que su recurso humano gane habilidades y competencias, como una excelente táctica para preservar el conocimiento y el buen servicio de mantenimiento, con el fin de elevar la posibilidad de controlar, erradicar o prevenir fallas en sus sistemas o equipos.

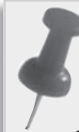
La tendencia es a concentrar los departamentos de mantenimiento en pocas personas con muchas habilidades, conocimientos y competencias, con el fin de aumentar la efectividad en mantenimiento. Y utilizar la subcontratación para realizar las actividades no diferenciadas que no son fundamentales en los procesos propios de la empresa.

El progreso constante de mantenimiento hacia niveles superiores de servicio con sus clientes internos o externos le permite a la empresa desarrollar un proceso sostenido de obtención de habilidades, competencias y de generación de productos y servicios esenciales en mantenimiento, centrando la organización en la ciencia y no en la reparación de equipos.

La insistencia en que se enfoque la prestación del servicio no en marcas específicas ni en equipos definidos, sino en plantear el desarrollo de habilidades y conocimientos científicos alrededor de las ciencias que imperan en el servicio de mantenimiento de equipos (robótica, mecatrónica, electrónica, eléctrica, mecánica, hidráulica, lubricación, generación de potencia, neumática, termodinámica, química, etc.) conduce a mejores opciones futuras para el área.

El modelo de desarrollo japonés da prioridad al desarrollo científico de habilidades y competencias esenciales, apoyado en la ciencia como la forma más sólida de alcanzar niveles de competitividad sostenible en el largo plazo y difíciles de imitar por parte de la competencia. Permite visualizar que es más próspero procurar el desarrollo hacia las raíces de la ventaja competitiva que hacia los productos que se comercializan, apoyándose en el avance de la ciencia y en la acumulación específica de conocimientos.

Las organizaciones desarrollan las habilidades y competencias esenciales en mantenimiento, las cuales se traducen en ventajas competitivas, en la capacidad de la dirección para trasladar a todos los niveles de la organización los conocimientos, las metodologías y las tecnologías para generar competencias profesionales que les permitan



Lo más aconsejable es que las organizaciones que deseen alcanzar el WCM tengan muy desarrollados los niveles uno y dos de mantenimiento, y al menos hayan puesto en práctica una de las tácticas básicas de mantenimiento.



Las organizaciones desarrollan las habilidades y competencias esenciales en mantenimiento, las cuales se traducen en ventajas competitivas y en la capacidad de la dirección para desarrollar conocimiento en todos los niveles de la organización.

La táctica centrada en competencias es también una técnica muy usada en la actualidad por diversas empresas de diferentes sectores. Es una práctica que se puede poner en un uso indiferente del nivel en que se encuentre mantenimiento.

adaptarse fácil y rápidamente a cada una de las nuevas situaciones del entorno industrial mundial, de los mercados y de la sociedad empresarial de la que se hace parte (Prahalad y otros, 1991).

La táctica centrada en competencias es también una técnica muy usada en la actualidad por diversas empresas de diferentes sectores. Es una práctica que se puede poner en un uso indiferentemente del nivel en que se encuentre mantenimiento. Se deben tener un buen clima organizacional y un excelente recurso humano motivado hacia el aprendizaje individual y colectivo.

23.5 OTRAS TÁCTICAS

Indiscutiblemente, existen muchas tácticas en mantenimiento que cumplen con su condición de basarse en normas y ser de uso internacional. Pero hasta el momento sólo se han descrito algunas, como las más conocidas y usadas en el mundo. Sin embargo queda abierta la posibilidad de que existan otras o aparezcan nuevas tácticas en el futuro.

23.5.1 Propia

Se puede afirmar que toda empresa que haya cumplido a cabalidad los niveles uno y dos de mantenimiento posee una táctica propia para desarrollar todas las actividades de gestión y operación de mantenimiento. Así no haya optado en forma oficial por alguna de las tácticas descritas. Es decir, el mismo hecho de que una empresa en mantenimiento utilice la mayoría de los instrumentos del nivel uno y entienda las diferencias de las acciones factibles de mantenimiento (planeadas o no), en el nivel dos la constituye en una táctica, si hace las cosas de una forma organizada, reglada, ordenada y coherente.

La táctica propia basada en las mejores prácticas de otras puede llegar a constituirse en la mejor opción del nivel tres de mantenimiento, para cualquier empresa que cumpla adecuadamente los niveles uno y dos (Mora, 2007b).

Las tácticas como tales no son ni buenas ni malas; sólo en el nivel cuatro se puede valorar lo apropiadas que son para el logro de los objetivos propuestos, acordes con la misión, la visión y las circunstancias propias de la empresa que las desarrolla.

Lo que sí puede ocurrir es que alguna de las tácticas se acomode mejor por sus características a las necesidades, exigencias y circunstancias propias de una empresa. Sólo el conjunto de los tres primeros niveles se puede medir en el campo estratégico⁹ del mantenimiento, bajo el enfoque sistémico kantiano. Es importante señalar que la mayoría de las tácticas enunciadas y existentes usan el CMD.

⁹ Nivel cuatro de mantenimiento.

CAPÍTULO 24

NIVEL ESTRATÉGICO, COSTOS E ÍNDICES

El nivel cuatro de mantenimiento es el que permite medir el grado de éxito alcanzado de todo lo que se realiza en los tres niveles previos, bajo el enfoque sistémico kantiano, mediante índices de aceptación mundial y con el uso de metodologías de validez universal que permiten valorar la gestión y la operación integral de mantenimiento en una empresa.

24.1 ÍNDICES INTERNACIONALES

La mayoría de las casas mundiales que tratan el mantenimiento, como SAE, Oreda, Eireda, ESReDa, Aladon, Military Standard, Afnor, British Standard, etc., aceptan tres indicadores básicos: confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en las versiones presentadas en las partes anteriores, como las medidas más estandarizadas que permiten evaluar el grado de gestión y operación por parte de los elementos estructurales de mantenimiento, así:

- **Confiabilidad:** Valora las acciones que ejecuta producción sobre el manejo y la operación de los equipos, desde la óptica de su fabricación y su explotación. Las medidas fundamentales en que se apoya son las cantidades y los tiempos de fallas inherentes a los equipos.
- **Mantenibilidad:** Mide las actividades de reparaciones y tareas proactivas que realiza el área de mantenimiento sobre los equipos. Sus medidas básicas son el volumen de reparaciones (o tareas planeadas) y los tiempos efectivos de realización y sus demoras. En el caso de la mantenibilidad, la evaluación se asocia a los grupos de personas que hacen los mantenimientos o las reparaciones.



El nivel cuatro de mantenimiento es el que permite medir el grado de éxito alcanzado de todo lo que se realiza en los tres niveles previos bajo el enfoque sistémico kantiano, mediante índices de aceptación mundial y con el uso de metodologías de validez universal.



La utilización de los parámetros directos y asociados al CMD permite la comparación con equipos similares o afines en el ámbito mundial, y facilita la valoración de la máquina en el tiempo para conocer su evolución.

El *Life Cycle Cost* permite valorar la situación económica de la máquina y su viabilidad técnica y financiera a través de su ciclo de vida. Y allí es donde se puede tener un criterio claro de la efectividad lograda con todo lo realizado en los cuatro niveles de mantenimiento.

- **Disponibilidad:** Es una relación que muestra la proporción de tiempo útil efectivo frente al tiempo total disponible; la relación está gobernada por parámetros y metodologías de cálculo de orden mundial.

La utilización de los parámetros directos y asociados al CMD permite la comparación con equipos similares o afines en el ámbito mundial. O también establece una relación de comportamiento en el tiempo consigo mismo, es decir, permite la valoración de la máquina en el tiempo para conocer su evolución. De la interpretación, el uso y el análisis de las curvas características CMD, de sus pronósticos y de los cálculos asociados se desprenden las estrategias que se vayan a realizar para alcanzar las metas, los objetivos, la misión y la visión de las empresas mediante el uso de estos instrumentos en la gestión y la operación de mantenimiento.

Indudablemente, los valores CMD son operativos y de mantenimiento, como de gestión integral de una fábrica. En sí mismos no tienen en cuenta los aspectos económicos. Por eso es indispensable relacionar los valores calculados CMD con la inversión en dinero realizada para alcanzarlos. Para ello se utiliza universalmente el concepto de *Life Cycle Cost (LCC)* y de costos de mantenimiento.

El *Life Cycle Cost* permite valorar la situación económica de la máquina y su viabilidad técnica y financiera a través de su ciclo de vida. Y allí es donde se puede tener un criterio claro de la efectividad lograda con todo lo realizado en los cuatro niveles de mantenimiento.

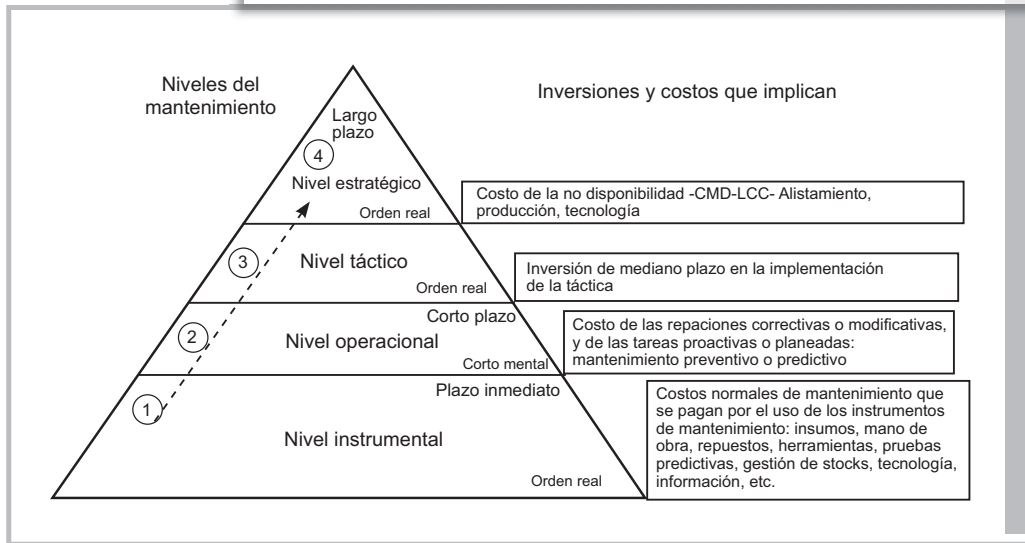
Algunos valores CMD, parámetros asociados, modos de falla, fallas funcionales e ítems mantenibles de equipos muy comunes se pueden observar en la Norma ISO 14224 (Troféé@, 2006) y en los libros de la Casa Oreda y ESReDa (OREDA, 1997, 2002).

24.2 COSTOS

Los indicadores asociados a cada uno de los cuatro niveles de mantenimiento se pueden asociar mediante la siguiente descripción del *Gráfico 24.1*.

Costos asociados a los niveles kantianos de mantenimiento.

GRÁFICO 24.1



Estos costos se pueden clasificar (Navarro y otros, 1997) en:

24.2.1 Costos fijos

Son los que se refieren a todas las acciones planeadas de mantenimiento, e implican los valores que se pagan por usar todos los instrumentos (básicos, avanzados genéricos y específicos como los específicos de orden técnico), que se requieren para llevar a cabo las tareas proactivas.

Son fijos porque son independientes del volumen de producción o servicios que se haga, como también porque son planeados para períodos de tiempo definidos previamente.

Se controlan mediante una buena planeación de las tareas proactivas basadas netamente en los pronósticos CMD de los equipos, por medio de los cuales se pueden establecer la cantidad y la frecuencia de las intervenciones planeadas mínimas, de tal forma que se conserven la confiabilidad y, sobre todo, el valor del Beta en los niveles deseados.



Costos fijos
son los que se refieren a todas las acciones planeadas de mantenimiento, e implican los valores que se pagan por usar todos los instrumentos que se requieren para llevar a cabo las tareas proactivas.

24.2.2 Costos variables

Son los gastos en que se incurre cuando aparecen fallas o reparaciones no planeadas. Todas las acciones correctivas o modificativas no planeadas generan estos costos. Igual que el anterior, sus valores dependen de la mano de obra, repuestos, materiales, instrumentos de mantenimiento, etc., que se usen para hacer las reparaciones o modificaciones a los equipos.



Costos variables son los gastos en que se incurre cuando aparecen fallas o reparaciones no planeadas. Todas las acciones correctivas o modificativas no planeadas generan estos costos.

Los costos financieros son causados por la inversión en repuestos, materias primas de mantenimiento en almacenes, la duplicidad de maquinaria para elevar la confiabilidad y demás valores asociados.

El valor que implica no poder utilizar una máquina, debido a reparaciones o modificaciones causadas por fallas imprevistas, es el rubro más importante en los costos de mantenimiento.

Estos costos se pueden controlar mediante la aplicación de instrumentos, como el análisis de fallas, el procedimiento *FMECA*, el *RPN*, análisis predictivos y demás instrumentos disponibles que eviten a toda costa las fallas, con el apoyo de los pronósticos *CMD*, que de alguna manera ilustran los tiempos probables futuros en que se han de presentar fallas en los sistemas, equipos o elementos de producción.

24.2.3 Costos financieros

La inversión que se tenga en repuestos, insumos y/o materias primas de mantenimiento en almacenes, la duplicidad de maquinaria para elevar la confiabilidad (o disponibilidad) y demás valores asociados generan los costos financieros.

Uno de los rubros más importantes es el *LCC* que no es sino la manifestación del costo del *CMD* que se desea tener en esa empresa. En este rubro deben tenerse en cuenta los costos de oportunidad de no tener disponibles algunas referencias *Push* requeridas en un momento dado.

24.2.4 Costos de la no disponibilidad por fallas

El valor que implica no poder utilizar una máquina, debido a reparaciones o modificaciones causadas por fallas imprevistas, es el rubro más importante en los costos de mantenimiento; normalmente es superior a los tres anteriores sumados y es al que probablemente menos atención se le presta en las empresas, pero es indudablemente el más relevante de todos.

La estimación del costo de no disponibilidad se realiza mediante:

■ ECUACIÓN 24.2 - Estimación del costo por fallas

$$\text{Costo de la no disponibilidad} = \text{Costo de la producción en tiempo} * (1 - \text{Disponibilidad en tiempo})$$

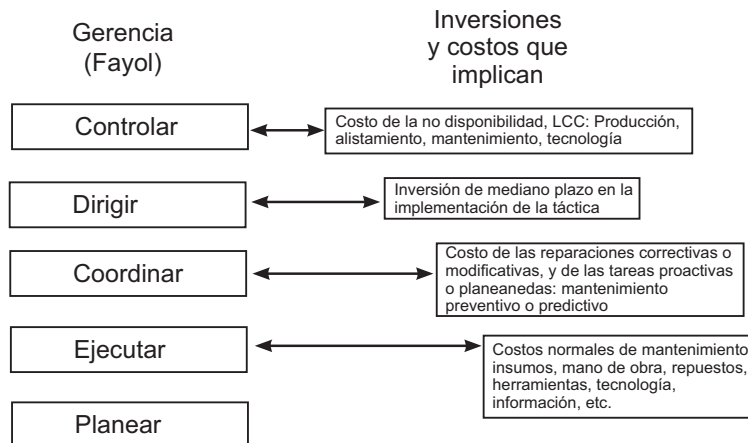
La suma de los cuatro rubros permite un control estratégico permanente sobre la gestión y la operación del mantenimiento, ya que desglosa básicamente todas las actividades y niveles del mantenimiento (Mora, 2007b y Navarro y otros, 1997).

El control integral se alcanza con el desarrollo de un sistema de costeo, al asociarlo con los niveles de gestión¹ y operación de mantenimiento a partir de los principios de dirección de Fayol, mediante el cual se pueden establecer las cinco funciones básicas en las categorías kantianas de mantenimiento.

1 *Management* en inglés si se entiende como gestión y operación en castellano.

Control integral de Fayol y su asociación con costos.

