

# Extensión de la vida útil para unos sistemas de guiado de bombas GBU-49 de la Fuerza Aérea Colombiana

| Fecha de recibido: 29 de agosto de 2024 | Fecha de aprobado: 19 de septiembre de 2024 |

| Reception date: August 29, 2024 | Approval date: September 19, 2024 |

| Data de recebimento: 29 de agosto de 2024 | Data de aprovação: 19 de setembro de 2024 |

## Mauricio López Gómez

<https://orcid.org/0000-0001-7403-1887>  
mauricio.lopezg@fac.mil.co

Ph. D. en Gestión de la Innovación Tecnológica  
Jefe Área Fomento Aeronáutico - Fuerza Aérea  
Colombiana, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de Investigación en Estudios  
Aeroespaciales – GIEA

Ph. D. in Technological Innovation Management  
Head of Aeronautical Development Area - Colombian  
Air Force, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing  
Aerospace Studies Research Group - GIEA

Doutor em Gestão da Inovação Tecnológica  
Chefe da Área de Desenvolvimento Aeronáutico - Força  
Aérea Colombiana, Colômbia  
Papel do investigador: teórico e escrito  
Grupo de Investigação em Estudos Aeroespaciais - GIEA

## Manuel Ricardo Arias Paredes

<https://orcid.org/0009-0009-4431-3133>  
manuel.arias@fac.mil.co

Mag. en Ciencias Militares Aeronáuticas  
Especialista Certificación Aeronavegabilidad y Fomento  
Aeronáutico - Fuerza Aérea Colombiana, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de Investigación en Estudios  
Aeroespaciales – GIEA

Master in Aeronautical Military Sciences  
Aeronautical Promotion and Airworthiness Certification  
Specialist - Colombian Air Force, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing  
Aerospace Studies Research Group - GIEA

Mestrado em Ciências Militares Aeronáuticas  
Especialista em Promoção Aeronáutica  
e Certificação de Aeronavegabilidade - Força Aérea  
Colombiana, Colômbia  
Papel do investigador: teórico e escrito  
Grupo de Investigação em Estudos Aeroespaciais - GIEA

## José Alfonso Jiménez Garzón

<https://orcid.org/0000-0001-8827-0790>  
jose.jimenezg@fac.mil.co

Mag. en Innovación  
Especialista Coordinación Núcleo Ingeniería  
Concurrente - Fuerza Aérea Colombiana, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de Investigación en Estudios  
Aeroespaciales – GIEA

Master in Innovation  
Concurrent Engineering Core Coordination  
Specialist - Colombian Air Force, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing  
Aerospace Studies Research Group - GIEA

Mestrado em Inovação  
Especialista em Coordenação do Núcleo de Engenharia  
Simultânea - Força Aérea Colombiana, Colômbia  
Papel do investigador: teórico e escritor  
Grupo de Investigação em Estudos Aeroespaciais - GIEA

**Cómo citar este artículo:** López Gómez, M., Arias Paredes, M. R. y Jiménez Garzón, J. A. (2025). Extensión de la vida útil para unos sistemas de guiado de bombas GBU-49 de la Fuerza Aérea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 78-88. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.835>

## Extensión de la vida útil para unos sistemas de guiado de bombas GBU-49 de la Fuerza Aérea Colombiana

## Extension of service life for GBU-49 bomb guidance systems of the Colombian Air Force

## Extensão da vida útil para os sistemas de guiagem de bombas GBU-49 da Força Aérea Colombiana

**Resumen:** En los almacenes de la Fuerza Aérea Colombiana, se almacenan repuestos aeronáuticos y armamento aéreo adquiridos durante momentos críticos del conflicto armado, los cuales están próximos a alcanzar su vida útil. Dadas las políticas de los fabricantes, que incluyen factores de seguridad en el diseño y la determinación de la vida útil, es prioritario estudiar la posible ampliación del tiempo de servicio de este material, siempre y cuando se mantengan los requisitos de seguridad y calidad establecidos por el fabricante.

Este artículo analiza diversas metodologías para evaluar y extender la vida útil de sistemas y materiales militares, centrándose en los documentos AECTP-600, MIL-HDBK-1763, JOTP-001, y otros estudios relevantes. El AECTP-600 de la OTAN) presenta un método de diez pasos que incluye análisis de diseño, gestión de riesgos y pruebas, y optimización de desempeño. El MIL-HDBK-1763 del Departamento de Defensa de Estados Unidos se centra en la compatibilidad y el mantenimiento de cargas útiles en aeronaves, mientras que el JOTP-001 proporciona pautas para evaluar la seguridad y eficacia de municiones no nucleares. Además, se revisan estudios como el de Mark Ashcroft sobre la gestión de la vida útil de municiones, y el análisis de Štefan Pivko y Štefan Timár sobre el impacto de las condiciones de almacenamiento.

