

**DISEÑO DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN DE DOS ETAPAS DE UN
COHETE PARA COLOCAR SATÉLITES A BAJA ORBITA**

**HÉCTOR FABIO CÁRDENAS CÓRDOBA
FRANCISCO ANTONIO MONCAYO MONCAYO**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2008**

**DISEÑO DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN DE DOS ETAPAS DE UN
COHETE PARA COLOCAR SATÉLITES A BAJA ORBITA**

**HÉCTOR FABIO CÁRDENAS CÓRDOBA
FRANCISCO ANTONIO MONCAYO MONCAYO**

**Pasantía para optar al título de
Ingeniero Mecatrónico**

**Director
DRAGO DUSSICH
Ingeniero mecatrónico**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2008**

Nota de aceptación:

**Aprobado por el Comité de Grado
en cumplimiento de los requisitos
exigidos por la Universidad
Autónoma de Occidente para optar
al título de Ingeniero Mecatrónico**

**Ing. BERNARDO R. SABOGAL A.
Jurado**

Santiago de Cali, 24 de Enero de 2008

	CONTENIDO	Pág.
GLOSARIO		13
RESUMEN		14
INTRODUCCION		15
1. MARCO TEÓRICO		17
2. PLANTEAMIENTO DE LA MISIÓN		22
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO		22
2.2 MERCADO PRIMARIO		22
2.3 MERCADO SECUNDARIO		22
2.4 PREMISAS Y RESTRICCIONES		22
3. OBJETIVOS		23
3.1 OBJETIVO GENERAL		23
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS		23
4. IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES DEL CLIENTE		24
4.1 OBTENCIÓN DE DATOS PRIMARIOS		24
4.2 INTERPRETACIÓN DE DATOS PRIMARIOS		24
4.3 JERARQUÍA E IMPORTANCIA RELATIVA DE NECESIDADES		25
5. ESPECIFICACIONES PRELIMINARES		26
5.1 NECESIDADES DEL CLIENTE		26
5.2 MÉTRICAS Y UNIDADES		26
5.3 RELACIÓN: MÉTRICAS CON NECESIDADES		28
6. GENERACIÓN DE CONCEPTOS		29

6.1 CLARIFICAR EL PROBLEMA	29
6.1.1 Caja negra	29
6.1.2 Subfunciones	29
6.1.3 Subfunciones críticas de diseño	30
6.2 BÚSQUEDA INTERNA	30
6.3 EXPLORACIÓN SISTEMATIZADA	30
6.3.1 Conceptos generados por subfunciones	30
6.3.2 Árbol de clasificación de conceptos	31
6.3.3 Conceptos generados	32
6.3.4 Representación gráfica de conceptos	33
7. SELECCIÓN DE CONCEPTOS	37
7.1 CRITERIOS ABSOLUTOS	37
7.1.1 Criterio de viabilidad	37
7.1.2 Disponibilidad de tecnología	37
7.1.3 Examen PASA/NO PASA	37
7.2 CRITERIOS RELATIVOS	38
7.2.1 Matriz de tamizaje de conceptos	38
7.2.2 Matriz evaluación conceptos	40
8. ESPECIFICACIONES FINALES	41
9. DESARROLLO DE LA ARQUITECTURA DE PRODUCTO	42
9.1 INTERACCIONES FUNDAMENTALES	42
9.1.1 Elementos físicos y funcionales	42
9.1.2 Elementos funcionales e interacciones fundamentales	44

9.1.3 Agrupación elementos funcionales	44
9.2 INTERACCIONES INCIDENTALES	46
9.3 LAYOUT O DISTRIBUCIÓN GEOMÉTRICA	46
9.4 SELECCIÓN DE LA AQUITECTURA	47
9.4.1 Definición de niveles	47
9.4.2 Definición arquitectura predominante por niveles	48
9.5 ARQUITECTURA SISTEMA ELECTRÓNICO	49
9.5.1 Requisitos y especificaciones	49
9.5.2 Diseño arquitectural	49
10. DISEÑO INDUSTRIAL	51
10.1 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL DISEÑO INDUSTRIAL	51
10.1.1 Evaluación de las necesidades ergonómicas	51
10.1.2 Evaluación de las necesidades estéticas	52
10.1.3 Evaluación de la calidad	53
10.2 PREDOMINIO DEL DISEÑO INDUSTRIAL DEL PRODUCTO	54
11. DISEÑO PARA MANUFACTURA	55
11.1 PROCESO MANUFACTURA EN COMPONENTES PROPIOS	56
11.2 COSTOS DE COMPONENTES ESTÁNDAR	58
12. PROTOTIPADO	59
12.1 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR	59
12.2 INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR	63
12.3 REDISEÑOS EJECUTADOS	65
13. DISEÑO DETALLADO	69

13.1 CÁLCULOS FÍSICOS Y MECÁNICOS	69
13.1.1 Datos generales	69
13.1.2 Masa sistema separación	69
13.1.3 Fuerzas externas sobre sistema de separación	72
13.1.4 Esfuerzo cara superior del sistema de separación	73
13.1.5 Esfuerzo cortante sobre un pin	73
13.1.6 Fuerzas sobre pasador antes de la separación	75
13.1.7 Presión neta sistema neumático	75
13.1.8 Resistencia viento	76
13.1.9 Rozamiento sin lubricante	77
13.1.10 Rozamiento con lubricante	77
13.1.11 Esfuerzo cortante sobre un pasador	78
13.1.12 Volumen de trabajo del sistema de separación	80
13.2 PRUEBAS DE LABORATORIO	80
13.2.1 Prueba de corte simple	81
13.2.2 Prueba de corte doble	85
13.3 SELECCIÓN DE MATERIALES	88
14. CONCLUSIONES	90
BIBLIOGRAFIA	91
ANEXOS	92

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Interpretación de datos primarios	24
Tabla 2. Jerarquía e importancia relativa de necesidades	25
Tabla 3. Necesidades del cliente	26
Tabla 4. Métricas y unidades	27
Tabla 5. Relación: métricas con necesidades	28
Tabla 6. Conceptos generados	32
Tabla 7. Matriz tamizaje conceptos	39
Tabla 8. Matriz evaluación conceptos	40
Tabla 9. Especificaciones finales	41
Tabla 10. Requisitos y especificaciones sistema electrónico	49
Tabla 11. Proceso de manufactura de componentes propios	57
Tabla 12. Costos componentes estándar	58
Tabla 13. Probeta para corte doble	87
Tabla 14. Propiedades del aluminio	88
Tabla 15. Propiedades del acero	89
Tabla 16. Especificaciones técnicas depósito de aire	93
Tabla 17. Especificaciones técnicas distribuidor	95
Tabla 18. Especificaciones técnicas manguera	97
Tabla 19. Especificaciones técnicas electroválvula	98