GRÁFICO 24.2

Enfoque estratégico, sistémico y kantiano de Mantenimiento

24.3 INDICADORES

Las diferentes empresas y asociaciones de mantenimiento establecen diversos indicadores de gestión u operación, mediante los cuales ejercen un control muy particular de su manejo empresarial. Por eso es muy lógico encontrar múltiples indicadores que persiguen fines muy particulares de las instituciones que los construyen. La recomendación es la misma, trabajar con indicadores internacionales y de validez mundial, como son el LCC y el CMD. Sin embargo, en ocasiones resulta interesante medir algunos de estos índices en forma particular en las empresas que así lo requieren (González, 2004).

De los autores Navarro, Pastor y Mugaburu, se pueden mostrar algunos indicadores:

24.3.1 Indicadores para la alta dirección. Estratégicos

1. Indicadores sobre procesos y actividades:

- Número de intervenciones y duración de ellas.
- Total de horas trabajadas y el total de trabajos realizados.
- Número de trabajos pendientes con su valoración en horas.



Las diferentes empresas establecen diversos indicadores de gestión mediante los cuales ejercen un control muy particular de su manejo empresarial. Por eso es muy lógico encontrar múltiples indicadores que persiguen fines muy particulares de las instituciones que los construyen.

- Número de mantenimientos modificativos o de mejoras, sus tiempos, inversión y retornos.

2. Indicadores de resultados:

- Objetivos parciales o totales logrados.
- Disponibilidad media de cada máquina o línea de producción.
- *MTTR*, *MTBF*, tiempos medios de respuesta a las averías, horas totales de paro por mantenimiento.

3. Indicadores de instrumentos de mantenimiento o factores productivos: Se refieren a la información sobre mano de obra empleada, materiales y su costo:

- Mano de obra propia y subcontratada por órdenes de trabajo realizadas.
- Costos de materiales por trabajo, movimientos y rotaciones de almacén, repuestos obsoletos e inservibles.
- Presupuesto contra realidad.

24.3.2 Indicadores operativos

Son técnico-económicos, sirven para los ejecutores y planeadores del mantenimiento.

1. Indicadores sobre procesos y actividades:

- Curvas de intervenciones contra tiempo duración.
- Curvas de intervenciones contra gastos.
- Trabajos pendientes o atrasados.
- Comparación de trabajos similares.

2. Indicadores de resultados:

- Comparan las acciones contra resultados.
- *MTTR* y *MTBF* frente a tiempos y costos.
- Fallas y reparaciones repetitivas.

3. Indicadores de factores productivos.

- Carga de trabajo, órdenes de trabajo en proceso, terminadas y correcciones por trabajador y área.
- Disponibilidad y confiabilidad de cada equipo comparada en el tiempo.
- Consumos y gastos de cada trabajo.
- Materiales comprados y usados frente al número de horas de operación y paro.



Se debe tener especial cuidado en no incorporar demasiados indicadores que con el tiempo se pueden convertir en motivo de esclavitud para el analista de mantenimiento, y que probablemente no le presten beneficio alguno.

Se debe tener especial cuidado en no incorporar muchos indicadores que con el tiempo se pueden convertir en motivo de esclavitud para el analista de mantenimiento, y que probablemente no le presten beneficio alguno. Se deben usar pocos que sean verdaderamente útiles, y revisarlos cada cierto tiempo en cuanto a utilidad y beneficio.

24.4 TEROTECNOLOGÍA, LCC

Es la ciencia integradora de todos los aspectos del enfoque kantiano de mantenimiento. Con ella se integran todos los niveles del mantenimiento junto con sus elementos estructurales y sus relaciones gobernadas por las leyes del CMD. En la terotecnología se apoya el concepto del costo económico integral del ciclo de vida LCC y a partir de allí se establecen los indicadores magnos de mantenimiento: efectividad, LCC y CMD (Evans, 1975).

La terotecnología (Evans, 1975 y Wakefield, 1985) consiste en:

- Obtener información acerca de los activos físicos y su desempeño, la cual debe incluir hechos y tendencias sobre la productividad, costos, disponibilidad, causas de fallas, funcionamiento, frecuencia y severidad de los tipos de falla, piezas de repuesto usadas, frecuencia de trabajo de los niveles de mantenimiento, entre otros.
- Analizar la información para determinar la causa de los problemas. Éstos pueden ser por diferentes causas de falla, debido a malos estándares de mantenimientos, diseños de mala calidad, operaciones inadecuadas, falta de lubricación, repuestos de mala calidad, sobrecarga de los equipos, materiales incorrectos durante el proceso, entre otros.
- Adoptar acciones apropiadas para reducir o eliminar las causas de los problemas en los procesos.

24.4.1 Costo de ciclo de vida (LCC)

El concepto de costo de ciclo de vida es enfocado en las normas del gobierno británico como terotecnología, el cual se define en la Norma Británica BS3811 como una combinación de dirección, finanzas, ingeniería, construcción y otras prácticas aplicadas a perseguir el costo de vida económico de los activos físicos (Barringer@, 2005).

La fórmula magna de estimación estratégica de mantenimiento se establece así:

■ ECUACIÓN 24.3 - Efectividad y LCC en mantenimiento

$$LCC = \sum_0^T \frac{1}{(1+r)^n} * C(n)$$

Donde:

r es la tasa de descuento o tasa de interés.

$C(n)$ es el costo en el año n .

T es la vida útil en años.

Efectividad de la máquina o elemento = $\text{Confiabilidad} * \text{Mantenibilidad} * \text{Disponibilidad} * \text{Capacidad utilizada}$

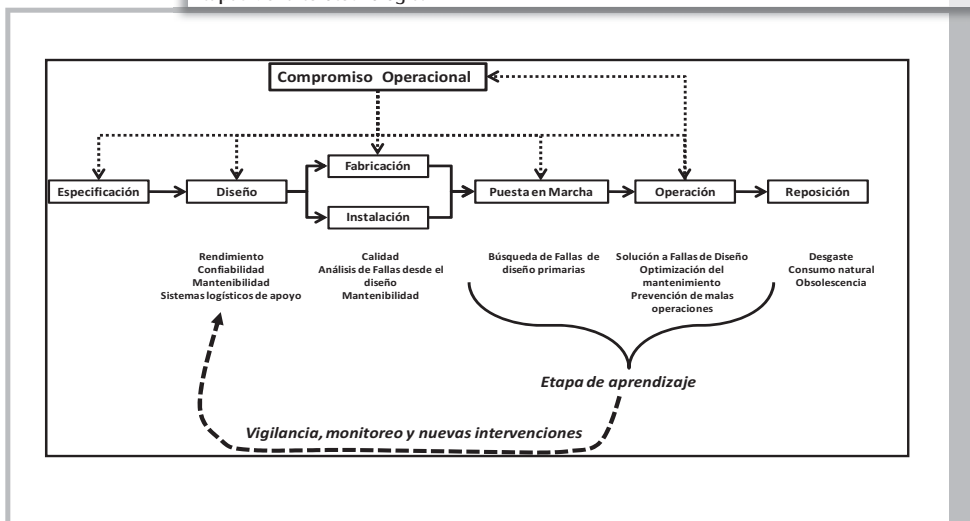
Efectividad del sistema = $\frac{\text{Efectividad de la Máquina o del elemento}}{LCC} = \frac{C * M * D * K}{LCC}$

Donde (Barringer 2005):

$LCC = \text{Life Cycle Cost}$ y $K = \text{Capacidad utilizada}$

Etapas de la terotecnología.

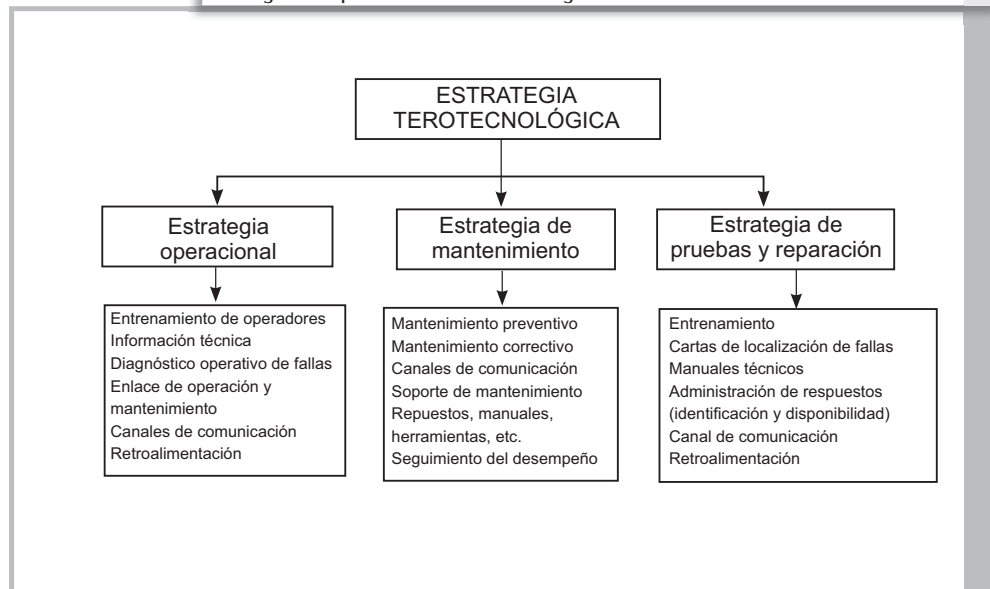
GRÁFICO 24.3



Su estrategia de aplicación se desenvuelve en tres campos:

Estrategias de aplicación de la terotecnología.

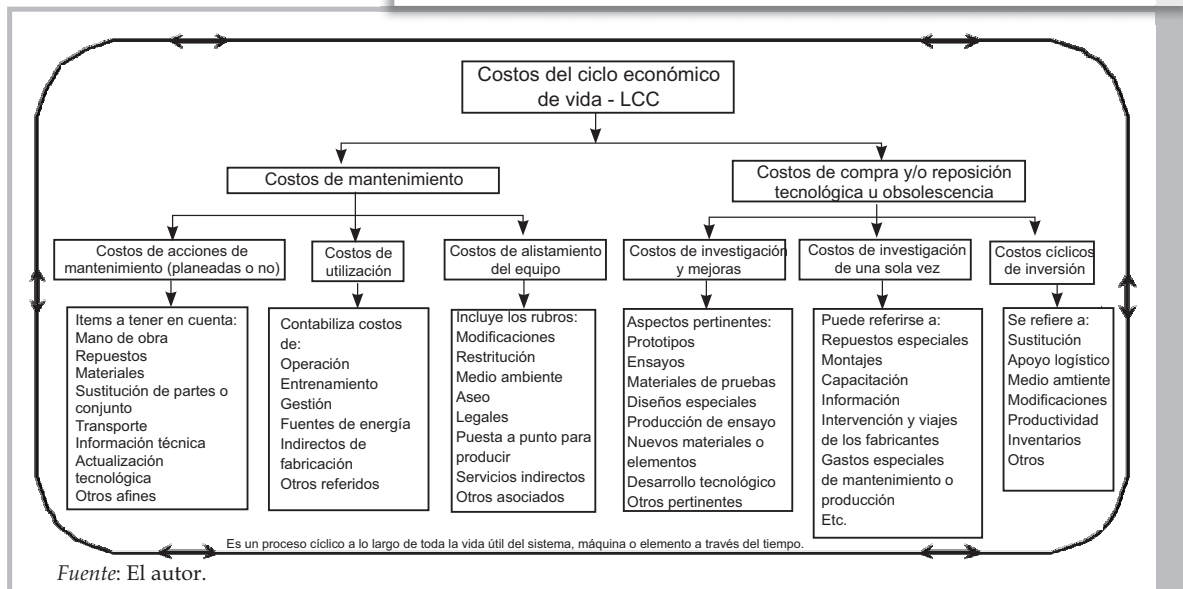
GRÁFICO 24.4



El ciclo económico de vida *LCC* contempla el cálculo integral a través de toda la curva característica de vida o de tasa de fallas.

LCC.

GRÁFICO 24.5



Ayuda en la



Para el cálculo real de *LCC* se puede apoyar en el programa informático dispuesto en Excel en la Web, bajo la descripción de *Programa – LCC*.

24.5 GESTIÓN DE ACTIVOS



El LCC y la metodología de gestión de activos son la única forma de enfrentar los hechos que conducen cada vez más a la necesidad de desarrollar metodologías científicas, prácticas y útiles que permitan controlar los costos durante su ciclo integral de vida.

Las empresas se enfrentan día a día a la difícil situación de incorporar, administrar y mantener una mayor cantidad de activos fijos para atender los mismos mercados con los mismos servicios y productos. Lo cual genera la necesidad de desarrollar una metodología de gestión de activos basada en costos e indicadores CMD que garanticen que éstos produzcan cada vez más ingresos y menos gastos.

El LCC y la metodología de gestión de activos son la única forma de enfrentar estos hechos que conducen cada vez más a la necesidad de desarrollar metodologías científicas, prácticas y útiles que permitan controlar los costos durante su ciclo integral de vida, con apoyo de los indicadores estratégicos de LCC, CMD y costos integrales.

El impacto de la implementación de la tecnología de gestión de activos en las empresas se refleja en sus cuatro objetivos principales: reducción de costos en la gestión y operación del mantenimiento, aumento de la disponibilidad de los equipos y líneas de producción, incremento de la vida útil de los activos y disminución de los niveles de inventarios de repuestos e insumos (Mora, 2007b, 2007c).

RESUMEN

La sexta y última parte describe, profundiza y enuncia todos los componentes y elementos principales de cada uno de los tres últimos niveles estructurales de mantenimiento. Inicia en el nivel dos de las diferentes operaciones, continúa con el nivel tres que describe cada una de las tácticas más utilizadas en el mundo y concluye en el nivel cuatro de orden estratégico.

Lo anterior le facilita al lector integrar todas las áreas sistémicas de mantenimiento (con el nivel uno ya descrito), y elaborar una estrategia con sus respectivas actividades para realizar una gestión y operación efectivas del mantenimiento, mediante la utilización de las mejores prácticas internacionales, adaptándolas a las propias.

PREGUNTAS, DESARROLLOS, FOROS Y EJERCICIOS

- Describa cada una de las cuatro operaciones básicas de tareas de mantenimiento, enfatizando en sus diferencias, ventajas, aplicaciones opcionales y limitaciones, con el fin de que cualquier empresa pueda diferenciarlas y utilizarlas adecuadamente.
- Bosqueje un cuadro sinóptico con todas las tácticas descritas en los capítulos de la sexta parte, demostrando su funcionalidad, reglas, normas, pilares, aplicaciones posibles, etapas y condiciones de implementación, bondades y desventajas.
- Refiera las condiciones y situaciones necesarias de mantenimiento y operación, requeridas para llevar a cabo la implementación de cada una de las tácticas revisadas.
- Defina en qué consiste el LCC y cuál es la ventaja de su aplicación para alcanzar el éxito en mantenimiento.
- Enuncie y explique los diferentes costos existentes en mantenimiento. Ilustre con ejemplos en cada caso.