La Fuerza Aérea Colombiana aplicó estos principios para extender la vida útil del sistema de guiado GBU-49, documentando el proceso en el Plan de Certificación de Producto Aeronáutico, validado por la Oficina de Certificación Aeronáutica de la Defensa, mediante el cual se realizaron pruebas exhaustivas y análisis estadísticos para proyectar la degradación de los componentes críticos, resultando en una extensión de vida útil de cinco años. Este enfoque garantizó la seguridad y funcionalidad del sistema, demostrando la importancia de una evaluación rigurosa y la gestión de riesgos en la extensión de la vida útil de materiales militares.

**Palabras clave:** extensión, vida útil, seguridad, AECTP-600, SECAD.

**Abstract:** In the warehouses of the Colombian Air Force, aeronautical spare parts and aerial weaponry acquired during critical moments of the armed conflict are stored, and they are approaching the end of their service life. Given the manufacturers' policies, which include safety factors in the design and determination of service life, it is a priority to study the possible extension of the service time of this material, provided that the safety and quality requirements established by the manufacturer are maintained.

This article analyzes various methodologies to evaluate and extend the service life of military systems and materials, focusing on documents such as AECTP-600, MIL-HDBK-1763, JOTP-001, and other relevant studies. NATO's AECTP-600 presents a ten-step method that includes design analysis, risk management, testing, and performance optimization. The U.S. Department of Defense's MIL-HDBK-1763 focuses on the compatibility and maintenance of payloads on aircraft, while JOTP-001 provides guidelines for assessing the safety and effectiveness of non-nuclear munitions. Additionally, studies such as Mark Ashcroft's work on ammunition life cycle management and the analysis by Štefan Pivko and Štefan Timár on the impact of storage conditions are reviewed.

The Colombian Air Force applied these principles to extend the service life of the GBU-49 guidance system, documenting the process in the Aeronautical Product Certification Plan, validated by the Defense Aeronautical Certification Office. Through this plan, exhaustive tests and statistical analyses were conducted to project the degradation of critical components, resulting in a five-year service life extension. This approach ensured the safety and functionality of the system, demonstrating the importance of rigorous evaluation and risk management in the extension of military material service life.

**Keywords:** Extension, shelf-life, safety, AECTP-600, SECAD.

**Resumo:** Nos armazéns da Força Aérea Colombiana, são armazenadas peças de reposição aeronáuticas e armamentos aéreos adquiridos durante momentos críticos do conflito armado, que estão prestes a atingir o fim de sua vida útil. Dadas as políticas dos fabricantes, que incluem fatores de segurança no projeto e na determinação da vida útil, é prioritário estudar a possível ampliação do tempo de serviço desse material, desde que sejam mantidos os requisitos de segurança e qualidade estabelecidos pelo fabricante.

Este artigo analisa várias metodologias para avaliar e estender a vida útil de sistemas e materiais militares, concentrando-se nos documentos AECTP-600, MIL-HDBK-1763, JOTP-001 e outros estudos relevantes. O AECTP-600 da OTAN apresenta um método de dez passos que inclui análise de projeto, gestão de riscos, testes e otimização de desempenho. O MIL-HDBK-1763 do Departamento de Defesa dos Estados Unidos foca na compatibilidade e manutenção de cargas úteis em aeronaves, enquanto o JOTP-001 fornece diretrizes para avaliar a segurança e eficácia de munições não nucleares. Além disso, são revisados estudos como o de Mark Ashcroft sobre a gestão do ciclo de vida de munições, e a análise de Štefan Pivko e Štefan Timár sobre o impacto das condições de armazenamento.

A Força Aérea Colombiana aplicou esses princípios para estender a vida útil do sistema de guiagem GBU-49, documentando o processo no Plano de Certificação de Produto Aeronáutico, validado pelo Escritório de Certificação Aeronáutica de Defesa, por meio do qual foram realizados testes exaustivos e análises estatísticas para projetar a degradação dos componentes críticos, resultando em uma extensão de vida útil de cinco anos. Essa abordagem garantiu a segurança e funcionalidade do sistema, demonstrando a importância de uma avaliação rigorosa e da gestão de riscos na extensão da vida útil de materiais militares.

**Palavras-chave:** Extensão, vida de estoque, segurança, AECTP-600, SECAD.

## Introducción

El estudio de la extensión de la vida útil de los sistemas de defensa es crucial para optimizar los recursos y garantizar la seguridad y efectividad de los materiales utilizados. Con el objetivo de analizar los posibles riesgos y explorar la viabilidad de extender la vida útil de estos sistemas, se investigaron diversas metodologías y ejemplos aplicables que respaldan esta investigación.

Uno de los documentos fundamentales en este análisis es el AECTP-600 de la Organización de Tratados del Atlántico Norte (OTAN), el cual proporciona un marco estructurado para evaluar la capacidad del material para cumplir con los requisitos de extensión de vida útil. Este documento incluye principios de ingeniería esenciales para revisar el diseño, gestionar riesgos, realizar pruebas exhaustivas, optimizar el desempeño, incorporar innovaciones tecnológicas y mantener una documentación detallada del proceso.