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso diseño mecatrónico	15
Figura 2. Proceso desarrollo conceptual	16
Figura 3. Caja negra	29
Figura 4. Subfunciones	29
Figura 5. Árbol 'almacenar energía'	31
Figura 6. Árbol 'liberar energía y separar'	32
Figura 7. Vista isométrico en corte	33
Figura 8. Separación	33
Figura 9. Vista isométrico en corte	34
Figura 10. Separación	34
Figura 11. Vista superior	35
Figura 12. Vista isométrico	35
Figura 13. Vista superior	36
Figura 14. Ruptura pasador	36
Figura 15. Diagrama elementos físicos y funcionales	43
Figura 16. Elementos funcionales e interacciones fundamentales	44
Figura 17. Agrupación elementos funcionales en componentes	45
Figura 18. Interacciones incidentales	46
Figura 19. Layout - vista en corte	47
Figura 20. Niveles	48
Figura 21. Electroválvula 24V	50

Figura 22. Valoración ergonomía	51
Figura 23. Valoración estética	52
Figura 24. Valoración calidad	54
Figura 25. Predominio diseño industrial	54
Figura 26. Costos de manufactura	56
Figura 27. Primer prototipo en 3D de concepto pirotécnico	59
Figura 28. Prototipo de concepto motor-gancho	60
Figura 29. Boceto de concepto con energía neumática	60
Figura 30. Modelo de concepto seleccionado	60
Figura 31. Componentes	61
Figura 32. Vista en corte isométrico	61
Figura 33. Vista perfil subsistema crítico	62
Figura 34. Separación del sistema	62
Figura 35. Sistema mallado	63
Figura 36. Factor de seguridad	64
Figura 37. Desplazamiento	64
Figura 38. Sistema antes del rediseño	65
Figura 39. Sistema rediseñado	66
Figura 40. Cohete antes de separación	66
Figura 41. Instante luego de separación	66
Figura 42. Tobera libre	66
Figura 43. Pasador vertical	67
Figura 44. Pasador horizontal	67

Figura 45. Pin	68
Figura 46. Perfil abrazadera	69
Figura 47. Fuerzas sobre sistema de separación	72
Figura 48. Torque etapa inferior	73
Figura 49. Fuerzas sobre pasador	78
Figura 50. Fuerzas sobre abrazadera	78
Figura 51. Máquina de presión	80
Figura 52. Dispositivo de corte simple	82
Figura 53. Dispositivo de corte - vista lateral	82
Figura 54. Dispositivo de corte montado	83
Figura 55. Ruptura del pin	83
Figura 56. Manómetro	84
Figura 57. Dispositivo de corte doble	86
Figura 58. Probeta en dispositivo de corte	86
Figura 59. Probeta cortada	87
Figura 60. Deposito de aire	92
Figura 61. Dimensiones depósito de aire	92
Figura 62. Distribuidor	94
Figura 63. Dimensiones distribuidor	94
Figura 64. Manguera	96
Figura 65. Especificaciones técnicas manguera	96
Figura 66. Electroválvula	98

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Documentación neumática	92
Anexo 2. Planos mecánicos	99

GLOSARIO

ERGONOMÍA: estudio del cuerpo humano con respecto al medio artificial que lo rodea.

ESTRATÓSFERA: región de la atmósfera, entre la troposfera y la mesosfera que va aproximadamente desde los 10 a los 50 km.

LATENCIA: tiempo o lapso en que se tarda en responder el sistema.

MÉTRICAS: término que describe muchos y muy variados casos de medición.

RESILIENCIA: cantidad de energía por unidad de volumen que puede absorber un material, antes de que comience la deformación irreversible.

RESUMEN

En un principio, los cohetes tenían un solo motor con el que ascendían hasta consumir todo su combustible, sin embargo, una forma mejor de alcanzar gran velocidad, es colocar un cohete pequeño en la parte superior de uno mayor, y encenderlo después de que se ha apagado el primero. Debido a que cuando los tanques quedan vacíos, el peso que generan es un peso inútil, al dejar caer esta(s) etapa(s), se elimina mucho peso, que en un sistema aerodinámico es un factor muy relevante. Por esta razón, en la actualidad la mayoría de los cohetes espaciales usan varias etapas, que dejan caer las etapas apagadas y continúan con impulsores más pequeños y ligeros.

Para deshacerse de las etapas apagadas los cohetes utilizan sistemas de separación. Un sistema de separación entre dos etapas, es uno de los componentes más críticos de un cohete, ya que este sistema tiene que cumplir con dos requisitos muy diferentes, primero cuando las dos fases están aún conectadas, tiene que ser capaz de mantenerlas juntas aún en grandes aceleraciones y segundo tiene que ser capaz de separar las dos fases.

Existen varios tipos de dispositivos de separación que funcionan con diferentes principios; por ejemplo los más usados en los cohetes de aficionados suelen ser sistemas eléctricos, pero en cohetes más grandes y pesados se utiliza pólvora como fuente de energía para realizar la separación, ya que las fuerzas a las que se ven sometidos son mayores y es necesario una mayor cantidad de energía.

El sistema de separación que se ha diseñado en este proyecto, utiliza energía neumática para lograr la separación, que a diferencia de la pólvora, su fuente, el gas comprimido es más seguro, más versátil, de fácil acceso y puede acumular mayor energía que un sistema eléctrico con un menor peso.

INTRODUCCIÓN

El Centro de Investigación de Tecnología Aeronáutica (CITA), de la Fuerza Aérea Colombiana tiene como prioridad la construcción de un cohete tipo lanzadera de satélites de baja órbita, con el fin de colocar en una órbita polar un pico satélite, que tendrá la función de emitir una señal de prueba hacia la tierra y con esto estimular a los estudiantes de ingeniería e investigadores en nuestro país a seguir ahondando en este campo.

El campo aeroespacial es una de las áreas de mayor demanda de innovaciones científicas y tecnológicas. En Colombia no se ha llegado a experimentar con cohetes, por tal motivo este proyecto se ha convertido en un reto para las personas que estamos involucradas en él.