Realice un caso real de una empresa de su localidad, genere un diagnóstico completo, integral y detallado de la situación actual en cuanto a operaciones, táctica y estrategias de mantenimiento que use actualmente. A partir de las condiciones de la empresa recomiende una táctica y las acciones estratégicas que debe realizar, con el fin de garantizar la máxima efectividad del mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahlmann, H. (marzo-abril de 1987). *LCC/LCP. Theory and Case Studies. Department of Industrial Management* [publicación periódica]. *Beneficios del ciclo de vida útil. Un nuevo concepto de mantenimiento*. Madrid, España: Asociación Española de Mantenimiento. 020. ISSN 0214-4344.
- AMEF (2005-2008). Análisis de fallas [en línea]. AMEF. *GestioPolis* [libro]. <http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/ger/amef.htm>
- Annis, Charles P. E. (enero de 2008-07 de diciembre de 2008). Goodness-of-Fit tests for Statistical Distributions [en línea]. *Statistical Engineering* <http://www.statisticalengineering.com/goodness.htm>. Email autor Charles.Annis@StatisticalEngineering.com
- Árbores Malinasi, Eduardo A. (1999). *Logística empresarial* [libro]. Barcelona: Alfaomega Marcombo / Boxierau Editores: pp. 5-24. ISBN 970-682127-7.
- Automóvil (15 de octubre de 2008). *Wikipedia* [en línea]. Historia del automóvil http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_autom%C3%B3vil
- Aven, T. (1999). Availability Formula for Stand-by Systems of Similar Units That Are Prevently Maintained. En: *IEEE, Transaction and Reliability* [libro] [s. l.]. Vol. 39: 5.
- Ávila Espinosa, Rubén (1992). *Fundamentos del mantenimiento. Guías económicas, técnicas y administrativas* [libro]. Ciudad de México: Limusa Grupo Noriega Editores. Primera reimpresión. ISBN 968-18-2528-4.
- Babylon (16 de noviembre de 2008). *Dictionary of Information at your fingertips* [en línea]. Baylon Diccionario se debe instalar en el ordenador que se use. <http://www.babylon.com>. <http://www.babylon.com/affiliates/landing/download.php?id=CD5253&camp=275&lang=spa>.
- Bajaria, H. J. (1983). *Integration of Reliability, Maintainability and Quality Parameters in Design of Heavy Duty Vehicles* [libro]. (L. Ray Buckendale lecture). Society of Automotives Engineers, Inc. Palo Alto: Warrendale. ISBN: 0898833043.
- Ballou, Ronald H. (2004). *Administración de la cadena de suministro* [libro]. Traducido por Carlos Mendoza Barraza y María Jesús Herrero Díaz. México, D.F.: Editorial Pearson Educación: pp. 1-32. ISBN: 970-26-0540-7.
- Barajas Pinzón, Óscar Mauricio (2003). *Breve historia de la ingeniería*. Partes 1, 2 y 3. *Ingenierías* [publicación periódica]. Nuevo León [s. n.] (abril-junio del No. 19; de julio a septiembre del No. 20 y de octubre-diciembre de 2003 del No. 21 de 2003. 19, 20 y 21: Vol. VI: pp. 47-53 del No. 19; 62-74 del No. 20; 56-63 del No. 21). [Web ingenierias.uanl.mx/19/pdf/brevehistoriadelaing.PDF](http://webingenierias.uanl.mx/19/pdf/brevehistoriadelaing.PDF). ISSN 1405-0676.

- Barlow, Richard E. (1998). *Engineering Reliability* [libro] [s. l.]: Editorial Board SIAM: p. 199. ISBN: 0898714052.
- Barlow, Richard E. y Proschan, Frank (1996). *Mathematical Theory of Reliability* [libro]. New York: John Wiley and Sons, Inc. ISBN 0898713692.
- Barringer, H. Paul (2005-11 de noviembre de 2008). Availability, Reliability, Maintainability, and Capability [en línea]. *Life Cycle Cost Issues. Availability, Reliability, Maintainability, and Capability*. Humble, Texas, Estados Unidos: Ed. H. Paul Barringer P. E. Prod. Barringer and Associates Inc. <http://www.barringer1.com/lcc.htm>.
- Bautista Paz, E. y otros (2007). *Evolución y desarrollo de la ingeniería mecánica a través de las grandes áreas culturales*. Conferencia Octavo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cusco, Perú [s. n.]. Bautista trabaja en la División de Ingeniería de Máquinas de la Universidad Politécnica de Madrid de España, su email es ebautista@etsii.upm.es.
- Bazovsky, Igor (2004). *Reliability Theory and Practice* [libro] [s. l.]: Edit. Dover Publications Incorporated: p. 304. ISBN: 0486438678.
- Beck, Richard (junio de 2003-18 de diciembre de 2008). Asset Management [en línea]. Achieve Best-in-Class Reliability. Meridium Inc. Original de la revista *Chemical Engineering Progress*. Estados Unidos. http://www.meridium.com/news_events/articles/pdf_files/achieve_best_in_class_reliability.pdf - www.cepmagazine.com.
- Benítez Hernández, Luis Eduardo (20 de julio de 2007). Conceptos sobre etapa 1 de mantenimiento y Curva de Davies. *Mantenimiento industrial y sus conceptos*. Entrevista en Congreso de Mantenimiento en Lima, Perú Trad. al castellano. Lima: Personal Ipeman. Email lbenitez@unal.edu.co
- Benítez Hernández, Luis Eduardo (20 de julio de 2007). Opiniones y conceptos especiales sobre mantenimiento avanzado. Entrevista en Congreso de Mantenimiento en Lima Perú. *Mantenimiento industrial y sus conceptos*. Trad. al castellano. Lima: Personal Ipeman Email lbenitez@unal.edu.co
- Benítez Hernández, Luis Eduardo (23 de diciembre de 2008). Revisión de este libro antes de su edición final. Revisión técnica avanzada de esta obra de mantenimiento y aportes técnicos profundos. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. El Dr. Luis Eduardo Benítez H. es en la actualidad el decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Email lbenitez@unal.edu.co.
- Bertalanffy, Ludwig von (1994). *Teoría general de los sistemas* [libro]. Bogotá: Fondo de Cultura Económica Limitada: p. 311. ISBN: 958-38-0011-2. ISBN: 950-557-096-1.
- Bertancourt Molina, Agustín y de Lanz, José María (1802). *Ensayo sobre la composición de máquinas* [libro]. Ed. Colección de Ciencias Humanidades e Ingeniería. París: Colegio de Ingenieros, Canales y Puertos. <http://www.museoelder.org/bertancourt/indexbiografia.html>
- Bierman, Harold; Bonini, Charles P. y Hausman, Warren H. (1991). *Análisis cuantitativo para la toma de decisiones: modelos deterministas y probabilísticos* [libro]. Madrid: Editorial Irwin. Octava edición. ISBN 84-8086-273-4.
- Bitar, Yances y otros (2000-2003). *Implementación en Corelca S.A. ESP de mantenimiento basado en procesos, bajo la metodología de cuadros de control con el sistema Vital Signs Performance* de la Casa Arthur Andersen

- [libro]. Barranquilla: Corelca S.A. ESP Corporación Eléctrica de la Costa Atlántica [s. n.]. ISBN en inglés 0070068992 ISBN en castellano 84-481-1837-5.
- Blanchard, Benjamín S. (1995). *Ingeniería logística*. Traducido de *Logistics Engineering and Maintenance*. Isdefe [libro]. Madrid: Isdefe. Monografias.com: p. 153. ISBN: 84-89338-06X.
- Blanchard, Benjamín S.; Verma, Dinesh y Peterson, Elmer (1994). *Maintenibility: A key to effective serviceability and maintenance management* [libro]. *Maintenibility*. Series Nuevas dimensiones en Ingeniería [s. l.]: Edit. Wiley Interscience / Wiley, John and Sons, Incorporated: p. 560. ISBN: 0486438678.
- Bleazard, Dirk; Hepler, Don y Dearman, Larry (1998). *Equipment reliability improved at Barrick Goldstrike* [libro] [s. l.]: En: *Review Mining Engineering*. Vol. 50. ISSN 0026-5187.
- Blitz RCM ScoreCard (2005-diciembre de 2008). *Dictionary of Information at your fingertips* [en línea]. RCM ScoreCard. <http://www.mt-online.com/articles/1004internet.cfm> - <http://www.babylon.com>.
- Bohan, William F. (2003). *El poder oculto de la productividad* [libro]. Bogotá: Grupo Editorial Norma. Impreso por Imprelibros S.A.: p. 240. ISBN 958-04-7120-7.
- Boxwell Robert J. (1994). *Benchmarking for competitive advantage* [libro]. Trad. al castellano como *Benchmarking para competir con ventaja*. Madrid: Ed. McGraw-Hill Companies, Inc.: p. 225. ISBN: 0070068992 en inglés y en castellano ISBN: 84-481-1837-5.
- Brewster, J. D. *Simplifying the Myths About Contract Maintenance*. A.I.P.E. Facilities Review [libro] [s. l.]: McGraw-Hill (1997). Primera edición: pp. 43-48 (662). ISBN-10: 0070521697, ISBN-13: 978-0070521698.
- Chiavenato, Idalberto (2005). *Introducción a la teoría general de la administración* [libro]. Madrid: McGraw-Hill. Séptima edición: p. 584. Compra disponible en Web <http://www.buscalibros.cl/libro.php?libro=185295>. ISBN 9701055004.
- China ABC (30 de septiembre de 2008). CRI on line [en línea]. Dinastía Song de la China. En: *China ABC*. <http://espanol.cri.cn/chinaabc/chapter14/chapter140108.htm>.
- China, Kao Gong Ji (29 de septiembre de 2008). Kaleidoscope [en línea]. Kao Gong Ji (China). *Libro de las diversas artes. Cultura China Avances y desarrollos*. <http://www.cultural-china.com/chinaWH/html/en/10Kaleidoscope674.html>. Años 770-221 antes de Jesucristo.
- Chute, John R. (agosto de 2003-19 de diciembre de 2008). Reliability Web.com [en línea]. Efectividad en el mantenimiento. Solution Oriente Asset Reliability: Prod. Conference 18th International Maintenance. http://www.reliabilityweb.com/art04/right_things.htm - www.maintenanceconference.com o en <http://www.reliabilityweb.com/art04/chute.pdf>
- Clement Norris, C.; Pool, John C. y Carrillo, Mario M. (1984). *Economía enfoque: América Latina* [libro]. Bogotá: Editorial McGraw-Hill. Segunda edición: pp. 335-338. ISBN: 968-451-093-4.
- CPFR (21 de octubre de 2008). Wikipedia [en línea]. CPFR, Collaborative Planning, Forecasting, and Replenishment [libro]. <http://en.wikipedia.org/wiki/CPFR>
- CUIO-88-OIT, Darnell H. y Smith, M. (1991). *Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones*. Descrita por la OIT (Oficina Internacional del Trabajo). *Management Aspects of Terotechnology*. Conference of British Steel [libro]. Suiza, London [s. n.]. ISBN: 92-2-306438-4.

- Darnell, H. y Smith, M. (1975). *Management Aspects of Terotechnology*. Conferencia de la British Steel Corporation. London, England: Ed. Corporation British Steel [s. n.]. Vol. 185.
- De Betancourt, Agustín y Molina y de Lanz, José María (1808). *Ensayo sobre la composición de máquinas*. París: Editorial Colección de ciencias, humanidades e ingeniería.
- De Bono, Edward (2003). *Seis sombreros para pensar* [libro]. Buenos Aires: Ediciones Granica S.A.: p. 173. ISBN: 950-641-061-5.
- De Groote, Patrick (1994). D.G.S. Maintenance Internacional. Presidente de la Asociación Belga de Mantenimiento. Trends in Maintenance Management in Europe. Artículo Ponencia. Simposio Internacional de Ingeniería de Fábricas. Conferencia en Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mantenimiento. Medellín, Colombia: Universidad Eafit. Email patrick.degroote@be.vitalo.net Cell: +32 (0). 495 77.77.76 Phone: +32 (0). 51 48.00.11.
- de Honnecourt, Villard (2001). *Cuaderno Máquinas* [libro]. Ed. Cantos Tres. Madrid: AKAL S.A. Citado por Bautista. ISBN 9788446017769.
- De Miguel Fernández, Enrique (1990). *Introducción a la Gestión "Management"* [libro]. Departamento de Organización de Empresas, Economía Financiera y Contabilidad. E.T.S.I. Industriales. Valencia: Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de Publicaciones de la UPV. Vols. I y II: 2: p. 897. ISBN: 84-7721-127-2.
- Diagnetics. What is Proactive Maintenance? [en línea] (1998). <http://www.maintenanceresources.com/ReferenceLibrary/OilAnalysis/oa-what.htm>.
- Díaz Matalobos, Ángel (1992). *Confiabilidad en mantenimiento* [libro]. Caracas: Ediciones IESA, C.A.: p. 110. ISBN: 980-271-068-2.
- Diesel (15 de octubre de 2008). Portal mecánico [en línea]. *Motor y ciclo de Diesel por inyección. Motor Diesel*. <http://usuarios.lycos.es/jumping1/photoalbum.html>
- Dounce Villanueva, Enrique (1998). *La productividad en el mantenimiento industrial* [libro]. Ciudad de México: Compañía Editorial Continental, S.A. de CV. Segunda edición: p. 350. ISBN 968-26-1089-3.
- Duffuaa, S. O. y Ben-Daya, S. Maintenance and quality: The mission link. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* [libro]. West Yorkshire [s. n.] (1995). Vol. 1: No. 1: pp. 17 -18. ISSN: 1355-2511.
- Ebeling, Charles E. (2005). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering* [libro]. Ed. Waveland Press Inc. New York City: McGraw-Hill Science, Engineering, Math.: p. 576. ISBN: 1577663861.
- Einstein NASA (18 de octubre de 2008). *Ciencia de la NASA* [en línea]. NASA. http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2006/22mar_telomeres.htm
- Ellis, Herman (1999). *Principles of the Transformation of the Maintenance Function to World-Class Standards of Performance* [en línea]. <http://www.maintenanceresources.com/ReferenceLibrary/ezone/principles.htm>.

- ESReDa (2001). *ESReDa Handook on Maintenance management* [libro]. Ed. ESReDa / European Safety Reliability and Data. Hevik, Norway: Det Norske Veritas. ESReDa. Primera edición: Vol. Uno: Statistical Series No. 5: p. 255. En idioma español ISBN: 82-515-02705.
- ESReDa-Industrial (1998). *Industrial Application of Strutural Realibility Theory* [libro]. Ed. DNV P. Thoft-Christensen. Det Norske Veritas. Hovik Norway: ESReDa Working Group Report. ESReDa / European Safety, reliability and Data: Vol. ESReDa Safety Series No. 2: p. 283. ISBN: 82-515-0233-0.
- Evans D. W. (1975). *Terotechnology. How can it work* [libro] [s. l.].
- Fayol, Henry y Taylor, Frederick (1916). *Administración industrial y general* [libro]. Buenos Aires: Librería El Ateneo (1996). Texto original de Fayol. ISBN 9500-2354-04.
- Fitch, Jim (2002). Proactive Maintenance's Unruly Cousin. En: *Machinery Lubrication Magazine* [en línea]. http://www.machinerylubrication.com/article_detail.asp?articleid=335&relatedbookgroup=ContaminationControl
- Forcadas Feliu, Jorge (1983). *Estadística aplicada a los sistemas y confiabilidad en los sistemas* [publicación periódica]. Estadística en los sistemas de confiabilidad. En: *Revista SAI*. No. 4: Vol. 1: p. 41. Medellín, Colombia: SAI, Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos.
- Ford Motor Company (1972). *Reliability methods: Designs verification and and production validation*. Module IX. Reliability methods. North American Automotive Operations. Ed. Ford. Dearborn: Ford Motor Company. Citado por Stamatis.
- Gagné, Robert y Bloom, Benjamín (21 de septiembre de 2008). Taxonomía de los objetivos educacionales y formativos de los seres humanos [en línea]. Escalas de niveles de objetivos. Modelos de procesamiento de la información de los humanos). <http://www.scribd.com/doc/408060/Robert-Gagne>. Se conoce como la escala de niveles de objetivos de Bloom, Barret y Gagné.
- Gamma-Exp, Gángara Luna, Rita (autora) (2005-6 de diciembre de 2008). Distribución exponencial. Asignatura Probabilidad y Estadística [en línea]. Instituto Tecnológico de Chihuahua. http://www.itch.edu.mx/academic/industrial/sabaticorita/_private/03Distribucion%20Exponencial.htm
- GammArgen (2005-08 de diciembre de 2008). *Distribución Gamma* [en línea]. Departamento de Matemáticas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, Argentina [libro]. http://www.dm.uba.ar/materias/estadística_Q/2005/1/TRANSP4C.pdf
- García Tapia, Nicolás (1990). *Ventiún libros de los Ingenios*. Pedro Juan de Lastanosa. Autor aragonés de [libro]. Huesca, Aragón: Ed. D. L. Instituto de Estudios Altoaragoneses: p. 142. ISBN 84-86856-39-6.
- Geraghty, Tony (junio de 1996). *RCM and TPM complementary rather than conflicting techniques* [publicación periódica]. Journal. Estados Unidos [s. n.]. Vol. 63. ISSN 0141-8602.
- Gnedenko Vladimirovich, Boris y Ushakov, Igor A. (traductor) (1999). *Statistical Reliability Engineering* [libro]. New Cork: Editorial John Wiley and Sons, Inc.: p. 499. ISBN: 0471123560.