Además, se consideraron otras guías y estándares importantes como el MIL-HDBK-1763 del Departamento de Defensa de Estados Unidos, que aborda los requisitos de ingeniería de sistemas de compatibilidad de cargas útiles y procedimientos de prueba. También, se tuvo en cuenta el JOTP-001, que proporciona pautas para evaluar la seguridad y la idoneidad de municiones no nucleares.

El análisis se complementa con estudios adicionales, como el marco de gestión de vida útil de municiones propuesto por Mark Ashcroft y el impacto de las condiciones de almacenamiento en la viabilidad de las municiones descrito por Štefan Pivko y Štefan Timár. Estas revisiones ofrecen una visión integral de los factores que afectan la vida útil de los sistemas de defensa y las metodologías para su evaluación.

En el contexto de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), se estudió específicamente el sistema de guiado GBU-49, utilizado en las bombas MK-82, que había cumplido su tiempo de vida establecido. La necesidad de extender la vida útil de estos sistemas llevó a desarrollar un plan de certificación basado en la experiencia del personal técnico y el conocimiento de los

ingenieros, siguiendo la guía de la Oficina de Certificación Aeronáutica de la Defensa.

El presente artículo detalla el proceso de planificación, ejecución y documentación de las pruebas realizadas para evaluar la capacidad del sistema GBU-49 para cumplir con los requisitos de vida extendida. Este enfoque permitió identificar los componentes críticos, realizar análisis con herramientas estadísticas y emitir un reporte de validación que sustenta técnicamente la extensión de vida útil del sistema.

## Marco teórico

Para analizar los posibles riesgos y estudiar la posibilidad de extender la vida útil, además de comprender los componentes del sistema, se estudiaron varias metodologías y ejemplos de aplicación que permitieron dar sustento a la investigación.

### AECTP-600

La Agencia de Seguridad Nacional de la OTAN desclasificó el documento AECTP-600 (segunda edición), el cual describió un método para evaluar la capacidad del material estudiado para cumplir con los requisitos de extensión de vida útil. En esa medida, el documento aplicó varios principios de ingeniería que permiten evaluar las implicaciones de esta extensión, a saber:

1. Análisis de diseño: Revisar detalladamente la concepción del material y así identificar posibles puntos débiles y áreas de mejora.
2. Gestión de riesgos: Identificar posibles escenarios de fallo y tomar medidas preventivas.
3. Pruebas y evaluaciones: Aplicar ensayos exhaustivos para garantizar que el material cumpla con los requisitos durante todo el tiempo de extensión.
4. Optimización de desempeño: Buscar maneras de mejorar el desempeño del material para cumplir con los nuevos requisitos y desafíos de la operación.

5. Innovación tecnológica: Considerar nuevas tecnologías y enfoques para mejorar el almacenamiento, la vida útil y la funcionalidad del material.
6. Documentación y seguimiento: Mantener registros detallados de todo el proceso de evaluación y cambios realizados al material.

En efecto, se podría argüir que esta metodología es una herramienta de gestión que aborda sistemáticamente los problemas por resolver, pues proporciona un marco estructurado que permite evaluar y garantizar que el material cumpla con los requisitos de vida extendida y los cambios en su rol y despliegue. Estas son las posibles modificaciones en la función o el uso previsto de dicho material, así como en los escenarios o entornos en los que se desplegará, las cuales fácilmente se aplican a todos los productos militares. Asimismo, podrían adaptarse a otros productos o sistemas en diferentes contextos mediante la ingeniería inversa.

A continuación, se exponen los diez pasos propuestos en el documento:

1. Investigación del Perfil Medioambiental del Ciclo de Vida.
2. Recopilación de datos sobre la historia en servicio del material.
3. Preparación de un Perfil Medioambiental del Ciclo de Vida extendido para cubrir los requisitos de vida extendida y/o cambio de rol.
4. Comparación de las descripciones ambientales planificadas originalmente con las encontradas en servicio y las necesarias para cumplir con los requisitos de vida extendida.
5. Evaluación de la capacidad del material para soportar las tensiones ambientales esperadas durante la vida extendida requerida.
6. Identificación de los modos de fallo potenciales relevantes para el material.
7. Evaluación de la capacidad del material para cumplir con los requisitos de vida extendida en función de los modos de fallo identificados.
8. Desarrollo de un plan de pruebas y análisis para verificar la capacidad del material de cumplir con los requisitos de vida extendida.

9. Ejecución de las pruebas y los análisis planificados.
10. Evaluación de los resultados de las pruebas y los análisis para determinar si el material cumple con los requisitos de vida extendida y si es aceptable para continuar su uso.