El objetivo principal de este trabajo es diseñar el sistema de separación de dos etapas de un cohete haciendo uso de diversos campos de la ingeniería, principalmente de la mecánica y la electrónica, enfatizando en las áreas de la aerodinámica y la resistencia de materiales, todo esto guiado a través del complejo proceso de diseño mecatrónico.

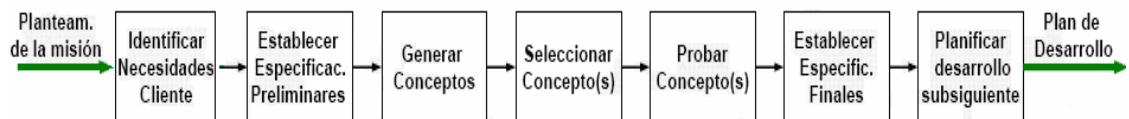
Figura 1. Proceso diseño mecatrónico



A lo largo del proceso de diseño mecatrónico se desarrollaron las siguientes etapas:

Etapa 1: Desarrollo conceptual. En la primera etapa de diseño se identifican las necesidades del cliente para posteriormente establecer las especificaciones que describen el dispositivo y a su vez llevan la voz del cliente a lo largo del proceso de diseño. De igual forma se recolecta toda la información necesaria para cumplir con dichas necesidades y requerimientos, y a partir de esta se generan distintos conceptos, para luego seleccionar el mejor y desarrollarlo.

Figura 2. Proceso desarrollo conceptual



Etapa 2: Arquitectura del producto. En esta segunda etapa se define el tipo de arquitectura del sistema de separación, a partir del tipo de interacciones tanto fundamentales como incidentales de los elementos físicos que conforman el sistema.

Etapa 3: Diseño Industrial. En esta etapa se evalúan en el sistema de separación tres aspectos de gran importancia dentro del diseño, como lo son la ergonomía, la estética y la calidad del diseño.

Etapa 4: Diseño para manufactura. En esta etapa de diseño se estudian los posibles procesos de manufactura de los componentes del sistema, además de realizar un balance de costos que de cierta forma determina la viabilidad del sistema.

Etapa 5: Diseño detallado y prototipado. El diseño detallado del sistema de separación refleja todos los cálculos que prueban el correcto funcionamiento de cada una de las partes del dispositivo. Por su parte, el prototipado a partir del diseño asistido por computador, permite no sólo visualizar la geometría sino el funcionamiento del mismo.

1. MARCO TEORICO

Los requerimientos sociales, tecnológicos y científicos guían la carrera espacial con objetivos que van desde seguridad y vigilancia hasta objetivos de índole económico haciendo uso de los satélites de comunicación, los cuales suplen la mayor parte de estas necesidades, mediante el desempeño de diversas funciones. El desafío de esta tecnología es ubicar dichos sistemas fuera de nuestro planeta, para lo cual se utilizan transportes tales como los transbordadores espaciales y los cohetes, siendo el funcionamiento de estos últimos el más sencillo, ya que a diferencia de los primeros los cohetes tienen como objetivo sacar de la atmósfera terrestre la carga útil sin tener muy en cuenta el regreso del cohete, de tal forma que el diseño estos estén encaminado a la salida de la tierra y no a su regreso.

Aunque aparentemente el lanzamiento y vuelo de un cohete en principio es sencillo, las fuerzas asociadas son diversas. En principio el cohete permanece en reposo, mientras no haya una fuerza externa que actúe sobre él; la masa del cohete es una medida de resistencia a los cambios en su movimiento o reposo debido a una(s) fuerza(s), por tanto, para que el cohete pueda despegar es necesario aplicarle una fuerza mayor a la generada por su masa (peso), que está dada por:

$$\text{Peso} = m \cdot g$$

La mayoría de los cohetes utilizan un motor para vencer dicha fuerza. El principio de funcionamiento de este motor se basa en la tercera ley de Newton, la ley de la "acción y reacción", la cual dice que "a toda acción le corresponde una reacción, con la misma intensidad, misma dirección y sentido contrario".

La propulsión sostenida a reacción, en general, y la del cohete, en particular se consiguen mediante la eyección a alta velocidad de una cierta cantidad de masa por unidad de tiempo en una determinada dirección y sentido. Por ejemplo: imaginar una cámara cerrada donde exista un gas en combustión donde la quema del gas producirá presión en todas las direcciones; la cámara no se moverá en ninguna dirección pues las fuerzas en las paredes opuestas de la cámara se anularán. Si se hace una abertura en la cámara, donde los gases puedan escapar, habrá un desequilibrio. La presión ejercida en las paredes laterales opuestas continuará sin producir fuerza, pues la presión de un lado anulará a la del otro, pero la presión ejercida en la parte superior de la cámara ya producirá empuje, pues no hay presión en el lado de abajo donde está la abertura.

De esta forma el cohete se desplazará hacia arriba por reacción a la presión ejercida por los gases en combustión en la cámara de combustión del motor. Por esto, este tipo de motor es llamado de propulsión a reacción. Así pues y como ejemplo de propulsión a reacción, el motor cohete se define como un motor a reacción autónomo, es decir, no necesita de la atmósfera puesto que el comburente y la fuente de masa son internos; también debe ser capaz de desplazarse sin la ayuda de un punto de soporte exterior; siendo este el único modo viable conocido para poder viajar por el espacio interplanetario. Debido a la autonomía de este tipo de propulsión se les llaman motores de autopropulsión.

La masa que debe ser eyectada para conseguir la propulsión a reacción está almacenada en forma de cantidad de movimiento (del vehículo) la cual deberá ser transformada en energía cinética (gases eyectados).

Además y para la transformación anterior, el sistema precisa de una fuente de energía. Si la fuente de energía es externa se necesita un captador como pueden ser los paneles solares; si la fuente es interna se habla de fuente de energía, como el caso de un combustible.

La magnitud del empuje producido (expresión que designa la fuerza producida por el motor del cohete) depende de la masa y de la velocidad de los gases expelidos por la abertura. Luego, cuanto mayor sea la temperatura de los gases expelidos, mayor será el empuje. Así, surge el problema de proteger la cámara de combustión y la abertura de las altas temperaturas producidas por la combustión. Una manera ingeniosa de hacer esto, es cubrir las paredes del motor con un fino chorro del propio propelente, usado por el cohete para formar un aislante térmico y refrigerar el motor.