- González Fernández, Francisco Javier (2004). *Auditoría del manetenimiento e indicadores de gestión* [libro]. Ed. Artegraf S.A. Madrid: Fundación Confemetal. Primera edición: p. 260. ISBN: 84-96169-36-7.
- Grijalbo Mondadori (2000). *Gran Diccionario Enciclopédico Ilustrado* [libro]. Barcelona: Editorial Grijalbo Mondadori. Vol. 1: p. 1822. ISBN 84-253-3157-9.
- Grossman, Stanley (1999). *Álgebra lineal* [libro]. México, D.F.: Editorial McGraw-Hill. Quinta edición. ISBN 0673985547. ISBN-13 978-9701008904.
- Gude, Dietmar; Poweleit, Dettlev y Psaralidis, Elena (1998-18 de diciembre de 2008). CiteSeer X Beta. Condition-based Preventive Maintenance [en línea]. En: *Preventive maintenance strategies of semi-autonomous work groups in flexible manufacturing, Abstract*. CiteSeer X Beta [libro]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.29.1104>. - <http://www.ergonetz.de/maintenance/downloads/gpp98.pdf>.
- Hair, Joseph F.; Anderson, Ralph y Tatham, Ronald (2005). *Multivariate Data Analysis* [libro]. New York: Editorial Prentice-Hall: p. 928. ISBN 0130329290. ISBN-13 978-0130329295 .
- Haj, Shirmohammad Ali y Wedley, William C. (2004). Maintenance management. An AHP application for centralization/decentralization [publicación periódica]. En: *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. Bradford, England: Emerald Group Publishing Limited. ISSN 1355-2511: Vol. 10: pp. 16-25.
- Halpern, Siegmund (1978). *The Assurance Sciences: An Introduction to Quality Control and Reliability. The Assurance Sciences* [libro]. New Jersey City: Editorial Prentice Hall, Inc. Professional Technical. ISBN: 0130496014.
- Harris, Gray W. (1994). *Living with Murphy's law. Research-Technology Management* [libro]. Estados Unidos [s. n.]. Vol. 37, I ss. 1: pp. 10-13.
- Hecht, Myron y Jady, Handal (2001). *An Analytical Model for Predicting the Impact of Maintenance Resource Allocation on National Airspace System Availability* [libro]. Beverly Hills [s. n.]: pp. 46-52.
- Hiatt, Bruce (2000-20 de octubre de 2008). A 13 Step Program in Establishing a World Class Maintenance Organization [en línea]. En: *Best Practices Maintenance*. Estados Unidos. <http://www.tpmonline.com/articles/management/13steps.htm>. Email: bhiatt@anesta.com, bhiatt4419@aol.com.
- Hjorth, U. (1970). An iterative linear prediction method. En: *ZAMM* 50: pp. 445-454.
- Hjorth, U. (1980). A reliability distribution with increasing, decreasing, constant and bathtubshaped failure rates. En: *Technometrics* 22: pp. 99-109.
- Hjorth, U. (2005-1 de diciembre de 2008). *Hjorth Distribution* [en línea]. *Distribución Hjorth* [libro]. <http://rss.acs.unt.edu/Rdoc/library/rmutil/html/Hjorth.html>.
- Hronec, Steven M. (1995). Signos vitales. El empleo de las medidas del rendimiento, de la calidad, el tiempo y el coste para proyectar el futuro de la empresa. En: Arthur Andersen: *Signos vitales* [libro]. Ed. Edigrafos S.A. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.: p. 300. ISBN: 0-8144-5073-3.

- Hughes, Howard (20 de octubre de 2008). *Biografía de Howard Hughes* [en línea]. <http://www.spartacus.schoolnet.co.uk/JFKhughesH.htm>
- Husband, Tom M. (1976). *Maintenance Management and Terotechnology* [libro] [s. l.]: Ed. House Saxon. New York: Ashgate Publishing, Limited. ISBN 0566-00146-2.
- IATA, International Air Transport Association: Asociación Internacional del Transporte Aéreo (17 de octubre de 2008) [en línea]. IATA. <http://www.iata.org/index.htm>.
- Idcon Inc. USA (2000-20 de diciembre de 2008). Mantenimiento orientado por resultados [en línea]. Idcon. Raleigh. North Caroline, USA. Prod. Philosophy Idcon. Approach. <http://www.Idcon.com/article-prevopti.htm> - <http://www.idcon.com/Idcon-Corp-Broch.pdf>
- Idhammar, Christer (1997a-julio). Maintenance management: Moving from reactive to results-oriented. En: *Journal Review Pima's Papermaker* [libro]. C. Idhammar es el Presidente de Idcon, Raleigh, NC. ISBN: 02018-00038.
- Idhammar, Christer (1997b). *Results Oriented Maintenance™ Management Book* [Informe]. Estados Unidos.
- Idhammar, Torbjorn (1999-20 de octubre de 2000). A New Preventive Maintenance Implementation and Training Concept [En línea] [libro]. http://maintenanceworld.com/Articles/reliability_jump_start.htm
- Ishikawa, Kaoru (1985). *Guía de control de calidad* [libro] [s. l.]: Editorial Quality Resources. ISBN 089059046X.
- Johnson L. P. (octubre de 1995). *Improvingt Equipment Reliability at Plant Efficiency through PM Optimisation at Kewaunee Nuclear power Plant* [publicación periódica]. PMO / SMRP 3rd Annual Conference. Ed. The Society for Maintenance and Reliability Professionals (SMRP). Chicago, Illinois, Estados Unidos de América [s. n.].
- Jones, Richard (1995). *Risk Based Management: A realibility. Centered Approach*. Gulf Publishing Company [libro]. Houston: Gulf Professional Publishing: p. 282. ISBN-10 0884157857. ISBN-13 978-0884157854.
- Kaplan, Robert S. y Norton, David P. (1997). *El cuadro de mando integral. Balanced ScoreCard* [edición especial]. *KPGM Latinoamérica* [libro]. Barcelona: Ediciones Gestión 2000, S.A. Primera edición: p. 322. ISBN 84-8088-175-5.
- Kapur, Kailash C. y Lamberson, Leonard R. (1977). *Reliability in engineering design* [libro]. Ed. Org. Wayne State Univ. Dept. of Industrial Engineering and Operations Research. Detroit, MI (USA). ; New York: John Wiley and Sons, Inc. Primera edición: p. 606. ISBN-13: 978-0-471-51191-5.
- Kececioglu, Dimitri (1995). *Maintainability, Availability, and Operational Readiness Engineering* [libro]. New Jersey City: Editorial Prentice-Hall Professional Technical. ISBN: 0135736277.
- Kelly, Anthony y Harris, M. J. (1998). *Gestión del mantenimiento industrial* [libro]. Ed. Gráficas Mar-Car S.A. Madrid: Fundación Repsol Publicaciones e Impreso en Gráficas del Mar. Traducido por Gerardo Álvarez Cuervo y equipo de trabajo: p. 218. ISBN: 84-923506-0-1 – T.

- Kiyosaki, Robert T. y Lechter, Sharon L. (2000). *Padre rico, padre pobre* [libro]. Ed. Gold Press Inc. Buenos Aires: Time and Monkey Network Editions: p. 220. ISBN 987-97024-5-X o 0-943856-1-9.
- Klusman, Robert A. (1995). *Establishing Proactive Maintenance Management. Review Journal Water. Engineering and Management* [libro]. Estados Unidos [s. n.]: pp. 18-20.
- Knezevic, Jezdimir (1996). *Mantenibilidad* [libro]. Madrid: Editorial Isdefe. ISBN: 84-89338-08-6.
- Kume, Hitochi (1992). *Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad* [libro]. Bogotá: Grupo Editorial Norma: pp. 171-172. ISBN: 958-041541-2.
- Ladiray, Dominique y Quenneville, Benoît (abril de 2000-2001). *Methodologica* [publicación periódica]. Desestacionalizar con el método x-11. En: *Revue des techniques, méthodes et instruments de recherche en sciences humaines*. Ed. Bruxelles Laboratoire de Méthodologie du Traitement des Données. Université Libre de Bruxelles. Bruxelles, Belgique. Nos. 8-9: p. 236. Traducción al castellano: Eduardo Crivisqui. Ver sección 2.2. ISSN: 0778-7553.
- Langan, George (1995). *Maintenance automation. Review I.I.E. Solutions* [libro]. Maintenance automation. USA [s. n.]. Vol. 27, No. 7: pp. 14-17.
- Latino, Robert (15 de octubre de 2008). Applied Industrial Training Pays-off [en línea]. *Maintenance Technology* (junio de 1999b) [libro]. <http://www.reliability.com/article25.htm>
- Latino, Robert (agosto de 1999a -20 de octubre de 2008). The failure dilemma [en línea]. *Reliability Center, Inc.* [libro]. <http://www.reliability.com/article18.htm> or <http://www.maintenanceresources.com/referencelibrary/failureanalysis/dilemma.htm>
- Leemis, Lawrence M. (1995). *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods* [libro]. New Jersey City: Editorial Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering. ISBN: 0-13-720517-1.
- Levin, Richard (1996). *Estadística para Administradores* [libro]. Ciudad de México: Prentice Hall: p. 1171. Trata bien el teorema del límite central. ISBN: 978-9688806753.
- Lewis Elmer E. (1995). *Introduction to Reliability Engineering* [libro] [s. l.]: Editorial John Wiley and Sons, Inc. Segunda edición: p. 435. ISBN: 0471018333.
- Lorick, Harry y Varela, Steve (mayo de 1998). *Infrastructure Maintenance System* [publicación periódica]. Estados Unidos: Ed. Review Public Works [s. n.]: pp. 46-47. ISBN 9780965618380. ISBN: B000987KYW.
- Marks, John (1997). *Combining TPM and reliability-focused maintenance (RCM), reliability centered maintenance, electric maintenance and repair*. USA [s. n.]. Vol. 211: pp. 49-52. ISSN 0013-4457.
- Mather, Daryl. *The Maintenance ScoreCard. Creating Strategic Advantage*. Ed. Carleo John. New York: Industrial Press, Inc. (2005): p. 257.
- Modarres, Mohammed (1993). *What Every Engineer Should Know About Reliability and Risk Analysis* [libro]. New York City: Editorial Marcel Dekker: p. 351. ISBN: 082478958X.
- Molinero, Luis M. (12 de diciembre de 2008). Asociación de la Sociedad Española de Hipertensión [en línea]. Análisis de series temporales. Liga Española para la lucha contra la Hipertensión Arterial.

- Alce Ingeniería* (enero de 2004) [libro]. <http://www.seh-lelha.org/tseries.htm> - Email estadística@alceingenieria.net.
- Moore Rath, Ron (20 de octubre de 2008). Fiabilidad, mantenibilidad y mantenimiento proactivo [en línea]. La combinación del TPM y el RCM. La combinación de TPM y RCM. Estudio de un caso práctico. *Gestión de activos industriales* [libro]. www.alcion.es/Download/ArticulosPDF/gai/gratis/04articulo.pdf
- Moore, Clive (agosto de 2001). *Maintability, Another Maintenance Improvement Opportunity* [revisado por Toro y otro] [en línea]. TPM on line. http://www.tpmonline.com/articles_on_total_productive_maintenance/reliability/maintainability.htm
- Mora Gutiérrez, Alberto (1990). *Modelo sistematizado de gerencia y administración del mantenimiento industrial*. Tesis de Magíster de Administración de Empresas [libro]. Medellín: Universidad Eafit Colombia: p. 254.
- Mora Gutiérrez, Alberto (1990c). ¿...Será factible medir la gestión gerencial del mantenimiento...? [libro]. Revista Universidad Eafit, Escuela de Administración y Finanzas y Tecnologías. Medellín: Universidad Eafit. No. 0079: pp. 45-65. ISSN: 0120-341X.
- Mora Gutiérrez, Alberto (1995). Planeación estratégica de alta dirección en empresas de mantenimiento. En: *Revista ACIEM* [libro]. Bogotá: ACIEM, Asociación Colombiana de Ingenieros Electricistas, Mecánicos, Electrónicos y Afines. No. 077.
- Mora Gutiérrez, Alberto (1998a-mayo-junio). ¿...Cómo dimensionar el futuro de una empresa de servicios de mantenimiento? En: *Revista ACIEM* [libro] [publicación periódica]. Bogotá: ACIEM, Asociación Colombiana de Ingenieros Electricistas, Mecánicos, Electrónicos y Afines. Vol. No. 091: pp. 40-43. ISSN 0121-9715.
- Mora Gutiérrez, Alberto (1999). Selección y jerarquización de las variables importantes para la gestión de mantenimiento en empresas usuarias o generadoras de tecnologmas avanzadas [Informe]. *Mantenimiento industrial en empresas de tecnologías avanzadas*: Tesis de doctorado Ph.D. en Ingeniería Industrial *Cum Laude*. Organización de Empresas. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia [s. n.]: p. 370.
- Mora Gutiérrez, Alberto (2007a). *Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios* [libro]. Envigado: AMG. Segunda edición: p. 306. ISBN 978-958-3382185.
- Mora Gutiérrez, Alberto (2007b). *Mantenimiento estratégico empresarial* [libro]. Medellín: Fondo Editorial Fonefit. Primera edición: p. 345. ISBN 978-958-8281-46-9.
- Mora Gutiérrez, Alberto (diciembre de 2007c). *Pronósticos de demanda e Inventarios. Métodos futurísticos* [publicación periódica]. Ed. Ediciones Ultragráficas. Medellín: AMG. ISBN: 978-958-44-0233-2.
- Mora Gutiérrez, Alberto; Pérez Peral, Anastasi y Ortiz Plata, Germán (2003). ¿Indicadores de gestión y operación del mantenimiento? ¡No! ¡Gestar y operar el mantenimiento a partir de indicadores futuros! En: *Revista de la Comisión de Integración Energética Regional Americana* [libro]. Montevideo, Uruguay: CIER -Sin fronteras para la energía. ISSN: 0379-850X.