Adicional a esta metodología, el documento incluyó cuatro anexos. En ese orden de ideas, el Anexo A expuso un ejemplo específico de cómo aplicar el método de diez pasos para abordar el complejo proceso de reducir el número de posibles modos de falla a un mínimo necesario, con el fin de cumplir con los criterios de extensión de vida. Para esto, se eligió un arma guiada transportada por aire como ejemplo para ilustrar el proceso de aumento en el número de horas de transporte de vuelo. En tal caso, la “integridad estructural” es el aspecto principal a considerar en esta demostración, junto a las categorías de seguridad y rendimiento.

Por su parte, el Anexo D proporciona la orientación adicional para el profesional de ingeniería al abordar los problemas técnicos detallados del método de diez pasos. Este anexo incorporó una serie de folletos (*leaflets*) que ofrecen directrices específicas sobre diversos aspectos relacionados con la evaluación de la capacidad de los materiales militares para cumplir con los requisitos de vida extendida:

1. *Leaflet 601 - Reverse Engineering*: Suministra directrices sobre el proceso de ingeniería inversa, que implica desmontar y analizar un producto existente para comprender su funcionamiento y diseño.
2. *Leaflet 602 - Time Compression*: Ofrece pautas para acelerar el proceso de desarrollo de productos o sistemas, al reducir los plazos de tiempo para cumplir con los requisitos de entrega.
3. *Leaflet 603 - Incremental Acquisition*: Describe estrategias para adquirir capacidades de manera incremental, lo cual permite la entrega de funcionalidades en etapas sucesivas.
4. *Leaflet 604 - Physics of Failure*: Se centra en comprender los mecanismos físicos que pueden llevar a la falla de un sistema, lo cual ayuda a mejorar el diseño y la fiabilidad.

5. *Leaflet 605 - Information Requirements for Life Cycle Environmental Profile (Steps 1 to 3)*: Detalla los requisitos de información necesarios para llevar a cabo los pasos 1 a 3 del método de diez pasos.
6. *Leaflet 606 - Probabilistic Analysis*: Suministra las directrices para realizar análisis probabilísticos, al considerar las variaciones estadísticas en los efectos de las condiciones ambientales y las tolerancias de diseño y fabricación.
7. *Leaflet 607 - Material Role and Deployment Changes*: Ofrece medidas previas para adaptar el método señalado a los cambios en el rol o escenarios de despliegue del material; de esta manera, se evitan posibles fallas predecibles.

### MIL-HDBK-1763

Otro documento guía es el MIL-HDBK-1763, del Departamento de Defensa de Estados Unidos, que trata sobre los requisitos de ingeniería de sistemas de compatibilidad de cargas útiles y procedimientos de prueba. Este texto incluyó información sobre pruebas de certificación, preparación de pruebas, procedimientos de prueba en tierra y en vuelo, así como paquetes de datos de ingeniería de compatibilidad con la aeronave. Estos conjuntos de datos primarios los utiliza la Fuerza Aérea de Estados Unidos para garantizar que las cargas útiles sean compatibles física, mecánica, electromagnética, ambiental, estructural y aerodinámicamente con los sistemas de las aeronaves.

Por otro lado, para extender la vida útil de las aeronaves y sus sistemas, y mantener su capacidad operativa a lo largo del tiempo, el documento considera varios puntos importantes en los siguientes temas:

1. **Mantenimiento adecuado**: Realizar un mantenimiento regular de la aeronave y sus sistemas es fundamental para garantizar su buen funcionamiento.
2. **Actualizaciones y mejoras**: Mantener la aeronave al día con los nuevos avances tecnológicos y los requisitos operativos cambiantes.
3. **Monitoreo de la fatiga estructural**: Realizar un seguimiento y llevar a cabo inspecciones periódicas

para detectar posibles problemas antes de que se conviertan en fallas.

4. **Gestión de la obsolescencia**: Planear y monitorear las partes con el objetivo de garantizar que se puedan obtener repuestos y soporte a lo largo de la vida útil del equipo.
5. **Cumplimiento de los requisitos ambientales**: Asegurarse de que el sistema cumple con los requisitos de temperaturas extremas, humedad, presión atmosférica y compatibilidad electromagnética para evitar daños por condiciones ambientales adversas.
6. **Evaluación de la compatibilidad con las cargas útiles**: Realizar evaluaciones periódicas del funcionamiento eficiente y la correcta integración entre la aeronave y sus cargas útiles.

### JOTP-001

Durante el estudio, se encontró aplicación a través del documento *Allied ammunition safety and suitability for service assessment testing*, debido a que proporcionó pautas y procedimientos que permiten evaluar la seguridad y la idoneidad para el servicio de municiones no nucleares. En ese sentido, el documento estableció los estándares y requisitos para realizar pruebas de evaluación de seguridad en una variedad de municiones, incluidas aquellas lanzadas desde el hombro, lanzadas desde la superficie, lanzadas desde el aire, lanzadas bajo y sobre el agua, de gran calibre, de pequeño calibre, de las fuerzas terrestres, municiones no almacenadas en aeronaves, auxiliares transportadas por barcos y auxiliares de las fuerzas terrestres, entre otras.