Para mejorar el desempeño del cohete en el vuelo, la mayoría de los cohetes actuales emplean más de una etapa, esto significa que en el transcurso del vuelo del cohete se utiliza(n) y luego se desecha(n) alguna(s) etapa(s), ya que uno de los problemas más importantes para que el cohete cumpla con su objetivo es su propio peso; al desechar la etapa del cohete que ya cumplió con su misión, es decir, contener el combustible que lo llevó hasta esa fase, se quita peso inútil del cohete; tómese en cuenta que cada etapa está constituida de tanques de almacenamiento de combustible, que se va quemando y luego de utilizarlo todo, la etapa se desprende por medio de un dispositivo de separación.

En el caso del sistema desarrollado en esta investigación, las dos etapas están unidas por tres soportes o abrazaderas que se mantienen unidas al cohete por medio de un pasador. El sistema se activa gracias a una señal electrónica que

acciona una electroválvula, que al abrirse permite el paso del gas contenido en un tanque de gas presurizado, que a su vez es conducido a los pistones que hacen parte de los soportes, y los empuja hasta lograr romper el pasador, de esta forma los soportes son expulsados, permitiendo que las etapas se separen por efecto de la gravedad.

Las fuerzas implicadas en este proceso son múltiples, en un inicio, hasta el instante anterior a la separación el sistema debe soportar el empuje causado por el motor, esta magnitud esta dada por la segunda ley de Newton:

$$F = m_1 * a_1$$

Donde m_1 es la masa de la primera etapa y a_1 es la aceleración del cohete.

A esta fuerza se opone el peso de la etapa superior, que lógicamente es inferior que la causada por el empuje del motor para lograr que haya una elevación.

Como se explicó, el sistema de sujeción de los soportes del cohete, funciona con un pasador que impide el movimiento de estos antes del instante de la separación; en el peor de los casos, si el cohete se encontrara en posición horizontal, el pasador debería soportar la mayor fuerza posible, que en ese momento estaría dada por la magnitud de la componente vertical del peso de una abrazadera. El esfuerzo que el pasador debería soportar se presenta en forma de corte doble, ya que este tiene restringido su movimiento en sus dos extremos y la fuerza del peso se concentra en la parte central del mismo. El esfuerzo esta dado por:

$$\text{Esfuerzo} = f / a$$

Donde f es la fuerza, en este caso el peso del soporte y a es el área de corte, o área transversal de pasador. El resultado de este cálculo debe ser menor al del esfuerzo último a cortante del material seleccionado para el pasador.

Para evitar esfuerzos no deseados en las partes más importantes del sistema como por ejemplo los pasadores y las abrazaderas, se utilizan 3 pines que ayudan a centrar las dos etapas, estos hacen parte de la etapa inferior y penetran la etapa superior, de esta manera los pinos absorben muchos esfuerzos que podrían causar fallas en el sistema. El esfuerzo al que se encuentran sometidos estos pinos se debe a que el cohete gira sobre su mismo

eje, este efecto busca mejorar la dirección de vuelo, pero a su vez causa un esfuerzo cortante simple sobre los pines, ya que la etapa inferior gira mientras la etapa superior se opone a este movimiento. El esfuerzo que soportan los pines esta dado por:

- Esfuerzo = Torsión / área cortante
- Torsión = I / aceleración angular
- Donde I es el momento de inercia de un cilindro hueco:

$$I = m^*(R^2 + r^2) / 2$$

El resultado del esfuerzo sobre el área cortante del pin debe ser menor que el esfuerzo último a cortante, para que soporte satisfactoriamente las cargas a las que es sometido.

En el momento en que se envía la señal de separación la electroválvula que permanece normalmente cerrada se abre y da paso al aire que se encuentra a una alta presión hacia las mangueras para luego llevarlo hasta los pistones. Inicialmente las mangueras se encuentran llenas de aire a una presión de una atmósfera, además cuando el tanque descargue su contenido habrá una caída de presión dentro del tanque, que se reflejará a la salida de las mangueras, esta caída no debe ser suficiente para impedir que la presión rompa los pasadores, donde la caída de presión es directamente proporcional al volumen de las mangueras.

Una de las fuerzas que se opone a la separación es el rozamiento entre el pistón y el orificio por donde se desplaza, esta fuerza depende del coeficiente de rozamiento entre las superficies y la fuerza normal entre ellas. De igual forma, existe otra fuerza que se opone a la separación, la resistencia aerodinámica a la salida del soporte, y esta dada por:

$$\text{Resistencia} = C_x * 1/2 d * v^2 * a$$

Donde C_x es el coeficiente de penetración aerodinámica, d es la densidad del aire donde se mueve el objeto, y a es el área de choque de este. La suma de estas dos fuerzas y del esfuerzo último del material de los pasadores deben ser menores que la fuerza generada por la presión del gas sobre los pistones para que se pueda realizar la separación.

La etapa inferior se desprende, y aunque inicialmente tiene una velocidad igual a la etapa superior, se queda atrás por que su aerodinámica es deficiente en

comparación a la de la punta del cohete y el roce con el viento es mayor, disminuyendo de esta forma su velocidad hasta que la etapa desechada cae.

La aerodinámica de un cohete es muy importante ya que mientras el cohete se desplaza por la atmósfera, viaja en medio del aire, el cual genera una fuerza de resistencia al movimiento ascendente del cohete, razón por la que la forma del cohete es de gran importancia en su confección, desde la nariz hasta el fuselaje.

Cuando un cohete entra en movimiento debido a que el empuje es mayor que su peso, se originan dos fuerzas aerodinámicas, el roce y el levantamiento, las cuales son generadas por las aletas, la nariz o punta y el tubo del cuerpo del cohete. Tanto el roce como el levantamiento se aplican sobre el centro de presión del cohete. La fuerza de levantamiento es una fuerza perpendicular a la dirección de vuelo, que en los aviones es opuesta al peso, sin embargo en los cohetes no ocurre así, es el empuje la fuerza opuesta al peso, por lo cual dicha fuerza de levantamiento es utilizada para controlar la dirección y estabilidad del vuelo del cohete.

En la fabricación de cohetes se utilizan diversas formas de nariz tales como: cónicas, ojivales, parabólicas, elípticas. Lo más indicado en la fabricación de los cohetes es utilizar una nariz de tipo ojival y un mayor calibre en la punta de este en comparación con su parte inferior, ambas observaciones con el fin de disminuir la resistencia del aire contra el cohete.

2. PLANTEAMIENTO DE LA MISIÓN

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Sistema de separación de dos etapas de un cohete para colocar satélites a baja órbita.