- Morris, Charles E. (julio-agosto 1999-2006). You can bank on it. Proactive maintenance [en línea]. *Food Engineering. Highlands Ranch*. Ed. Engineering Food.
- Motor (16 de octubre de 2008). *Wikipedia* [en línea]. Motor de interna. http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_combusti%C3%B3n_interna
- Moubray, John (2001-19 de diciembre de 2008). About RCM [en línea]. RCM. Aladon Inglaterra. *Aladon RCM* [libro]. <http://www.aladon.co.uk/02rcm.htm>
- Moubray, John Mitchell (2004). *RCM, Reliability Centered Maintenance*. Industrial Press Inc [libro]. Ed. Biddles Limited Guilford and Rob Lockhart. Trad. Ellman Sueiro y Asociados. Argentina. Leicestershire: Aladon Limited. Primera edición en castellano: p. 433. ISBN 0953#603-2-3.
- Nachlas, Joel (1995). *Fiabilidad* [libro]. Madrid: Icdfe. ISBN: 84-89338-07-8.
- Nakajima Seiichi y otros (1991). *Introducción al TPM. Programa para el Desarrollo* [libro]. Traducido por Gerardo Álvarez Cuervo y Antonio Cuesta. Madrid: Editorial Fundación Repsol Publicaciones e Impreso en Gráficas del Mar. ISBN: 84-87022-81-2.
- Nakajima, Seiichi (2005). Total Productive Maintenance [en línea]. Alexander Witt; Dietrich Kuss; Florenz Lammert; Michael J. Garbade; Alexander Reinbold; Gruppe Nakajima III. http://iswww.bwl.uni-mannheim.de/Lehre/veranstaltungen/pm/Uebung/Nakajima_III_TPM
- Navarro Elola, Luis; Pastor, Ana Clara; Tejedor y Mugaburu Lacabrera, Jaime Miguel (1997). *Gestión integral de mantenimiento* [libro]. Ed. Editores Marcombo Boixareu. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores: p. 112. ISBN 84-267-1121-9.
- Newbrough, E. T. y Ramond Ramond (1982). *Personal de administración del mantenimiento industrial* [libro]. Título en inglés *Effective Maintenance Management*. México, D.F.: Diana. Sexta edición: p. 414. ISBN 968-13-0666-x.
- NS, Nist/Sematech (septiembre de 2005-29 de abril de 2003). E-Haldbook os Statistical Methods [en línea]. <Http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>.
- O'Connor, Patrick D. T. (2002). *Practical Reliability Engineering* [libro]. Stevenage: Wiley - John Wiley and Son. Cuarta edición: p. 540. ISBN: 0-470-84463-9.
- OACI, International Civil Aviation Organization –Organización de la Aviación Civil Internacional (17 de octubre de 2008) [en línea]. OACI-ONU, Organización de las Naciones Unidas [libro]. <http://www.cinu.org.mx/onu/estructura/organismos/oaci.html>
- Oiltech (1995). Mantenimiento Proactivo de sistemas mecánicos lubricados. Oiltech Analysis S. L. [publicación periódica]. *Mantenimiento Proactivo. Fluidos, oleohidráulica, neumática y automatización*. Madrid [s. n.]: pp. 208-209. Vol. 24: pp. 361-362. ISSN 0211-1136.
- OIT-CIUO 88 (1988). *CIUO, Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones* [libro]. Ginebra [s. n.].
- Oreda (2002). *Offshore Reliability Data* [sección del libro]. Trondheim: OREDA and DNV Veritas. Fourth edition. ISBN 82-14-02705-5.

- Oreda. *Offshore Reliability Data Handbook* (1997-2002) [en línea]. http://www.dnv.com/publications/oilgas_news/articles/newoffshorereliabilitydatahandbookoreda.asp. Third edition. Det Norske Veritas. Sintef Industrial Management.
- Otto (16 de octubre de 2008). *Wikipedia* [en línea]. Ciclo de Otto. http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_Otto.
- Palencia Cuenca, Javier Antonio y otros (2006). Aplicación de sistemas expertos en el modelaje de la predicción de fallas. "Breaking Frontiers and Barriers in Engineering: Education, Research and Practice". Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET 2006). Mayagüez, Puerto Rico [s. n.].
- Patton, Joseph D. Jr. (1995). Preventive Maintenance. The International Society for Measurement and Control. *Instrument Society of America* [libro]. Vol. Second edition. ISBN 1-55617-533-7.
- Peterson, Brad (1999). To Centralized or decentralized maintenance, central issue [en línea]. Strategic Asset Management Inc. En: *MT-Magazine de MT-Online. Perfiles de Ingeniería*. <http://www.camicorp.com> Email bp0439@aol.com.
- PilaresTPM (2006-18 de diciembre de 2008). Action Group [en línea]. Los Pilares del TPM (Una estrategia de implementación Lean). Mejora Continua + RRHH + Desarrollo Organizacional. Action Group. http://www.actiongroup.com.ar/implementar_tpm.htm
- Piotrowski, John (2001). Why Shaft Misalignment Continues to Befuddle and Undermine Even the Best CBM and Pro-Active Maintenance Programs [en línea]. <http://www.turvac.com/>.
- Pirret, Richard (2 de agosto de 1999-20 de octubre de 2008). Proactive calibration helps drive productivity higher. I and CS. Tel.: 425-356-5277 [en línea]. Procesos de calibración con la ayuda de tecnologías avanzadas. Chemical Online. What's new in Process Calibration?). <http://www.chemicalonline.com/article.mvc/Whats-new-in-Process-Calibration-0001?VNETCOOKIE=NO>. Fluke Corp., POB 9090, Everett, WA 98206.
- Porter, Michael Eugene (1999). *Ser competitivo* [libro]. Bilbao: Ediciones Deusto S.A.: p. 625. ISBN: 84-234-1653-4.
- Prahalad, C. K. y Hamem, Gary (1991). *The core competences of the corporation* [libro] [s. l.]: Harvard Deusto Business Review Referencia 90.311: pp. 47-67.
- RAE, Real Academia Española (22 de septiembre de 2008). *Diccionario del habla castellana* [en línea]. RAE. http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=mantener. España.
- Ramakumar, Ramachandra (1996). *Engineering Reliability. Fundamentals and Applications* [libro]. New Jersey City: Editorial Prentice-Hall Professional Technical: p. 482. ISBN: 0132767597.
- Rath Moore, Ron (julio-agosto de 1999-18 de diciembre de 2008). Ingeniería y gestión del mantenimiento. Fiabilidad, mantenibilidad y mantenimiento proactivo [en línea]. En: *La combinación del TPM y del RCM*. Ed. Dialnet. Universidad de La Rioja, España. www.alcion.es/Download/ArticulosPDF/gai/gratis/04articulo.pdf. ISSN: 1695-3754.
- RCM ScoreCard (9 de marzo de 2005-2008). Reliability Centered Maintenance (RCM). ScoreCard [en línea]. En: *RCM ScoreCard* [libro]. <http://www.maintenance-news.com/cgi-script/CSUpload/>

- CSUpload.cgi?database=Reliability%20Centered%20Maintenance%20Managers'%20Forum%20Downloads.db&command=viewupload&id=1.
- RCM ScoreCard Blitz (2005). *Dictionary of Information at your fingertips* [en línea]. <http://www.mt-online.com/articles/1004internet.cfm> - <http://www.babylon.com>.
- Reed, Rudell Jr. (1971). *Location, Layout y mantenimiento de planta* [libro]. Traducido de *Location, Layout, and Maintenance* por Thomas Juan G. Ed. S.A. Pedro García. Buenos Aires: Editorial El Ateneo: p. 222.
- Reiter, William y Lorick, Harry C. (abril de 1994). *Retrospective: A county's experience with maintenance management* [publicación periódica]. En: *Review Public Works*. Estados Unidos de América [s. n.]. ISBN 9780965618380 ISBN: B000987KYW: pp. 66-67.
- Reliasoft (12 de noviembre de 2008). *Reliasoft* [en línea]. Reliasoft <http://www.reliasoft.com/support/faq.htm>
- Renacimiento (29 de septiembre de 2008). *Época de Renacimiento* [en línea]. Monografías.com <http://www.monografias.com/trabajos5/rena/rena.shtml>.
- Rey Sacristán Francisco (1996). *Hacia la excelencia en mantenimiento* [libro]. Madrid: Tgp Hoshin, S. L.: p. 411. ISBN 84-87022-21-9.
- Rey Sacristán, Francisco (2003). *TPM, Mantenimiento Total de la Producción* [libro]. Ed. Fundación Confemetal. Madrid: Fundación Confemetal: p. 311. 9788495428493.
- Ricardo, David (1817). *On the Principles of Political Economy and Taxation* [libro]. Ayuso, Inglaterra.
- Riis, Jens O.; Luxhøj James T. y Thorsteinsson, Uffe (1997). *A Situational Maintenance Model* [publicación periódica]. En: *International Journal of Quality and Reliability Management*. Bradford, England: MCB UP Ltd. Issue 4: Vol. 14: pp. 349-366. *Revista Estudio Eureka*. ISSN 0265-671X.
- Roberts, Jack (20 de octubre de 2008). TPM, Total Productive History and Basic Implementation [en línea]. Manejo y mantenimiento productivo total. *TPM on line* [libro]. www.tpmonline.com/article/tpm/tpmroberts.htm.
- Rodolfi, Gianni (19 de enero de 2000). Il guasto e l'esigenza della manutenzione [en línea]. http://www.smnweb.com/pragma/adapt98/tpm/g_tpm1.htm - http://www.smnweb.com/pragma/adapt98/tpm/g_tpm1.htm
- Rojas Arias, Jaime (1975). *Introducción a la confiabilidad* [libro]. Bogotá: Universidad de Los Andes: p. 214.
- Samuelson, Paul y Nordhaus, William D. (1996). *Economía* [libro]. Madrid: Editorial McGraw-Hill/ Interamericana de España, S.A. Décimoquinta edición. ISBN 84-481-0607-5.
- Santesmases Mestre, Miguel (2003). *DYANE 2. Diseño y análisis de encuestas en investigación social y de mercados* [libro]. Madrid, España: Ediciones Pirámide. Grupo Editorial Anaya: p. 29. ISBN: 84-368-1557-2.
- Savery, Thomas (12 de noviembre de 2008). *Wikipedia* [en línea]. *Avances máquina de vapor de T. Savery*. Inventores del Reino Unido. *Wikipedia*. http://es.wikipedia.org/wiki/Thomas_Savery

- Schultz, Bob (2005-18 de diciembre de 2008). Un líder sin una visión, no es más que un simple jefe. En: Terry Wireman: *Mantenimiento clase mundial* [en línea]. http://www.tpmonline.com/articles_on_total_productive_maintenance/management/senecesitanlideres.htm
- Sherwin, David J. y Jonson, Patrick (1995). TQM, maintenance and plant availability. En: *Journal of Quality in Maintenance Engineering* [publicación periódica]. West Yorkshire [s. n.]. Primera edición: Vol. 1. ISSN: 1355-2511.
- Smith, Anthony M. (1992). *Reliability Centered Maintenance* [libro]. New York: McGraw-Hill, Inc. School Education Group. Primera edición. ISBN 007059046X.
- Smith, Anthony M. y Hinchcliffe Glenn, R. (2003). *RCM. Gateway to World Class Maintenance* [libro]. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann. Primera edición. ISBN 0-7506-7461-X.
- Smith, Charles O. (1983). *Introduction to Reliability in Design* [libro]. Malabar: Robert E. Krieger Publishing Company. ISBN: 0898745535.
- Smith, K. (1998). *Modern Concepts and Methods in Maintenance* [libro]. USA [s. n.].
- Sotskov, B. (1972). *Fundamentos de la teoría del cálculo de la fiabilidad de elementos y dispositivos de automatización y técnica del cálculo* [libro]. Moscú: Editorial MIR: p. 264.
- Souris, Jean-Paul (1992). *El mantenimiento: fuente de beneficios*. Traducido por Diorki, S.A., Madrid, de la obra original *La maintenance, source de profits* [libro]. ISBN 2-7081-1136-1. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A.: p. 183. ISBN 84-7978-021-5.
- Stamatis, D. H. (1995). *Failure Mode and Effect Analysis, FMEA, from Theory to Execution* [libro]. Ed. BookCrafters Inc. Wisconsin: ASQC Quality Press: p. 496. ISBN 0-87389-300-X.
- Steiner, George A. (febrero de 1985). *Planeación estratégica* [libro]. México, D.F.: Compañía Editorial Continental, S.A. de CV, México. Tercera impresión: p. 366. ISBN 0-02-931110-1.
- Táctica (20 de octubre de 2008). *Wikipedia* [en línea]. *Táctica* [libro]. <http://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%A1ctica>.
- Taguchi, G. y Elsayed Hsiang, E.A. (1989). *Quality Engineering in Production System* [libro]. Quality Engineering in Production System. New York: Editorial McGraw-Hill: p. 192. ISBN-10: 0070628300, ISBN-13: 978-0070628304.
- Tamborero Del Pino, José María (2005-1 de 12 de 2008). *NTP 331: Fiabilidad. Weibull* [libro y pdf] [en línea]. España: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Ministerio del Trabajo y Asuntos Sociales, España, Gobierno español. http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_.
- Tavares Lourival, Augusto; Calixto Marco A. y Poydo Gonzaga, Paulo Roberto (2005). *Manutenção Centrada no Negócio* [libro]. Río de Janeiro: Novo Polo Publicações: p. 160. Ley 5988 de diciembre de 1973. Decreto 1825 de diciembre de 1987.
- Tavares Lourival, Augusto; Calixto, Marco A.; Gonzaga dos Santos, Paulo Roberto y Da Silva, João Esmeraldo (2007). *Gestión estratégica en activos de mantenimiento* [libro]. Ed. Alcántara, Marco Antonio. Mérida: Ediciones Técnicas. Primera edición: p. 180.

- Thompson, G. (marzo 8 de 1980). *Engineering Design and Terotechnology* [libro]. Manchester: Department of Mechanical Engineering. UMIST. M601QD.
- Thorsteinsson, Uffe; Luxhoj, James T. y Riis, Jens O. (1997). *Trends and Perspectives in industrial Maintenance Management* [publicación periódica]. En: *Journal of Manufacturing Systems*. Dearborn, Michigan, Estados Unidos: Universidad de Michigan. No. 6: Vol. 16. http://www.elsevier.com/wps/find/journaleditorialboard.cws_home/405902/editorialboard#editorialboard. ISSN 0278-6125.
- TPM, Manejo y Mantenimiento Productivo Total (20 de octubre de 2008). TPM [en línea]. *Wikipedia* [libro]. http://es.wikipedia.org/wiki/Mantenimiento_Productivo_Total
- Trofeé, Mario (30 de mayo de 2006-21 de diciembre de 2008). Análisis ISO 14224 OREDA. Relación con RCM - FMEA [en línea]. *Mantenimiento mundial*) <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/0605MarioTroffeISO14224.pdf>
- Troyer, Drew (marzo de 2001-19 de diciembre de 2008). RCM and Oil Analysis [en línea]. Reliability Centered Maintenance and its Meaning to the Oil Analysis Professional. Maintenance Resources. RCM and Oil Analysis. Estados Unidos. <http://www.maintenanceresources.com/referencelibrary/ezine/rcm.htm> - <http://www.maintenanceresources.com/ReferenceLibrAry/ezine/rcm.htm#up1>
- Trujillo, Gerardo (1999a-20 de octubre de 2008). Implementación de un programa de mantenimiento proactivo [en línea]. *Noria Latin America* [libro]. lubecons@gto1.telmex.com.mx
- Trujillo, Gerardo (2008). El mantenimiento proactivo como una herramienta para entender la vida de los equipos. En: *Noria Latin America*. !999b [en línea]. <http://www.noria.com/sp/recursos/aprendizaje/man6.asp>. E-mail: lubecons@gto1.telmex.com.m
- Tsuchiya, Seiji (1995). *Mantenimiento de calidad: cero defectos a través de la gestión del equipo* [libro]. Estados Unidos: Productivity Press Inc.: pp. 2-4. ISBN 8487022162, ISBN 13 9788487022166.
- Turner, Steve (01 de agosto de 2007-19 de octubre de 2008). OCMS Latin America [en línea]. Optimización del plan de mantenimiento. Diferencias entre RCM y PMO, Planned Maintenance Optimisation. <http://www.confiableidad.net/invitados/Diferencias%20entre%20PMO%20y%20RCM.pdf>
- Turner, Steve (2005-diciembre de 2008). OMSC International [en línea]. Planned Maintenance Optimisation. Prod. Australia OMCS. Disponible en www.pmo2000.com [libro]. <http://www.omcsinTernational.com/>. ISSN: 0026-2714.
- Turriano Juanelo (2008). Los veinte y un libros de los ingenios y máquinas de Juanelo Turriano [en línea]. *Automátas*. CPS - Unizar. España. Prod. Biografías. <http://automata.cps.unizar.es/Biografias/Turriano.htm> (Nace en Italia en 1501 y muere en España en 1575).
- Uexcüll, J. Von (1920-1994). *Umwelt und Innenwelt der tiere* [libro]. Berlín, Alemania. Referenciado por Bertalanffy. Segunda edición.
- Vallejo Jaramillo, Juan Santiago y Mora Gutiérrez, Luis Alberto (director) (2004). *Desarrollo, validación, contraste y pronóstico del cálculo CMD*. Trabajo de fin de carrera de Ingeniería Mecánica [libro]. Medellín: Universidad Eafit.