De acuerdo con lo expuesto, se determinó que estas pruebas y evaluaciones son fundamentales para garantizar que las municiones utilizadas por las fuerzas armadas sean seguras, confiables y efectivas en el campo de batalla. En tal medida, el documento suministró los procedimientos detallados que deben seguir los evaluadores para llevar a cabo estas pruebas de manera rigurosa y precisa, con el objetivo de garantizar la seguridad y la eficacia de las municiones en diversas situaciones operativas.

En cuanto a las pruebas realizadas a las municiones lanzadas desde el aire, se incluyeron varias evaluaciones para garantizar su seguridad e idoneidad para el servicio, las cuales se describen a continuación:

1. Pruebas de resistencia ambiental: Evalúan cómo las municiones responden a diferentes condiciones ambientales como temperatura, humedad, vibración y presión. De esta manera, se garantiza que puedan funcionar de modo confiable en diversos entornos.
2. Pruebas de vulnerabilidad a interferencias electromagnéticas (Electromagnetic Environmental Effects - E3): Valoran la capacidad de las municiones para resistir y funcionar correctamente en presencia de campos electromagnéticos, como los generados por sistemas de radar u otras fuentes de energía.
3. Pruebas de vulnerabilidad a impactos mecánicos: Evalúan la resistencia de las municiones a impactos mecánicos, como golpes o caídas, para certificar que no se activen accidentalmente durante el almacenamiento, manejo o transporte.
4. Pruebas de rendimiento: Evalúan la capacidad de las municiones para cumplir con sus funciones previstas, como la precisión, la velocidad y la efectividad en el impacto.

### “A traditional approach to munition life management” (Ashcroft, 2022)

Ashcroft describió un marco de cinco fases para administrar la vida útil de las municiones. Al respecto, el autor comenzó con la fase 1, que analiza los aspectos de diseño y los factores ambientales que afectan el ciclo de vida de una munición. Después, la fase 2 profundiza en los mecanismos que causan el deterioro de las municiones con el tiempo. Acto seguido, la fase 3 explora métodos para evaluar el estado de una munición. Por último, las fases 4 y 5 cubren las pruebas y evaluaciones de vida útil, las cuales ponen en práctica estos métodos para determinar la vida útil restante de una munición. Al seguir este enfoque estructurado,

se puede garantizar la seguridad y confiabilidad de las municiones a lo largo de su ciclo de vida.

### “Effect of storage conditions on the viability of ammunition” (Pivko y Timár, 2014)

Este artículo explicó cómo, a lo largo de su ciclo de vida, la munición se ve afectada por las condiciones climáticas y por el entorno creado por su uso operacional. En consecuencia, su seguridad y funcionalidad pueden verse limitadas por un nivel inaceptable de degradación de componentes y materiales, lo cual posteriormente deriva en una falla crítica. Como resultado, esta falla se convierte en un factor limitante de su vida útil. Por lo tanto, la identificación de estos procesos permite realizar predicciones y evaluaciones apropiadas acerca del periodo de vida útil de la munición.

A su vez, las municiones están compuestas por una amplia variedad de materiales, incluyendo principalmente materiales energéticos (propelentes, explosivos), metales, plásticos, cauchos, pegamentos y materiales compuestos. Asimismo, el empaque es crucial, debido a que debe brindar protección contra el manejo brusco, las condiciones ambientales y la influencia de factores mecánicos y climáticos durante todo su ciclo de vida, incluida la etapa de almacenamiento inicial. Infortunadamente, los materiales utilizados en la fabricación de municiones suelen deteriorarse de diversas formas. Al respecto, se encuentra que este deterioro puede ser inmediato, progresivo, reversible o irreversible. Finalmente, las fallas de las municiones se pueden clasificar en tres categorías principales: térmicas (químicas), mecánicas y termomecánicas.

- Fallas térmicas (químicas): Se producen por cambios químicos en las sustancias que componen la munición, como la descomposición de propelentes, la degradación por la radiación solar de materiales orgánicos sintéticos y naturales (como caucho y plásticos), y el cambio en la velocidad de las reacciones químicas por la temperatura y humedad del aire. Sobre esto, la ecuación de Arrhenius se utiliza para calcular el factor de

aceleración de la reacción y predecir la vida útil de la munición en función de la temperatura. Ahora bien, es importante señalar que la temperatura de almacenamiento no tiene un efecto significativo en las fallas químicas, excepto en la cristalización de sustancias amorfas como el caucho.