2.2 MERCADO PRIMARIO

- Entidades aeronáuticas

2.3 MERCADO SECUNDARIO

- Centros de investigación tecnológica
- Universidades

2.4 PREMISAS Y RESTRICCIONES

- Campo de acción: estratosfera (10 - 50 km)

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de separación de dos etapas de un cohete.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Diseñar un sistema de separación haciendo uso de mecánica y/o electrónica, junto con su sistema de control.

Diseñar un sistema robusto capaz de soportar las condiciones ambientales que se prevén durante su periodo de uso.

4. IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES DEL CLIENTE

4.1 OBTENCIÓN DE DATOS PRIMARIOS

Los datos primarios se obtuvieron mediante entrevista directa con el ingeniero Jaime Aguilar Marmolejo, director del Centro de Investigación en Tecnología Aeroespacial (CITA) de la Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez, y a través de observación de sistemas similares ya diseñados, como el sistema de separación 'lighthband' de Planetary Systems Corporation.

4.2 INTERPRETACIÓN DE DATOS PRIMARIOS

La interpretación de datos primarios es la traducción de las necesidades o planteamientos del cliente en necesidades claras de diseño.

Tabla 1. Interpretación de datos primarios

Planteamientos del cliente	Planteamiento de las necesidades
“Quisiera que el sistema funcione correctamente ante pequeñas variaciones de fabricación”	El sistema funciona correctamente ante pequeñas variaciones de fabricación.
“Quisiera que el sistema funcione correctamente ante grandes variaciones de temperatura”	El sistema funciona correctamente ante las variaciones de temperatura propias de la operación.
“Quisiera que el sistema funcione correctamente ante grandes variaciones de presión”	El sistema funciona correctamente ante las variaciones de presión propias de la operación.
“La separación de las etapas no debe afectar los demás subsistemas”	El sistema de separación no causa daños a los demás subsistemas.
“La separación del cohete no debe afectar la trayectoria de este”	La separación de las etapas no afecta la trayectoria del cohete.
“Quisiera que el sistema de separación no se trabe”	El sistema de separación no se traba.
“El sistema debe ser de bajo peso”	El sistema de separación es liviano.
“Quisiera un sistema soporte las fuerzas que se ejercen durante su operación”	El sistema resiste a las fuerzas ejercidas durante su operación.

"Este subsistema debe acoplarse bien con los demás subsistemas"	El sistema se acopla adecuadamente a los demás.
"En cuanto reciba la señal de separación el sistema debiera activarse automáticamente"	El sistema tiene una latencia o demora muy pequeña en activarse cuando recibe la señal de control.
"Quisiera que el sistema de separación funcione con energía propia"	El sistema utiliza energía propia para efectuar la separación.

4.3 JERARQUÍA E IMPORTANCIA RELATIVA DE NECESIDADES

Una vez se tienen identificadas claramente cada una de las necesidades del cliente, se procede a jerarquizarlas, asignándole un nivel de importancia a cada una de ellas, para lo cual se asumió un rango de importancia de 1 a 5, entendiéndose 1 y 5 como las de menor y mayor importancia respectivamente.

Tabla 2. Jerarquía e importancia relativa de necesidades

Nº	Necesidades	Imp.
1	El sistema de separación no se traba.	5
2	El sistema resiste a las fuerzas ejercidas durante su operación.	5
3	El sistema funciona correctamente ante las variaciones de temperatura propias de la operación.	4
4	El sistema funciona correctamente ante las variaciones de presión propias de la operación.	4
5	La separación de las etapas no afecta la trayectoria del cohete.	4
6	El sistema de separación no causa daño a los demás subsistemas.	4
7	El sistema se acopla adecuadamente a los demás.	4
8	El sistema funciona correctamente ante pequeñas variaciones de fabricación.	3
9	El sistema tiene una latencia o demora muy pequeña en activarse cuando recibe la señal de control.	3
10	El sistema utiliza energía propia para efectuar la separación.	3
11	El sistema de separación es liviano.	2
		Rango de importancia: 1 - 5

5. ESPECIFICACIONES PRELIMINARES

Las especificaciones preliminares proporcionan una descripción precisa de los objetivos de diseño, y no son más que la traducción de las necesidades del cliente en términos técnicos.

5.1 NECESIDADES DEL CLIENTE

A continuación se puntualizan un poco más las necesidades del cliente, para facilitar la asignación de las métricas correspondientes.

Tabla 3. Necesidades del cliente

Nº	Necesidades	Imp.
1	No se atasca	5
2	Resiste fuerzas propias en su operación	5
3	Resiste cambios de temperatura	4
4	Resiste fuerzas G	4
5	No afecta trayectoria del cohete	4
6	No causa daño a los demás subsistemas	4
7	Acoplamiento correcto	4
8	Es robusto	3
9	Rápida reacción del sistema	3
10	No requiere energía externa	3
11	Es liviano	2
Rango de importancia: 1 - 5		

5.2 MÉTRICAS Y UNIDADES

Para asignar métricas se hizo un benchmarking de sistemas anteriormente implementados y con principios de funcionamiento similares al sistema a diseñar.

En la tabla 4 se relacionan las métricas y unidades con sus respectivas necesidades, citadas en la tabla 3.

Tabla 4. Métricas y unidades

Nº	Necesidades	Métricas	Unidades
1	1,2,5,6	Velocidad de separación	m/s
2	9	Latencia	s
3	2,3,4	Esfuerzo	Pa
4	10	Energía de operación	V
5	7,11	Volumen total	m ³
6	7,11	Masa total	kg
7	1,7	Facilidad de instalación	subjetivo
8	8	Prueba de robustez	binario

5.3 RELACIÓN: MÉTRICAS CON NECESIDADES

Tabla 5. Relación: métricas con necesidades

		MÉTRICA	1	2	3	4	5	6	7	8
NECESIDAD	Imp.		Velocidad de separación	Latencia	Esfuerzo	Energía de operación	Volumen total	Masa total	Facilidad de instalación	Test de verificación
1 No se atasca	5	x							x	
2 Resiste fuerzas propias operación	5	x		x						
3 Resiste cambios de temperatura	4			x						
4 Resiste fuerzas G	4			x						
5 No afecta trayectoria cohete	4	x								
6 No causa daño a otros subsistemas	4	x								
7 Acoplamiento correcto	4						x	x	x	
8 Es robusto	3									x
9 Rápida reacción del sistema	3		x							
10 No requiere energía externa	3				x					
11 Es liviano	2						x	x		
TOTAL		18	3	13	3	6	6	9	3	

6. GENERACIÓN DE CONCEPTOS

La generación de conceptos permite al equipo de trabajo explorar a fondo posibles soluciones al problema planteado tomando en cuenta las necesidades del cliente.