- Venkatesan, Ravi (1 de noviembre de 1992). *Strategic Sourcing: To make or no to make?* [publicación periódica]. *Harvard Business Review*. Boston, Massachusetts, Estados Unidos: Harvard Business Review. 92610: Vol. 59: pp. 14-28. ISSN: 1698 5117.
- Vibraciones (16 de diciembre de 2008). DLI Engineering *Vibraciones* [en línea]. [www.DLIEngineering.com](http://www.dliengineering.com). Ed. Engineering DLI. Prod. Engineering DLI. <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/historiadelanlisisdevibracinyusoenelmantenimientodemaquinaria.htm>
- Vitruvio Polión, Marco (2008). *De Architectura. Tratado* [libro]. Madrid: Gredos. Libro original escrito entre los años 23-27 antes de Jesucristo. Citado por Bautista. ISBN 9788424902100.
- Wakefield, Colin (1985). Quality assurance in maintenance. En: *The South African Mechanical Engineer* [libro]. Estados Unidos [s. n.]. Vol. 5: p. 68.
- Watt, James. James Watt (octubre 1 de 2008). *Wikipedia* [en línea]. *Wikipedia Commons*. http://es.wikipedia.org/wiki/James_Watt.
- Weiss, W. H. (1998). Make computerized maintenance management systems payoff. En: *Journal Review Hydrocarbon processing* [libro]. Estados Unidos [s. n.].
- White, E. N. (1975). *Terotechnology. Physical Asset Management* [libro]. Ed. Manchester. Inglaterra [s. n.]. Libro en Biblioteca de la Universidad Eafit.
- Whorf, B. L. (1952-1994). *Collected Papers on Metalinguistic* [libro]. Foreign Service Institute. Department of State Washington, Estados Unidos: Referenciado por Bertalanffy.
- Whorf, B. L. (1953-1994). *Language, Thought and Reality*. Selected Writings of B. L. Whorf and John Caboll [libro]. Nueva York, Estados Unidos: Ed. John Wiley and Sons. Referenciado por Bertalanffy.
- Williamson, Robert M. (20 de octubre de 2008). Focus on Results and Change the Culture Along the Way [en línea]. En: *Maintenance World* [libro]. <http://gww.maintenanceworld.com/Articles/williamson/focuson.html>. President of Strategic Work Systems. Email robertmw2@cs.com
- Williamson, Robert M. y Wireman, T. (1994). *Computerized Maintenance Management System*. [s. l.]. Editorial Industrial Press
- Wilson Paul F.; Dell, Larry D. y Anderson, Gaylor F. (1993). *Root Cause Analysis: A Tool for Total Quality Management*. American Society for Quality, AAQ [libro]. Milwaukee [s. n.]: p. 216. ISBN: 0-87389-163-5, ISBN-13: 978-0873891639.
- Wireman, Terry (1994). *Computerized Maintenance Management System* [libro] [s. l.]: Editorial Industrial Press. ISBN: 0831130547.
- Wireman, Terry (2001). *Word Class Maintenance Management* [libro]. Estados Unidos de América: Industrial Press, Inc. ISBN 0-8311-3025-3.
- Wireman, Terry (2004). *Total Preventive Maintenance (TPM)*. [libro]. Nueva York [s. n.]. ISBN: 0831131721.
- Woodcroft, Bennet (1851). *The Pneumatics of Hero of Alexandria* [libro]. Londres: Taylor Walton and Maberly. Citado por Bautista.

- Wrennall, William y Quaterman, Lee (1994). *Handbook of Commercial and Industrial Facilities Management* [libro]. New York: Editorial McGraw-Hill. ISBN: 0070719357.
- Wright (16 de octubre de 2008). *Ciencia y cultura* [en línea]. El primer vuelo de los hermanos Wright duró 12 segundos. <http://cultura.terra.es/cac/articulo/html/cac2537.htm>
- Yamashina, Hajime (1995). Japanese manufacturing strategy and the role of Total Productive Maintenance, TPM. En: *Journal of Quality in Maintenance Engineering* [libro]. West Yorkshire [s. n.]. Vol. 1. ISSN: 1355-2511.

ÍNDICE

- acción(es):
correctivas de mantenimiento 11,14,
20,28,49,57,62,68,72-73,78,83,107,222,234,237
correctivas, tipos de 426
hacer 11
modificativas 237,426-428
no planeadas, correctivas o modificativas
/ curvas de ejemplo integral CMD /
disponibilidad Beta 237
preventivas 429-430
preventivas y predictivas 432
y tareas proactivas con mayor nivel de
criticidad 360
- activo(s):
ciclo de vida de los 33
gestión de mantenimiento 5,303,444
y pasivos, diferencia entre activos y 18-19
- AFNOR 462,462:
definición de calidad 297
- ajuste(s): 169,249,256-257,261,303,318-319,400-
401,429,431-432
bondad de 1,69,73,75-76,115,119,139,161,
169,180,199,201,206,219-220,222,226,228-
229,232,246,249,254,257,261
por tendencia 254,256
- Alcock John William y Whitten Brown Arthur,
el primer trayecto aéreo transatlántico sin
escalas 10
- Arthur Andersen, Casa 478
- alineación(es):
criterios de calidad de la 159
valores que se obtienen en no confiabilidad y
en mantenibilidad 183
- Americana de Método Jerárquico Analítico de
componentes principales -*Eigen Value* y
Eigen Vector-, herramienta 395
- análisis:
de fallas 338,340-343,350
de fallas, FMECA, RCFA y RPN 34,327,329
de la confiabilidad influenciada por
reparaciones futuras estimadas de corto
plazo 23
- de la posición de los diferentes modelos de
pronósticos 63, 253-254
de posición tendencial 253
por componentes principales 426-427
y el diagnóstico 397,400-401
- Anderson-Darling:
prueba de 69,73,75,114,119,180, 199,201,203-
204,217,226,228-229
prueba de, para datos de una población 213
valores críticos en prueba de 204
valores críticos en prueba de, para
distribuciones Normal y LogNormal 204
valores críticos en prueba de, para muestras
de población(es) pequeña(s) 204
- AOD:
recursos 57
usuarios 49
- AR.I.MA:
características de los 256
de series temporales 434
metodología 249
metodología Box-Jenkins 249,256-258
modelos 64,253-256,258,267,390
modelos multivariados 256
modelos, de Parzen, modelo filtrado o de
Kalman, modelo de variaciones, FORSYS de
Lewandowski 256
modernos, descripción de los modelos 255-
256
procesos generales de los modelos, con
metodología Box-Jenkins 258
programas para 261
promedio móvil autorregresivo 256-257
- Árbones 363
- área(s):
de producción 13,16,105,395
y tópicos que cubre y diagnostica el *Flash
Audit* 395
- asignación, método de, pasos del 372-373
- auditorías, evaluaciones, diagnósticos, mediciones
del área 394
- aviación, la: avances interesantes últimos siglos /

Roger Bacon descubre que el aire soporta objetos. / Leonardo da Vinci aporta diseños para construir aeronaves. Los franceses Penaud, en 1871, y Victor Tatin construyen modelos que vuelan por períodos y trayectos cortos. En 1891, un aparato de Lawrence Hargrave vuela 95 metros. Pierpont Langley, en 1896, vuela con un aeroplano casi 1.200 metros. El 17 de diciembre de 1903, los hermanos Wright, en la ciudad de Kitty Hawk, logran vuelos significativos que son la base para el posterior desarrollo vertiginoso de la aviación con sus modelos *Flyer*, *Flyer II* y *Flyer III*, que alcanzan volar más de media hora, en Francia en agosto de 1908 con su aeroplano de motor. / Se establece la primera fábrica de aviones del mundo de los hermanos Voisin en París. Con estos aviones, el *Levasseur Antoinette* (con un motor de vapor de 40 HP, pilotado por A. Santos D. en 1906 recorre 220 metros en 22,5 segundos, y el piloto Henri Farman en otro avión de los Voisin, vuela más de dos minutos en 1907. En 1909, Orville (uno de los hermanos Wright) completa con un avión los requisitos de vuelo del Cuerpo de Señales del Ejército de los Estados Unidos, lo que constituye el primer aeroplano operativo con funciones militares. / Glenn Hammond Curtiss vuela un dirigible de Thomas Baldwin, en 1907, y cuatro años más tarde sirve de piloto al primer hidroavión. / Louis Blériot cruza el canal de la Mancha, en 35 minutos. En un recorrido de 37 km, que realizó Earle Ovington, en 1911, hace vuelos en Estados Unidos con correo a bordo. Durante la Primera Guerra Mundial y en los años sucesivos se construyen más aviones que en los últimos quince años. Calbraith P. Rodgers realiza el primer vuelo transcontinental en 1911. Y los británicos John William Alcock y Arthur Whitten Brown hacen el primer trayecto aéreo transatlántico sin escalas, en 1919. En 1927, Charles A. Lindbergh cruza en solitario el océano Atlántico. En 1944, los Estados Unidos alcanzan a fabricar 97.694 aviones, y Alemania agrega dos nuevos aportes a la aviación: motores de reacción para aviones y el primer proyectil volante. Durante la Segunda Guerra Mundial se logran importantes avances de todo género

en la navegación aérea. Hacia 1986, se logra el primer vuelo de una aeronave ligera alrededor del mundo sin escalas. En 1947, nacen la OACI y la IATA como entidades reguladoras del transporte aéreo mundial, ambas con sede en Montreal (Canadá) 9-10

- Bacon Roger 9
- Balanced ScoreCard* 17,32,272,307-308,445
- Ballou, Ronal 363,378,380,382,384,387
- bases de datos 13,276-277
- Benard, aproximación de 120,126
- Benchmarking*, como herramienta 308,461,463
- Ben-Dayay y Duffuaa, modelos para relacionar mantenimiento con calidad 296
- Benz Karl 8
- Beta, LogNormal, Weibull 180
- distribución 183
- de Weibull 143,180,183-184
- bienes y servicios, función primaria de la producción 295
- Blériot Louis 9
- Bloom, Barret y Gagñé, escala 41,139,219,269,423
- Box, G. E. P. 256
- Box y Jenkins:
 - metodología integradora 256
 - metodología de ARI.MA 257
- Brown, modelos de 256
- cálculo(s):
 - aplicación integral con 270
 - de la disponibilidad 119-120
 - mediante los modelos de confiabilidad y mantenibilidad al utilizar distribuciones 115
 - puntual del tiempo medio entre fallas 164
 - y estimación del CMD 263
 - condiciones no estándar, las, que dan lugar a las fallas en sistemas mecánicos 452
 - contaminación del fluido excesiva 452
- capital de trabajo / espacio físico / tecnología / maquinaria / recursos naturales / poder de negociación / recursos humanos / carga laboral, / planeación 273
- Casa ESReDa, niveles de mantenimiento de la 53
- categorización de mantenimiento 52
- causa raíz de las fallas, la 452
- causa-efecto, diagramas 312-313
- causa(s):
 - inmediatas de daños y hechos en el equipo 332
 - raíz, búsqueda de la 339
- cazafallas, grupo 333
- Chi cuadrado, prueba de
 - 69,73,75,114,119,180,199,205-206,226,228-229,232

- ciclo de vida:
 del sistema o elemento que se evalúa, al tener las tres fases de la tasa de fallas con alguna de estas distribuciones 265
 de los activos (*ver* LCC)
 ciencia, definición de Grijalbo y Mondadori 42
- CIUO-88 5,48
- CIUO / OIT 48-49
- Clasificación ABC, manejo de inventarios 362
- Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones (*ver* CIUO)
- CMD:
 análisis en plantas grandes y complejas 207
 aplicaciones / estrategias y acciones 219
 comportamiento del 93
 de corto plazo, pronósticos de indicadores 43,59,249,272,441,453,474
 diferentes niveles de cálculo para el, fases 263
 estimación y predicción del 95
 estrategias y acciones del *ScoreCard* / análisis de confiabilidad Beta 219
 indicadores 43,58,244,249,251,253,257,259,261,272
 indicadores calculados 272
 interacción 62
 medición 65,272
 mediciones en turbinas pronosticadas con series temporales 260
 metodología / métodos 62
 métodos de predicción / modelos 62-63
 modelo universal para el manejo 65
 síntesis universal de 68-69
 valores 275
 ventajas del estudio científico y matemático del 62
- CMMS 277
- coeficiente(s):
 de autocorrelación parcial 257 (*ver* PACF)
 de autocorrelación simple 257 (*ver* ACF)
 de correlación múltiple 73,161,167,174,182,189,216,226,228-229,318
 de determinación muestral 73,160,167-168,174-175,182-183,189,199,216,226,228-229,232,318-319,322-323
- cola(s) 203
- Comisión Eureka 35
- componente / elemento 207
- componentes, inspección visual, acústica y al tacto de 405
- comportamiento futuro en tiempo real 433
- comportamiento futuro, nuevos cálculos 100,233
- computadores eficaces, aparición de 256
- concepción sistémica kantiana 41
- condición(es):
 ambientales 347
 Beta 108
 cálculo(s) 213
 confiabilidad 95,105
 curva de 97-99,101-103,109,114
 de estado, técnicas de control y monitoreo de 413
 de un sistema de estructura en paralelo con redundancia activa 210
 estudios 23,61
 función(es) de 98,102,143,148,164,170,172,177,179,185,212,214,237-238,264-265
 influenciada por los mantenimientos planeados futuros estimados de corto plazo 253
 influenciada por reparaciones futuras estimadas de corto plazo, análisis de la 237
 ingeniería de 439
 mantenibilidad y disponibilidad 41-42,138,267,435,446,465
 operacionales 347
 predicciones ajustadas a la realidad 261
 tiempos útiles 19,59,62
- control(es):
 corrientes inducidas / circulación de corriente eléctrica por una bobina 411-412
 de la corrosión 406
 de procesos de mantenimiento, gráficos de 320
 de ruido 411
 gráficas de 319
- costo(s):
 asociados a repuestos e insumos 279
 de agotar 364
 de ciclo de vida (*ver* LCC) 471
 de la no disponibilidad por fallas 468
 de pedir al proveedor o fabricar 364
 de sostener 364
 del inventario por mantener 366,368-369
 direccionadores de 32
 fijos 287,467
 fijos variables 276
 financieros 468
- culturas diferentes 6
- curva(s):
 características de Weibull 143
 de confiabilidad, ejemplo de cálculo y obtención de 115-116,118,168
 de Davies o de la bañera 16,73-74,106-