- Fallas mecánicas: Se producen por esfuerzos físicos que superan la resistencia de los materiales de la munición. Una de estas es la fatiga del material, por lo que aparecen grietas debido a las cargas cíclicas repetidas; otra es la rotura por sobrecarga, que sucede cuando la carga aplicada excede la resistencia del material. Aunado a esto, la fricción entre componentes también puede provocar fallas mecánicas al generar calor e incluso la ignición del material. Finalmente, se determinó que el método de Miner permite predecir la vida útil en condiciones de carga variable.
- Fallas termomecánicas: Se producen por la combinación de esfuerzos térmicos y mecánicos en los materiales. En ese sentido, la diferencia en la expansión térmica de materiales con distintas propiedades puede generar tensiones que causen grietas en la carga explosiva o defectos en los sellados. Para minimizar las fallas termomecánicas, se recomienda utilizar materiales con coeficientes de expansión térmica similares y alta conductividad térmica. Por consiguiente, probar la munición a temperaturas extremas puede acelerar la identificación de fallas, pero no siempre refleja las condiciones reales de uso.

## Resultados

Para el desarrollo iniciado en la FAC, se tomó como base los componentes del sistema de guiado GBU-49, los cuales funcionan mediante una designación definida por la compañía fabricante Raytheon como DMGB (Dual Mode Guided Bomb), que detecta un objetivo a través del método de designación con láser. A esto se añade la orientación emitida por unas coordenadas

dirigidas por GPS/IMU como método secundario, la cual puede ser en conjunto (LASER + GPS/IMU) o de restricción a un solo método, de acuerdo con lo predeterminado por el operador en la planeación del vuelo.

Si las condiciones adversas impiden la detección del láser, el sistema GPS/IMU se convierte en el sistema de guía principal. Actualmente, la FAC cuenta con varias unidades de este sistema aplicable a las bombas MK-82, que cumplieron su tiempo de vida establecido en diez años, por lo cual su personal idóneo solicitó al fabricante una extensión, quien emitió una cotización por un valor muy cercano al costo de adquisición de una unidad nueva. Esto obligó al personal de la Subdirección de Armamento Aéreo a buscar alternativas mediante el uso de la experiencia del personal técnico y el conocimiento de los ingenieros, hasta que bajo la dirección de la Oficina de Certificación Aeronáutica de la Defensa se establecieron varios documentos que permitieron cumplir el objetivo con seguridad y calidad.



Figura 1. Kit de guiado GBU-49 para bomba MK-82

## Plan de certificación de producto aeronáutico

En el documento Plan de Certificación de Producto Aeronáutico, se plasmó toda la trazabilidad de las gestiones adelantadas, la justificación de la necesidad y el listado de requisitos de diseño que se debían validar a través de ensayos de diferentes tipos. De igual modo, se generó una Matriz de Requisitos de Certificación, que consiste en el listado de especificaciones técnicas que cumplir, junto con el documento o la normativa que lo propone, así como el Medio Aceptable de Cumplimiento, el cual permitirá validar su aceptación. Asimismo, durante todo el proceso se fue construyendo el

Análisis de Seguridad del Sistema; esto es, un plan de gestión del riesgo basado en la MIL-STD-882E Standard Practice System Safety, en el que se define un enfoque de ingeniería de sistemas para la identificación, clasificación y mitigación de riesgos en los sistemas de defensa a lo largo de su ciclo de vida.

En este artículo, se quiso ahondar en el proceso descrito en el Plan de Certificación de Producto Aeronáutico, en el que se estudió la posible extensión de los guiados GBU-49 al abordar aspectos como la planificación, ejecución y documentación de las pruebas. A lo largo del documento, se detallaron diferentes etapas y procedimientos sustentados en los pasos del AECTP-600, con el fin de evaluar la capacidad del elemento para cumplir con requisitos específicos.

En primer lugar, el documento estableció el objetivo de las pruebas de extensión de los guiados GBU-49, lo cual se relaciona con el primer paso del AECTP-600: la definición de los requisitos de vida extendida y los cambios en su rol y despliegue. En este caso, se buscó evaluar la capacidad de los sistemas de bombas guiadas para mantener un *stock* estratégico y un alistamiento óptimo, lo cual implica considerar aspectos de soporte técnico y operativo a lo largo de la vida útil del equipo.

En ese sentido, el proceso de planificación de las pruebas, la identificación de los elementos por evaluar, el establecimiento de criterios de evaluación y la recopilación de datos dan cumplimiento a los pasos 2, 3 y 4 del AECTP-600, debido a que describen la documentación necesaria para llevar a cabo los ensayos de manera efectiva.

Por otro lado, la realización de las pruebas en diferentes condiciones, tanto en tierra como en vuelo, así como la medición de parámetros específicos de los equipos relacionados con los pasos 5 y 6 del AECTP-600, implican el análisis de los datos recopilados y la identificación de deficiencias en el equipo. Al respecto, en el Plan de Certificación de Producto Aeronáutico se detallan los resultados de los ensayos, las conclusiones obtenidas y las limitaciones necesarias para garantizar el cumplimiento de los requisitos establecidos.