6.1 CLARIFICAR EL PROBLEMA

6.1.1 Caja negra. La caja negra permite ver de forma sistemática las entradas y salidas que permanecerán a lo largo del proceso de diseño.

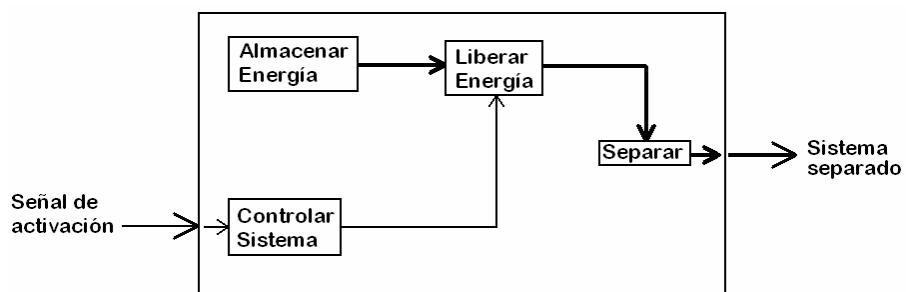
Figura 3. Caja negra



La figura 3 muestra que el sistema de separación sólo recibe la señal de activación, y este debe entregar el sistema separado.

6.1.2 Subfunciones. Mediante la descomposición funcional, se busca dividir el problema en subproblemas para clarificar su entendimiento y así generar soluciones que cumplan satisfactoriamente con las necesidades y especificaciones establecidas de una manera más simple.

Figura 4. Subfunciones



6.1.3 Subfunciones críticas de diseño.

- **Almacenar energía.** Subsistema encargado de almacenar la energía que será utilizada para la separación del sistema.
- **Controlar sistema.** Subsistema encargado de recibir la señal de activación y direccionarla, así como controlar los componentes electrónicos en caso de ser usados.
- **Liberar energía.** Subsistema encargado de dar paso y/o transmitir la energía almacenada.
- **Separar.** Subsistema encargado de convertir la energía en movimiento.

6.2 BÚSQUEDA INTERNA

El equipo de diseño generó ideas tanto a nivel individual como a nivel grupal, basándose en experiencia propia y en diseños anteriores, y haciendo uso de técnicas apropiadas como la lluvia de ideas.

6.3 EXPLORACIÓN SISTEMATIZADA

6.3.1 Conceptos generados por subfunciones.

- Conceptos generados para la subfunción “almacenar energía”:
 - Pólvora
 - Aire comprimido
 - Energía eléctrica
 - Energía hidráulica
 - Energía elástica
- Conceptos generados para la subfunción “controlar sistema”:
 - Lógica digital
 - Microcontrolador
 - PLD
 - Chispa de encendido
 - Señal bajo/alto voltaje
 - Motor

➤ Conceptos generados para la subfunción “liberar energía”:

- Resorte
- Pistón
- Motor
- Válvula
- Imán ó electroimán

➤ Conceptos generados para la subfunción “separar”:

- Resorte
- Pistón
- Motor

6.3.2 Árbol de clasificación de conceptos. Los árboles de clasificación se usan para dividir y clasificar los conceptos por tipos, así como para eliminar los menos promisorios.

Figura 5. Árbol 'almacenar energía'

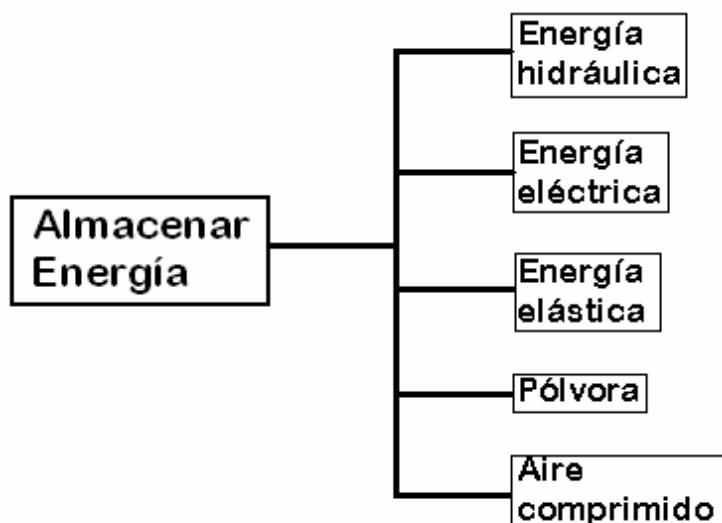
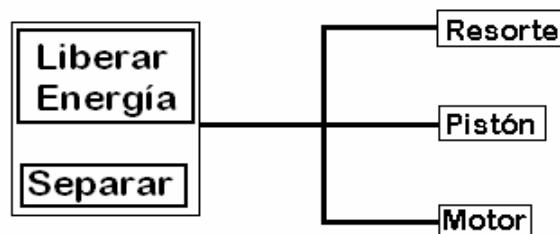


Figura 6. Árbol 'liberar energía y separar'



En el árbol de la figura 6, se combinan las subfunciones 'liberar energía' y 'separar' debido a que los conceptos generados para los dos casos pueden desempeñar ambas funciones.

6.3.3 Conceptos generados. Los conceptos generados se clasifican en tres principios de funcionamiento, como se puede observar en la representación gráfica de conceptos (5.3.4).

Tabla 6. Conceptos generados

Concepto	Energía	Actuadores	Principio de Funcionamiento
A	Aire comprimido	Pistón-Resorte	1
B	Aire comprimido	Pistón	1
C	Pólvora	Pistón-Resorte	1
D	Pólvora	Pistón	1
E	Energía hidráulica	Pistón-Resorte	1
F	Energía hidráulica	Pistón	1
G	Energía eléctrica	Motor-Gancho-Resorte	2
H	Energía eléctrica	Motor-Gancho	2
I	Energía eléctrica	Motor-Pasador	2
J	Energía eléctrica	Motor-Pistón-Resorte	3

6.3.4 Representación gráfica de conceptos.

- **Principio de funcionamiento 1.** El principio de funcionamiento 1, consiste en liberar la energía contenida en un cilindro concéntrico (aire comprimido, energía hidráulica o pólvora) y con esta romper un pasador que libera los tres ejes conectados en el centro. Las figuras 7 y 8 representan el principio de funcionamiento para los conceptos A, B, C, D, E y F.