- 109,114,138,142,173,180-181,183,194,196,216-2,238-239-240-242,248,263-268,272,297,438,449
de mantenibilidad 115-116
de no confiabilidad 121,216,272
de productividad 284
de servicios 283
y curvatura de servicios 282-284
y valores de mantenibilidad 130
- Daimler Gottlieb 8
- Da Vinci Leonardo 7,9
- dato(s):
 censurados 131-135,137,194,199,216-217
 censurados, estimación de no confiabilidad con 131
 de vida, análisis de 141
 no temporales 252
 obtención y manejo de, objetivos importantes 310-311
 de Moivre Abraham 169
- Debugging* 107
- denominación Push o Pull 276,371
- densidad / falla, función 237
- densidad:
 curva de función de 237
 de probabilidad de fallas o de falla instantánea, función 143
 función de 237
- desalineación(es) 353,358,408,452
- desarrollo:
 de mantenimiento o producción o de una empresa, medido en términos de espacio y de tiempo (enfoque kantiano): productividad / competitividad 290
 descomposición, modelos de 254
 desempeño satisfactorio 96
 factores productivos 291,293-294,309-310,325,398
- desviación estándar sigma 170-171,175
- diagnóstico, control y rediseño de procesos de mantenimiento y producción 306-308
- diagrama de Ishikawa o de espina de pescado o diagrama de árbol o de río 314
- Dinamarca 33
- dispersión 97,108,142, 144, 159
- dispersión, correlación, regresión lineal, diagramas 317-318
- disponibilidad(es):
 alcanzada 19,68,72-73,81-83
 de mayor uso empresarial 77
 diferentes, de mayor uso empresarial 77
 en los equipos 338
 generalizada 71
- genérica 71,73
 inherente o intrínseca 80,83,362
 operacional 72, 85-89,91,113,138,220
 operacional generalizada 72,138
 relación de 76
- distribución(es):
 acumulada, hipótesis / función de acumulada empírica / especificada 201
 acumulada, hipótesis de 204
 de Anderson-Darling 201
 de Cramer von Mises 201
 de Kolmogórov-Smirnov 201
 de probabilidad continua 185
 de Watson, de Kuiper 201
 de Weibull 98,100,142-144,148,163,165,167-169,173,175,184,196-197, 201,264
 defeccionada 201
 específica 201
 específica para calcular valores críticos o colas 203
 exponencial 119,143,154,180,183-184,481
 Gamma 119,183-186,188-190,193-195,218
 Hastings de dos fases 264-265
 Hjorth de tres fases 265
 LogNormal 154,175-176,178-179,181-182
 LogNormal, de dónde se genera 175
 LogNormal, parámetros μ y σ 176
 métodos visuales 201
 Normal 143,153,168-169-176,193,197,232,237-240,242-243,316-317,321-325,375-376,384,387-389
 Normal, parámetros de 170
 teoría de colas 184
- Dounce Villanueva Enrique, su aproximación a dos actividades básicas en la conservación de los equipos industriales, 54
- Earle Ovington, vuelo con correo 9
- efectos eléctricos, monitoreo de causas y 407
- eficacia, eficiencia, efectividad en términos de mantenimiento 289
- Eigen Value* y *Eigen Vector* 325,395
 ejercicio integral, análisis histórico, presente y futuro cercano de parámetros del 245-246
- El Vaticano, método de 338,341,449
- elementos dañados, evidencias de 340
- Ellis Herman 461
- empresas, revisión estratégica e investigativa e histórica en las 280
- enfoque(s):
 hacia las acciones de mantenimiento, etapas I y II 13-14
 kantiano 43,45-47,52-53,55-56,278,289-290,471

- kantiano integral sistémico de mantenimiento 31
- kantiano, categorías de ingeniería 52
- kantiano, concepciones de espacio y tiempo 53
- recientes de mantenimiento y de producción 13
- sistémico kantiano / factores productivos enunciados por David Ricardo 280
- ensayo(s):
 - de pulverizado de partículas magnéticas y controles no destructivos / instrumentos avanzados de mantenimiento: gammagrafía, rayos X, radiografías, fibras ópticas para exámenes de profundidad, ultrasonido, procedimientos ópticos, tratamientos de imagen, termografía infrarroja, ensayos bajo control, pruebas de aceleración de vida útil 410
 - envejecimiento de Weibull, en la fase III de 168
- época actual: obligación de que los mantenedores manejen un espectro amplio y profundo de conocimiento para la funcionalidad confiable de mecanismos y máquinas 11
- equipo(s) / elemento(s) 207-208
 - capacidad para funcionar 103
 - cuerpo y función de los / efectos del espacio y del tiempo 54
 - funcionalidad de 92
 - funciones principal o primaria y secundarias o de apoyo logístico 348
 - hechos que generan la no funcionalidad y la no disponibilidad de los 361
 - medida de la confiabilidad 95
 - o máquina, estándares establecidos en la descripción de la función de un 349
- era espacial, la:
 - máquinas y artefactos del espacio 10
 - protagonistas: Tsiolkovski Konstantin Eduardovich con sus principios sobre las teorías de vuelos de cohetes y perspectivas de la navegación aeroespacial. / Goddard Robert: gama del conocimiento de cohetes y el comportamiento dinámico de naves en el espacio, lanzamiento por primera vez en el mundo de un cohete movido por combustible líquido 11-12
- escala(s) de frecuencia - riesgo - RPN 359
- espacio kantiano, acción del 54-55
- espacio y tiempo, efecto del 55
- España 33
- EsReDA, casa noruega, *Manual Handbook* 52-53
- estabilidad del entorno 249
- estadístico 216
 - para la prueba de Chi cuadrado 205
- estimación(es):
 - de conjuntos de elementos 263
 - de Kaplan-Meier 120
 - de no confiabilidad y de mantenibilidad 127
 - normal de parámetros 190
 - puntuales 231
- estimado(s):
 - de Kaplan-Meier 120
 - error típico o error estándar del 159
 - ventaja de poseer el(los) 236
- estrategias y acciones futuras 219
- estructura(s):
 - de Weibull 180
 - en paralelo con redundancia activa 210
 - en paralelo o redundante activa 211
 - en serie 208
 - en serie, cálculos 210
 - en *Standby* 211
 - mixta o combinada 211
 - mixta, cálculos de 212
 - relaciones y elementos 58
- estudio(s):
 - de turbulencia o transición 250
 - prospectivos 250
 - proyektivos 250
- Eureka de benchmarking*, estudio 28
- Excel de Microsoft Office, lectura de probabilidades mediante 316
- factor(es):
 - humano, aspectos relevantes que se destacan 278
 - productivo, cantidad óptima a usar en un 283
 - productivo, parámetros de manejo cuando se utiliza más de un 284-285
- falla(s):
 - análisis hasta llegar a la causa raíz y a la implementación efectiva 338
 - árboles de causas de 338
 - calificación de, criterios 352
 - clasificación(es) 350
 - condicional 452
 - consecuencia a que dan lugar las 351
 - consecuencias de una 333
 - constante, intensidad de una 183
 - crónicas 107,328-330,340,446
 - de un sistema, definición 60
 - efectos de las 294

- esporádicas 350
- funcionales reales y potenciales para cada una de las funciones de un sistema de bombeo 343,350
- instantáneas 242
- metodología de análisis de 332
- modos de 331,343
- probabilidad de 103,143-145,157-158,160,171-173,178,186,216,319
- recurrentes 240,328
- tasa de 64-66,80,106-109,114,143-145,148,155,171-173,178-181,183,185-186,193-194,196,212,216,237-240,473
- y sus lazos, modos de 331
- Farman Henri 9
- fase III de Weibull 180
- Fayol, desagregaciones que hace 36
- ferrografía / análisis de lubricantes / análisis espectrométrico / cromatografía 409
- filtros magnéticos 412
- FMECA 17,32,34,106-107,239-242,244-245,248,271,294,305,327-329,337,343-345,347,349-350-351,353,355,357-358-361,432,448,468:
 - análisis de fallas 432
 - etapas de desarrollo 343-344
 - organizador 449
 - procedimiento, volumen de riesgo 359
 - y RCM 327
- fórmula magna de estimación estratégica de mantenimiento, disponibilidad 471
- fugas del fluido 452
- función(es):
 - acumulativa de fallas 144-145
 - de confiabilidad 177
 - de distribución acumulada empírica 201
 - de máxima verosimilitud, MLE 195
 - macroeconómica de la producción 281
- futuro cercano simulado 233
- Francia 8-10,34,462
- Gamma 63,69,74-75,100,111,115,116,118-119
- Gauss, distribución de, o de Laplace (*ver* distribución Normal)
- Gauss, Karl 169
- GCF, miembros del 340
- gestión(es):
 - de activos, etapa VI, enfoque hacia la 18-19
 - de activos, tiempos de reparación y de mantenimientos planeados, reducción tangible de los tiempos (correctivos, modificativos, preventivos, predictivos, de espera o demora de recursos), función principal de los equipos: *DT, MTTR, M* o aumento significativo de los tiempos útiles *MTBM, MTBMC, MTBMP* 18-19
 - de mantenimiento 5
 - de pasivos a gestión de activos, de, tácticas, terotecnología 20-21
 - y manejo de inventarios 18,279,361,404
 - y mantenimiento 36
- Goodness of Fit* 69,75,119,180,201
- Greenberg 401
- grupo(s):
 - cazafallas, identificación en, mediante sombreros 337
 - de análisis de fallas 337-338
 - de trabajo interdisciplinario 24
- Hammond Curtiss Glenn, vuelo en dirigible de Baldwin Thomas 9
- Hard Time* 433
- Hawkn Kitty, ciudad modelos *Flyr I,II,III* 9
- herramienta(s):
 - estadísticas 305-306
 - futurísticas disponibles 259
 - y repuestos e insumos 279
- hipótesis normal, en los modelos proyectivos multivariados 252
- historia del mantenimiento 3
- Holt, modelos de 64,249
- i*-kaésimo, método 68,74,94,120-121,127-130,133,135,150,166,188,197,224-225
- incrementos, método de los 131-132
- indicador(es):
 - establecidos en las empresas / indicadores internacionales LCC y CMD 471-472
 - estratégicos para la alta dirección 469
 - operativos técnico-económicos, de resultados, de factores productivos 470-471
- índice(s):
 - CMD, UT, MTBF, MTTF 19
 - internacionales 465-466
 - inestabilidad química 452
 - física, cavitaciones, inestable temperatura del fluido, condiciones severas de desgaste, desbalanceo, desalineación, deformación de materiales 452
- información(es):
 - sistemas de 35,45,289
 - tópicos que sobresalen en la 276-277
- ingeniería(s):
 - de fábricas 327,424
 - de fábricas, elementos estructurales de 52
 - y las tareas de mantenimiento, OIT 5-6

- Inglesa *Flash Audit*, herramienta, modelo de diagnóstico 394-395
- instrumento(s):
- avanzados específicos de mantenimiento 394
 - básicos de mantenimiento 306
 - nivel instrumental 365-369
 - ISO 9000, norma 24
- JA o *Flash Audit* 24-25:
- herramientas en diagnóstico inicial 438
- Jenkins, G. M. 257
- Kaizen* (ver también mejoramiento continuo) 304
- Kant Immanuel, comprensión de la función del sostenimiento y / o la preservación de los equipos 42
- las 5S, 57,294,299-303,415:
- instrumentos avanzados 299-300
 - la clave del éxito en la implementación 300
 - las mejores prácticas 300-301
 - LCC y CMD, costos, terotecnología 471
 - mejoramiento continuo 303-305
 - objetivos 302
 - principios 300-301
 - ventajas 301
- Lead Time* o tiempo de espera 386
- lean production* o producción ajustada a la demanda 18,296
- leyes, construcción y determinación de, para mantenibilidad con el modelo universal CMD 279
- Life Cycle Cost* 16,466,471-472
- Lindbergh, Charles A. cruza volando el Atlántico 10
- líquidos penetrantes 411
- LogNormal:
- funciones de densidad de probabilidad de fallas y de tasa de fallas en, ecuación 171
 - parámetros de vida útil y de reparaciones 170
- Lorick, referencia a gestión de mantenimiento de 37
- longevidad de los componentes del sistema 452
- lubricación, engrase y aceites 406-407
- magnitud del tiempo 108
- mantenibilidad:
- influenciada por las reparaciones TIR estimadas en el corto plazo, análisis de la función de 241
 - influenciada por las tareas proactivas planeadas estimadas en el corto plazo 241-242
 - ingeniería de 106
 - métodos de estimación y cálculos de la no confiabilidad y de la 120-128
 - mantenimiento(s) 36-37:
 - acciones más adecuadas 13
 - acciones más adecuadas en función del Beta 109,439
 - acciones predictivas 435
 - algunas características de diferentes instrumentos avanzados técnicos de 411-413,416
 - autónomo 440-442
 - autónomo, propósitos del 304-305
 - casas mundiales que tratan el, como SAE, OREDA, EIREDA, ESReDa, ALADON, Military Standard, AFNOR, British Standard 465
 - categorización del 52
 - centrado en confiabilidad, beneficios del 446
 - centrado en confiabilidad, etapas en la implementación global del 449
 - centrado en confiabilidad, útil en empresas 450
 - centrado en habilidades y competencias (*Core Competences Maintenance*) 463-464
 - centrado en la confiabilidad, acciones dentro del RCM 446
 - centrado en la confiabilidad, equipo natural de trabajo 446
 - centrado en la confiabilidad, fundamentos 443-444
 - centrado en la confiabilidad, limitaciones del RCM 445
 - centrado en la confiabilidad, objetivos 444
 - centrado en la confiabilidad, su filosofía 443-444
 - centrado en la confiabilidad, ventajas 444-445
 - centralizado 26-27
 - comportamiento de una, en el tiempo 98
 - concepto de departamento de 46
 - conceptos de actividad / proceso / macroproceso u organización 290-291
 - correctivo 3,14
 - de clase mundial, *World Class Maintenance*, WCM 460-461
 - de producción, inconvenientes de su dependencia 24-25
 - definiciones y significados en 35
 - elementos estructurales, confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad 471
 - en el tiempo, opciones 51-52
 - enfoque sistémico kantiano de vii, 42,45,51,286,294,415,425,437,464-465
 - esquema moderno de 38
 - etapa II, 14
 - etapa III, enfoque hacia la organización

táctica de 15-16,28,31,
 etapa IV, enfoque integral logístico de
 creación de una estrategia de, sistemas de
 costeo propios de, como el LCC 16-17
 etapa V, enfoque hacia las habilidades y
 competencias de, realizaciones de *FMECA*,
RCFA y *RPN* 17-18
 etapas I y II, enfoque hacia las acciones de
 13-14
 etapas I y II, las 13-15
 evolución en tres etapas 1-5
 evolución organizacional y estructural de 26
 factores productivos de 38,275
 fórmula magna de estimación estratégica de
 471
 frente a la producción, objetivo 280-281
 función de 280-281
 funciones primarias 50
 gestión y objetivo de 38-39
 gestión y operación de 289
 historia sucinta de hechos de la ingeniería
 mecánica asociados a 6
 importancia económica y tecnológica de 30-
 31
 industrial, una ciencia ya que cumple todos
 los requisitos para ello por la Real Academia
 Española 42
 ingeniería de 106
 instrumentos 275
 instrumentos avanzados específicos técnicos,
 en
 mapa no planeado / planeado 217,222-223
 nivel 2 de 41,57,425,438
 nivel tres del enfoque sistémico kantiano de
 437
 orientado a resultados 459
 pasos requeridos para seleccionar e
 implementar programas informáticos de 278
 planeados 242
 planeados 275-276
 planeados, ventaja de mantener los Betas en
 264
 predictivo, algunas de las ventajas del 434
 predictivo, principal inconveniente del 435
 preventivo / acciones preventivas, métodos
 más usuales: control de vibraciones, control
 de temperatura, termografía, inspección
 visual, control de fisuras, teoría de
 vibraciones, rayos x, control de corrosión
 433-434
 preventivo condicional, ventajas 430
 preventivo sistemático 430

preventivo, función principal del 430
 preventivo, versión inspección y condición
 de desgaste o condición de estado 430
 preventivo, versión tiempo o frecuencia de
 430
 principal función del 3
 principios básicos 36
 proactivo 455-456
 proactivo, objetivo principal 455-456
 productivo total 439-440
 productivo total y mantenimiento centrado
 en la confiabilidad, ventaja de combinación
 443
 productivo total, entrenamiento, educación,
 capacitación y crecimiento 442
 productivo total, mantenimiento autónomo
 304-305,440-443
 productivo total, mantenimiento de calidad
 441
 productivo total, mantenimiento planificado
 441
 productivo total, mantenimiento temprano /
 prevención del mantenimiento 441
 productivo total, mejoras enfocadas, *Kobetsu*
Kaizen 441
 productivo total, pasos, metas 441-443
 productivo total, pilares básicos e ideas sobre
 su relación con el mantenimiento centrado
 en la confiabilidad 450-451
 productivo total, pilares, puntos de apoyo
 441-442
 productivo total, seguridad, higiene y medio
 ambiente 442
 programa TPM: autónomo 440-442
 punto óptimo de gestión de 285
 reactivo 459-460
 reparaciones 104-105
 revisión y estudio permanentes de variables
 internas o externas asociadas al proceso de
 operación de una 433-434
 sistema kantiano de 45-47
 sistema mental 45
software de 277-278
 táctica(s): TPM enfocada a mejorar la
 productividad, MCC, TPM y MCC
 combinados, PMO, Proactivo, Reactivo,
WCM, mantenimiento centrado en el riesgo,
 centrado en objetivos o en resultados, *RCM*
ScoreCard, PMO, mantenimiento centrado en
 habilidades y competencias 15
 temprano / prevención del mantenimiento,
 mantenimiento de las áreas administrativas 441