De igual manera, el Plan de Certificación de Producto Aeronáutico también se refiere a la instrumentación y a los equipos necesarios para realizar las pruebas, así como a las autorizaciones requeridas para realizarlas, lo cual se vincula con los pasos 7, 8 y 9 del AECTP-600 que suponen el desarrollo de planes de acción correctiva, implementar dichas acciones y verificar su efectividad.

	<b>PLAN DE ENSAYOS PRUEBAS EXTENSION GUIADOS GBU-40</b>	Código: V-107.EXT
		Versión: Rev. 01
		Fecha de edición: 15/02/2024

	Cracks in detector housing	Major	Reject. Mark condition code F. Repackage and send to depot for over
	Loose, damaged, or missing parts (nuts, bolts, screws, clamps)	Major	Ensure CPU-123 and detector are properly mated and torqued.
Control	Expended thermal battery or gas generator	Major	Reject. Mark condition code F, repackage, and send to depot.
Test Connector Cover	Missing or loose	Major	If loose, torque screws to 6 +3 in-lbs. If missing, replace.
Pneumatic Plug	Missing or loose	Major	If loose, torque plug to 30-35 in-lbs. If missing, replace. <b>NOTE</b> AFGs that are removed from container for any length of time (example, for buildup storage) will have DOM marked (with felt marker or grease pencil) on individual assemblies. This marking will be applied below original markings and used for future shipping, repack, and inspection requirements

Figura 2. Extracto del listado de subcomponentes, modos de falla y punto de control  
Fuente: elaboración propia.



Figura 3. Ejemplo de las pruebas de campo realizadas

Fuente: elaboración propia.

## Recolección de los datos

Se podría decir que el éxito del Plan de Certificación de Producto Aeronáutico se basa en que es un documento dinámico que va ajustando sus análisis según los riesgos identificados en el Análisis de Seguridad del Sistema y los mitiga con nuevos requisitos en las pruebas de validación. En esto radica la importancia de conocer en detalle cada uno de los componentes del material. De tal manera, es posible identificar las partes de mayor criticidad y que pueden causar fallas en el funcionamiento del sistema. En este caso en particular, los modos de falla identificados se mitigan con la inspección, el mantenimiento de las piezas móviles y las verificaciones periódicas a través del equipo de soporte en tierra, aunado con el adecuado almacenamiento y preservación de todos sus componentes.

Para ser más concretos, en la evaluación realizada por el personal involucrado en el proceso se determinó que los componentes críticos identificados en el sistema GBU-49 consistieron en la batería laser, la batería GAINS (GPS Aided Inertial Navigation System) y la botella de nitrógeno. Para el caso particular de cada elemento, fue necesario diseñar una serie de pruebas para determinar que, después de superar el tiempo de almacenamiento, estos conservan las propiedades necesarias para continuar funcionando de forma segura y sin arriesgar el comportamiento del sistema.

En el caso de las baterías la prueba, se establecieron unos criterios de aceptación y rechazo para los voltajes generados, en concordancia con lo establecido en sus datos maestros y con el valor que tenían

entre uno, cinco y diez minutos después de su activación. Esta prueba se efectuó sobre los elementos de los lotes que recién habían cumplido los diez años de almacenamiento inicial; igualmente, se repitió en elementos de los lotes que tenían 21 y 28 meses de almacenamiento posteriores al vencimiento. A partir de lo anterior, se proyectó el decaimiento de estas baterías usando la ecuación de regresión lineal.

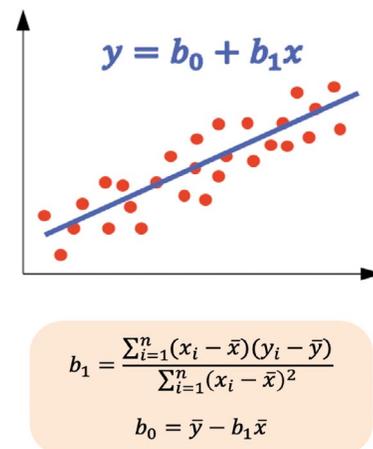


Figura 4. Regresión lineal simple para proyección de datos

Fuente: elaboración propia.

## Análisis con herramientas estadísticas

En las gráficas, se identificó que todas las variables de presión y voltaje tenían un comportamiento estable con un amplio margen de seguridad, con excepción del pin de -17 Vdc, cuyo valor se acercaba al criterio de rechazo de -17,5 Vdc, como se ve en la Figura 5.