Figura 7. Vista isométrico en corte

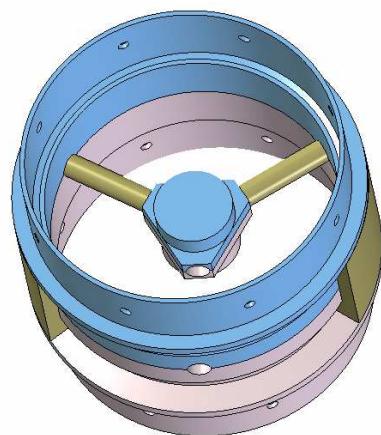
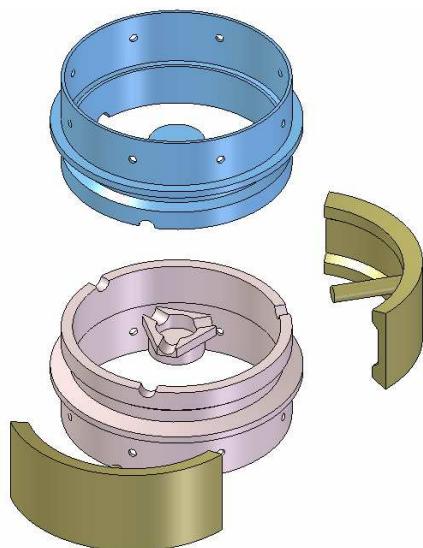


Figura 8. Separación



- **Principio de funcionamiento 2.** El principio de funcionamiento 2, consiste en halar con un motor tres ganchos o tres pasadores, y dejar caer la etapa inferior del cohete por la acción de su propio peso. Las figuras 9 y 10 representan el principio de funcionamiento para los conceptos G, H e I.

Figura 9. Vista isométrico en corte

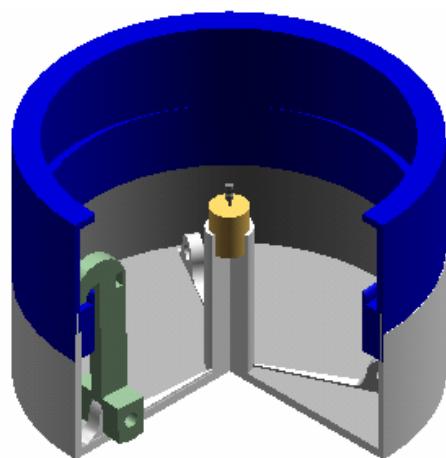
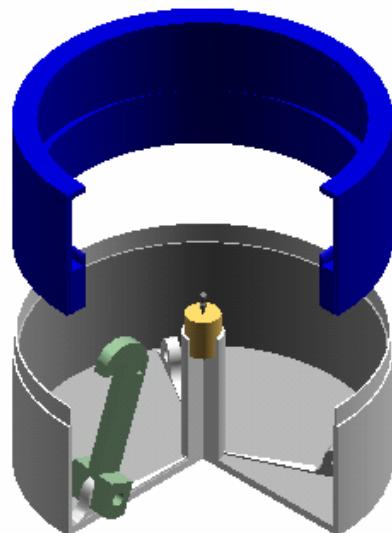


Figura 10. Separación



- **Principio de funcionamiento 3.** El principio de funcionamiento 3, consiste en comprimir hacia adentro un sistema con forma de anillo, por la acción de un motor que le imprime energía a un cilindro deslizante. Una vez el sistema esta comprimido, su etapa superior este es impulsada hacia arriba por la acción de varios resortes ubicados en la etapa inferior. Las figuras 11 y 12 representan el principio de funcionamiento para el concepto J.

Figura 11. Vista superior

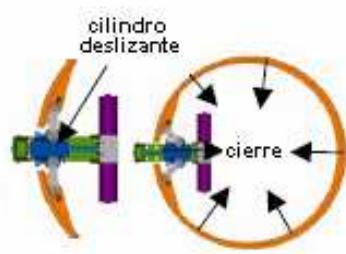
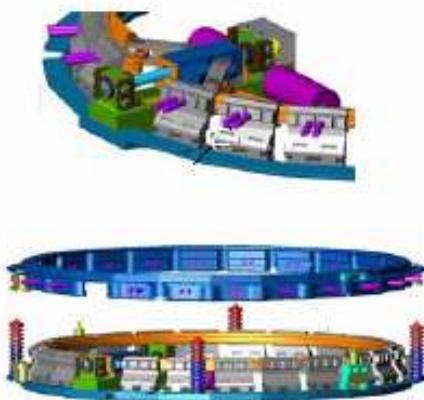


Figura 12. Vista isométrico



- **Principio de funcionamiento 4.** El principio de funcionamiento 4, es un híbrido de la geometría expuesta en el principio de funcionamiento 3, de un dispositivo con forma de anillo sin ningún elemento en su centro, y el principio de funcionamiento 1 que consiste en romper un pasador, luego de liberarse la energía de un contenedor.

Figura 13. Vista superior

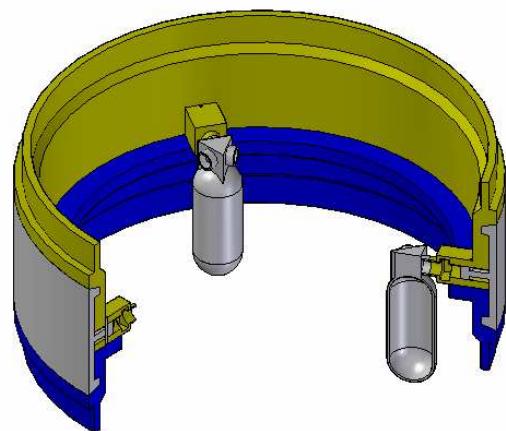
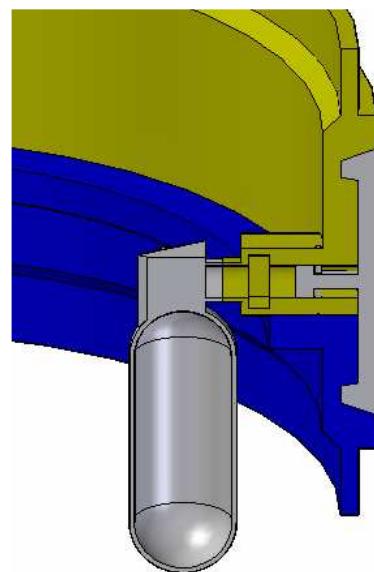


Figura 14. Ruptura pasador



7. SELECCIÓN DE CONCEPTOS

Tempranamente en el proceso de desarrollo de productos el equipo de diseño identifica un grupo considerable de necesidades. Mediante el uso de variados métodos el equipo genera alternativas de solución en respuesta a estas necesidades. El proceso de selección de conceptos es un proceso de evaluación con respecto a las necesidades del cliente y otros criterios comparando las relativas debilidades y fortalezas de cada concepto, y seleccionando uno o más conceptos para futuras investigaciones, análisis o desarrollo.