- términos de medidas básicas del nivel instrumental de 289-290
- tres etapas de 5,32,49,50
- unidad de 48-49
- vigente, historia de hechos relevantes que inciden en el 4-5
- y producción, enfoques recientes de 13
- y producción, factores productivos modernos para 287-289
- y producción, labores modernas de / factores productivos de Ricardo 287-289
- Margrave Lawrence 9
- Mat Lab, Statgraphics, DYANE 2*, software convencional(es) como 400
- máxima verosimilitud, método de 68,72-75,94,120,141,183,190-198
- Mean Time Active Maintenance* 82-83,86
- Mean Time Between Maintenance* 82,86
- Mean Time Maintenance* 82
- Mean Time To Repair* 82
- medición CMD 65,68-69,71,77,114,169,201,222,272
- medidas de posición, moda, mediana, media aritmética 315
- mejoramiento continuo 57,244,301,303,401,415,441-442,458,461
- método(s), paso(s), modelo(s), prueba(s):
 - de alineación 41,69,72,75,100,138,140,153,160,180,183,188,219-220,222-223,232
 - de diagnóstico jerárquico analítico de componentes principales: *Eigen Vector* 325,395,397, 400-402-403
 - de máxima verosimilitud 69,72-75,94,120,141,183,190-192,194-198
 - de mínimos cuadrados 127,141-142,158,161
 - de rango de medianas, método Benard de aproximación 126
 - de regresión lineal con mínimos cuadrados 157-158,160
 - de *Vital Signs-Performance* (signos vitales del *quantum performance* 17,307-308,478
 - de Weibull 63,66,68-69,72-75,94,98-100,102,108-112,114-115,117-119,131,136,140-155,163-170,172-176,178-184,186,188,190,192,194,196-199,204-205,214,216,218,222,226,228,230,264,296-297,315,439
 - gráfico 141-142,149,153,157
 - gráfico de papel de Weibull o Allen-Plait 142
- metodología(s):
 - análisis de mínimos cuadrados, ecuación 158
 - de análisis de fallas 330-337
 - de análisis de fallas, presencia o detección repentina de una situación fuera del estándar 332
 - de Box-Jenkins 254
 - de diagnóstico rápido y confiable en mantenimiento 394
 - de estimación más convenientes 135
 - de Weibull 73-74
 - futurísticos actuales, integralidad de 259
 - futurísticos, según el tiempo por evaluar, clases de 250
 - Kobetsu-Kaizen*, fundamentos de los 303-304
 - métodos de predicción 253
 - proyectivos de series temporales 251
 - proyectivos numéricos 252
- MLE 68-69,74-75,94,120,136,140-141,180,190-191-199,218,220,232
- forma, naturaleza, geometría asintótica imparcial 195
- modelaciones markovianas simples y complejas 80
- modelo(s):
 - clásicos de mantenimiento: ajuste por tendencia, suavización: Brown, Holt, Winter, X Census 11, de descomposición: Winter, X11, modernos: metodología Box-Jenkins y A.R.I.M.A 64,249
 - de predicción 140
 - de pronósticos 253-254
 - normativos 252-253
 - tradicionales de distribuciones como Weibull, Gamma, LogNormal 63,66
 - universal para predecir o pronosticar CMD, ventajas 71-74
- MTTR, valores del 275
- Navarro 14,33-34,37,280,288,469
- Navarro, Pastor, Mugaburu, enunciados sobre gestión de mantenimiento de 37,469
- Newbrough 3,33
- nivel(es):
 - de medidas: índices / rendimientos / indicadores 289-290
 - de servicio 365-366
 - estratégico, costos e índices 465-466
 - estratégico, táctico y operacional 423
 - instrumental 269-270,273
 - instrumental, fundamentos 271
 - instrumental, instrumentos avanzados genéricos de mantenimiento 293-295
 - operativo 425-434
 - táctico 437-438
 - y categorías de mantenimiento 57-58
- número(s):

- de orden 132
- aleatorios, tamaños muestrales de población para medias 321
- OACI / IATA 10
- OIT, documento CIUO 4
- Oiltech Análisis, organización 452
- Olds, fabricante 8
- ONU 24
 - operación(es)
 - condiciones de 80,83,86,97,303
 - correctivas 107
- Organización de las Naciones Unidas (*ver* ONU)
 - países en vías de desarrollo, rubro de mantenimiento 34
 - Países Nórdicos, elementos comunes en los 35,447
- parámetro(s):
 - Beta 142
 - Beta y Eta de la distribución 163-164
 - de la distribución normal 170
 - de posición gamma 142
 - de vida útil y de reparaciones en Normal 170
 - de Weibull 98
 - Eta y Beta en el papel de Weibull 148
 - MTTR de Weibull 142-143,165
- Pareto, análisis y diagramas de 311
- parque industrial, definición 51
- PC, los 24
- Pearson 400
- pedido óptimo con reposición no inmediata 382
- pellets* 406
- Penaud, los 9
- pérdida de funcionalidad del sistema o elemento, causa raíz de 332
- período, mantenimiento 96-97
- personas, recursos productivos y máquinas, relaciones entre 57
- Pintelon y otro, planteamiento sobre terotecnología 22-23
- PM, los cinco pasos del 303
- Poisson, procesos homogéneo y no homogéneo de 63
- PQCDSM, modelo 296
- probabilidad(es) 96
 - CM 96
 - de fallas 171
 - gráfica de 153
 - valores de la 141
- procedimiento FMECA - RPN 343-344
- proceso inverso, aspectos relevantes en el factor humano 279
- producción:
 - calidad, costos, demoras, seguridad y motivación (*ver* PQCDSM)
 - función macroeconómica de la 280-281
 - función primaria 295
 - o servicio, estructuras de sistemas de 209
 - unidad de 47
- productividad en servicios, definición 282
- programas para A.R.I.M.A. y clásicos como *Centurion Statgraphics XV*, *Forecast Pro*, *Vanguard Decision Making*, *Logarex*, *Forecast Expert trial*, *Minitab*, etc., que permiten cálculos muy exactos de pronósticos, con errores de un dígito en promedio 261
- pronosticadores y equipo de expertos, parámetros que se adquieren por los 253-254
- pronóstico(s):
 - metodología universal de 259
 - numéricos / parámetros que se adquieren por parte del(los) pronosticador(es) 253
- previsión(es):
 - de recursos humanos 253
 - de ventas 253
 - demográfica(s) 253
 - diferentes 253
 - tecnológica(s) 252
- promedios numéricos aritméticos simples, evaluación mediante 263
- prospectiva(s) 252,433:
 - porvenir múltiple e incierto en la 252
- proyectiva condicionada 252
- prueba(s):
 - Centroide o de Laplace, ACF o de autocorrelación 65
 - de Anderson-Darling y Chi cuadrado 69,73,75,114,119,180,199,201,217,226,228
 - de Anderson-Darling, ventaja y desventaja de la 203
 - de bondad de ajuste 204,206
 - de Kolmogórov-Smirnov 69,73,75,119,180,201,203,217,226,228-229
 - de regresión y estimación de parámetros de Weibull 165
 - de tendencia, función de distribución acumulada empírica 204
- Pull, los 276,371,373,375,379,386
 - artículos 371,386
 - reposición del inventario en los elementos 380
 - y Push 276,371
- Quantum Performance* 17,32,272,307,415
- rango de medianas, tabla, método de 121
- RCFA 17,32,34,244,327,329,337-343,350,415
 - Aplicación RCM fundamentada en normas SAE JA 1011 y 1012, programa de la Web 448

- Estimación de Parámetros para Distribución Gamma y Método de Máxima Verosimilitud
- MLE, programa de la Web 447
- método, ventajas 338
- metodología 340
- metodología táctica 240-241
- pasos que se desarrollan en la
- RCM (*ver* mantenimiento centrado en la confiabilidad):
 - severidad y ocurrencia en 359
 - y FMECA, diferencia entre 330
- Ready Time* 20,68,72-73,89-92,113,245,276,362
- recomendaciones estratégicas y táctica para el ejercicio integral de A 243-244
- recurso(s) básico(s) especializado(s), genérico(s) y avanzado(s):
 - humanos, grupos de 275
 - humanos, talento 278-279
 - I - Informática o Sistemas de Información 289
 - K: capital 287
 - N - recursos humanos o talento humano 287,391
 - P - Planeación 288
 - PN - Poder de Negociación 288
 - RN - Recursos Naturales 288
 - T - Tecnología 288
 - V - Espacio Físico 288
- regresión lineal 157-158,161,315,317-319
- Reiter, concepto sobre gestión de mantenimiento de 37
- relación(es):
 - mantenimiento-máquina-producción 50
 - mantenimiento-producción 296
- Renacimiento, el: máquinas de gran difusión y avance en Europa Occidental, / decadencia cultural de la Edad Media, / grandes desarrollos en la tecnología con: Galileo Galilei, Miguel Ángel, Leonardo de Vinci, Francisco di Giorgio, Agostino Ramelli, Georgius Agricola, Jacobus Strada, Guidobaldo del Monte, Isaac Newton, / avances en la astronomía, la geografía mundial, la medicina, la pólvora, las armas bélicas, las embarcaciones, el descubrimiento de América, contribución a los desarrollos actuales de máquinas, mecanismos y equipos / Juanelo, Pedro Juan de Lastanosa, Jerónimo de Ayans y Beaumont, Francisco Lobato 6-7
- reparaciones correctivas 432,469
- repuestos e insumos de mantenimiento
 - 13,294,361,371,395
- resistencia eléctrica 406,411
- Revolución Industrial, la: motores y máquinas de vapor / Scheider, hermanos: martillo de vapor, del *Greuzot* / hornos Siemens / máquina de vapor / automóvil y motores de combustión interna. / Joseph Cugnot: tractor metálico autopulsado, con el que diversos constructores e inventores avanzan en la fabricación de automóviles / motor de combustión interna: Christiaan Huygens: motor de combustión en 1678, invento consolidado en 1876, con August Otto, con propulsión de gas. Hacia 1887 Karl Benz y Gottlieb Daimler introducen automóviles de gasolina / la Peugeot es el primer fabricante masivo de automóviles en serie en 1891. Hacia 1900 otros fabricantes como Benz en Europa y Olds en Estados Unidos consolidan la fabricación masiva de automóviles / Henry Ford, fabrica en masa vehículos / Rudolph Diesel aporta su motor 6-8
- Ricardo David 3,280-281,286-287
- riesgo(s):
 - función de 238
 - valoración cualitativa del 359
- Rodgers Calbraith P.: primer vuelo transcontinental 10
- Sacristán Rey 5, 49,440,461
- Santos D. A. 9
- Spútnik*, satélite ruso / lanzamiento del *Explorer 1* / primer hombre en la Luna 12
- serie(s) temporal(es) 63,77,249-254,256-257,259-261,266-267,307,369,371-372,377,390,434
- de datos 256
- pronósticos con 249
- utilidad de los modelos proyectivos de 252
- servicios o productos, cantidad promedio y productividad de 282-283
- severidad, ocurrencia, probabilidad, parámetros del FMECA 328
- signos vitales, metodología de 307-308
- sistema(s):
 - confiabilidad del 215
 - de información integral de gestión y operación de mantenimiento de producción 277
 - de los artículos Pull, recomendaciones para repuestos 386
 - de producción, unidad(es) 46-47
 - en serie 217-218
 - en serie o equipos en serie y paralelo, estimación(es) 217-218
 - integrado de ingeniería de fábricas: mantenimiento-máquinas-producción 51
 - integral de mantenimiento / relación hombre-máquina 51
 - kantiano 45-46
 - o equipo, factores clave o de contexto operacional en los cuales opera el 347-348

- por evaluar, fronteras del 344
- principal, unidades que lo componen 345
- teoría de 46
- situación real 84
- SKF, pasos en la táctica preactiva 454
- sombreros, identificación de los roles en equipos
 - cazafallas, mediante 336-337
- Standby*, componentes en 184
- subcontratación, criterios de 390-391
- Suecia 34
- tablas de los valores de criterios de severidad, de
 - ocurrencia y detección, cuadro 354-356
- táctica(s) 272-273:
 - de clase mundial, principios estratégicos 462-463
 - decisiones conjuntas o múltiples sobre 458-459
 - mantenimiento, implicaciones de las diferentes
 - clases de, selección 38-439
 - otras 464
 - PMO, *Planned Maintenance Optimisation*, 456
 - proactiva / reactiva / TPM, RCM 335
 - propia 464
- tarea(s):
 - correctivas o proactivas 61,106
 - de mantenimiento correctivo, actividades 427
 - planeadas o proactivas de largo plazo, antes de
 - las fallas, versiones de 428
 - técnicas preventivas y eventualmente
 - correctivas y modificativas 108
- tasa(s) de fallas 64-66,80,106-107-109,114,143-144-
 - 145,148,155,171-173,178-180-181,183,185-186,193-
 - 194,196,212,216,237-240,242,261,263-265,296-
 - 298,438-439,473
- Tatin Victor 9
- técnicas de control, comparación de tres
 - instrumentos avanzados específicos técnicos de
 - 413-420,463
- temperaturas, vigilancia de, aparatos térmicos 406
- tercerar o subcontratar, grado de indiferenciación 393
- tercerización, proceso decisional de 394
- termografía infrarroja 407
- terotecnología 16-17,22-23,34,53,58,296,447,471-473:
 - ciencias en que se apoya 16
 - LCC y CMD 471-472
- terminación o degeneración de la propiedad de un
 - elemento, clases de fallas 59
- tiempo(s):
 - acción del 37,57,108
 - de reparaciones 19,81,170,176
 - disponibles 91
 - entre reparaciones y mantenimiento 19,231,233
 - medio de reparaciones 165,171
 - medio entre fallas 19,164,170,176,174-
 - 175,180,187
- promedio entre fallas 115
- real 17,233,271,276-277,307,310,333,362,373,393,4
 - 09,429,433-434,457-458
- tipo(s) de fricción 240,406,414
- de tareas no planeadas de orden correctivo 426
- Total Quality Control* o Control de Calidad Total 298-299
- Total Quality Management* o Manufactura de Calidad
 - Total, también denominado Manejo de la Calidad
 - Total (*ver* TQM) 298-299
- TPM y RCM:
 - mantenimiento combinado 450-451
 - tácticas 358
- transformaciones en Weibull, LogNormal, y
 - Normal para obtener mínimos cuadrados
 - 163-194
- turbina, medición para las 259-260
- turbulencia o transición:
 - estudios de 250,252,353,358
 - porvenir múltiple e incierto en la 253
- unidad de producción 47
- ultrasonido 406
- valor(es):
 - críticos, prueba de Anderson-Darling 203
 - críticos modificados en Anderson-Darling 205
 - puntuales 231,323
- variable(s):
 - aleatoria 96-97,175-176,184-185,316
 - de factores productivos 398
- vibración(es):
 - análisis de 408
 - fases de 409
 - sistema de monitoreo y chequeo permanente
 - con 408
- vida, longitud de, del mantenimiento 96
- Vital Signs / Performance / signos vitales del

 - Quantum Performance 17,307*
- Voisin, hermanos 9
- Weibull, 63,66,68-69,72-75,94,98-100,102,108-
 - 112,114-115,117,119,131,136,140-155,163-170,172-
 - 173,175-176,178-184,186,188,190,192,194,196-
 - 199,204-205,214,216,218,222,226,228-229,264,296-
 - 297,315,439
 - distribución de 98,108,143-144,148,163,165,167-
 - 169,173,175,184,196-197,264
 - papel de 142-143,145,148-149,151-155
- Winters, modelos de 256
- Wireman:
 - definición de mantenimiento de 35
 - estudio complementario del Eureka 33
- Wright Orville, cumple los requisitos de vuelo 9
- Wright, hermanos 9