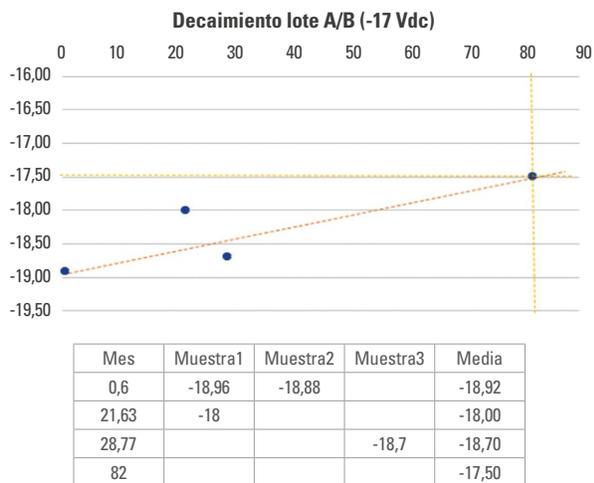


Figura 5. Datos recogidos de las muestras en el pin -17 Vdc  
Fuente: elaboración propia.

Después de tabular los meses de almacenamiento vs. el valor medio de voltaje, se obtuvieron los puntos de la gráfica. En la última fila, se colocó la fórmula de MS Excel (1), en la cual se relacionan los valores de los ejes X y Y conocidos; finalmente, se puso el valor X que se desea proyectar en Y.

$$\text{PRONÓSTICO LINEAL (valor X proyectado; Valores Y conocidos; valores X conocidos)} \quad (1)$$

En este caso, el límite de -17,50 se alcanza en el mes número 82. Es decir, para los datos recolectados, se podría otorgar una extensión al tiempo de vida de 82 meses posteriores a los diez años de almacenamiento inicial, esto es, alrededor de siete años. Sin embargo, con el fin de dejar un margen de seguridad suficiente, se terminaron otorgando cinco años, al tiempo que se siguen haciendo mediciones sobre algunos elementos para alimentar los puntos de la gráfica de decaimiento.

## Conclusiones

Este proceso documentado y soportado en varias metodologías permitió a la Oficina de Certificación Aero-náutica de la Defensa emitir un Reporte de Validación de Ensayos GA-JELOG-FR-281, en el cual se relacionaron

todas las evidencias agrupadas en MAC 4 - Ensayos de Laboratorio, MAC 5 - Ensayos en Tierra, MAC 6 - Inspección Física del Diseño y MAC 9 - Ensayos en Vuelo, que para este caso constituyeron el soporte técnico de dicha investigación.

Por otra parte, el análisis de riesgos apoyado en la experiencia del personal técnico del Escuadrón de Armamento Aéreo del CACOM-1, con el acompañamiento de la Subdirección de Armamento, permitió analizar las posibles situaciones que se pudieran presentar. De igual modo, se mitigaron los riesgos mediante acciones preventivas a todos los componentes con el control y la supervisión de los estándares descritos en las diferentes documentaciones técnicas de la casa fabricante y las tareas frecuentes plasmadas en el Plan de Certificación de Producto Aeronáutico.

Simultáneamente, los resultados obtenidos en los ensayos practicados a las muestras proporcionaron un adecuado sustento al comportamiento observado en la realidad. Aunado a esto, se determinó que mediante un análisis estadístico es posible predecir una respuesta favorable dentro del tiempo de extensión propuesto, cuando sus evidencias y soportes así lo permiten.

Finalmente, el Grupo Técnico de la Unidad solicitante realizó una junta técnica extraordinaria con base en la reglamentación vigente de la institución y amparados en los manuales de funcionamiento técnico y a la luz de la evidencia documentada. En suma, se otorgó la extensión de vida útil al respetar las condiciones y limitaciones del informe. De tal modo, se retornará el material al servicio y se ganará más tiempo para realizar las gestiones de adquisición y reemplazo necesarias.

## Reconocimientos

Es importante reconocer la labor de todas las personas que, desde el año 2022, vienen trabajando en este proyecto; desde los diferentes investigadores que por alguna razón se asignaron a otras destinaciones y no alcanzaron a ver materializado su esfuerzo, hasta el personal técnico, cuya iniciativa y pericia orientó la labor de los comandantes. Gracias por su trabajo.

## Referencias

- Ashcroft, M. (2022). A traditional approach to munition life management. *Energetics science and technology: An integrated approach* (A. S. Cumming, ed.; pp. 9-22). IOP Publishing.
- Department of Defense. (1998). *MIL-HDBK-1763, Department of Defense Handbook. Aircraft/stores compatibility: Systems engineering data requirements and test procedures. EverySpec Standards* [en línea]. [http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-1500-1799/MIL\\_HDBK\\_1763\\_1775/](http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-1500-1799/MIL_HDBK_1763_1775/)
- Pivko, Š. y Timár, Š. (2014). Effect of Storage Conditions on the Viability of Ammunition, *University Review*, 8(3-4), 29-33. [https://ur.tnuni.sk/fileadmin/dokumenty/UR\\_V8\\_ISS3-4\\_29to33.pdf](https://ur.tnuni.sk/fileadmin/dokumenty/UR_V8_ISS3-4_29to33.pdf)