El objetivo de la selección de concepto no es seleccionar el mejor concepto, el objetivo de la selección de concepto es desarrollar el mejor concepto.

En pocas palabras, la selección de conceptos es en la cuál varios conceptos del producto son analizados y secuencialmente eliminados para identificar el más promisorio de los conceptos.

7.1 CRITERIOS ABSOLUTOS

7.1.1 Criterio de viabilidad. Todos los conceptos evaluados han sido utilizados independientemente e incluso conjuntamente en diferentes áreas de la tecnología, de igual forma se dispone de información necesaria para efectuar su diseño o rediseño, por tanto se considera que todos los conceptos planteados son viables.

7.1.2 Disponibilidad de tecnología. Las tecnologías necesarias para el desarrollo de los conceptos están disponibles en nuestro medio y pueden ser desarrolladas partiendo de procesos de manufactura conocidos. El proceso de diseño para estas tecnologías no requiere de mayores modificaciones de los conceptos hasta el momento planteados.

7.1.3 Examen PASA/NO PASA. Los conceptos mencionados han sido propuestos tomando en cuenta las necesidades de los clientes, por esta razón y analizando superficialmente los conceptos planteados, todos cumplen con dichos requerimientos.

7.2 CRITERIOS RELATIVOS

7.2.1 Matriz de tamizaje de conceptos. La matriz de tamizaje de conceptos permite evaluar y comparar cada uno de los conceptos generados con respecto a una referencia, y de esta forma eliminar los conceptos menos promisorios. Para desarrollar dicha matriz se debe tener en cuenta:

- **Preparar la matriz de tamizaje de conceptos.** Consiste en establecer los criterios de selección y establecer un concepto referencia, el cuál por lo general es un estándar industrial o un concepto con el que los diseñadores estén familiarizados.
- **Calificar conceptos.** Se establece la puntuación con la que se calificará con respecto a la referencia; en este caso, "mejor que" (+), "igual que" (0), o "peor que" (-). Posteriormente se califica cada concepto en relación a los criterios establecidos.
- **Ordenar por rango los conceptos.** Una vez calificados los conceptos, para cada uno de ellos se restan las calificaciones positivas de las negativas, y se ordenan en forma ascendente según su puntuación final.
- **Combinar y mejorar los conceptos.** En muchas ocasiones lo aconsejable no es conformarse con los conceptos que aparentemente satisfacen los requerimientos del cliente sino buscar posibles combinaciones entre estos, y de esta manera obtener las fortalezas de cada uno de ellos.
- **Seleccionar uno o más conceptos.** Se seleccionan los conceptos con mayor puntuación, y se analizan posibles combinaciones de conceptos, eliminando características malas y añadiendo las buenas.
- **Reflejar los resultados en el proceso.**

La tabla 7 refleja el tamizaje de los conceptos, donde se seleccionan los once conceptos generados contra los once criterios de selección establecidos por el equipo de diseño. Se seleccionó como referencia el "Sistema Barra Abrazadera", desarrollado por estudiantes de la Universidad Autónoma de Occidente.

Tabla 7. Matriz tamizaje conceptos

		VARIANTES DE CONCEPTOS											
CRITERIO DE SELECCIÓN		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	BJ	Ref.
1	No se atasca	0	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0
2	Resiste fuerzas propias operación	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0
3	Resiste cambios de temperatura	+	+	0	0	+	+	+	+	+	+	+	0
4	Resiste fuerzas G	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0
5	No afecta trayectoria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	No causa daño a los demás subsistemas	+	0	+	0	+	0	+	0	0	+	+	0
7	Robustez antes de separación (# piezas-acoplamiento)	-	0	-	0	-	0	-	0	0	-	0	0
8	Es robusto	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0
9	Rápida reacción del sistema	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	0	0
10	No requiere energía externa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Es liviano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0
POSITIVOS		2	1	1	0	3	2	3	2	2	3	2	
IGUALES		8	10	9	11	6	8	6	6	5	6	8	
NEGATIVOS		1	0	1	0	2	1	2	2	2	2	1	
TOTAL		1	1	0	0	1	1	1	0	-2	1	1	
ORDEN		4	7	9	10	1	5	2	8	11	3	6	
¿CONTINUAR?		SI	SI	no	no	SI	SI	SI	no	no	SI	SI	

7.2.2 Matriz evaluación conceptos.

Tabla 8. Matriz evaluación conceptos

		VARIANTES DE CONCEPTOS														
# CRITERIO SELECCIÓN	x PONDERACIÓN	Pond	A		B		E		F		G		J		BJ	
		Crite	Nota	Criterio ponder.	Nota	Criterio ponder.	Nota									
1 No se atasca	12,50	5,00	4	0,50	4	0,50	3	0,38	3	0,38	3	0,38	3	0,38	4	0,50
2 Resiste fuerzas propias de operación	7,50	3,00	4	0,30	4	0,30	4	0,30	4	0,30	4	0,30	4	0,30	4	0,30
3 Resiste cambios de temperatura	7,50	3,00	2,50	0,19	2,50	0,19	2,50	0,19	2,50	0,19	4	0,30	4	0,30	2,50	0,19
4 Resiste fuerzas G	7,50	3,00	4	0,30	4	0,30	4	0,30	4	0,30	3	0,23	3	0,23	4	0,30
5 No afecta trayectoria del cohete	12,50	5,00	3	0,38	3,30	0,41	3	0,38	3,30	0,41	3	0,38	3	0,38	3	0,38
6 No causa daño a los demás subsistemas	12,50	5,00	4	0,50	3,50	0,44	4	0,50	3,50	0,44	4	0,50	4	0,50	4	0,50
7 Robustez antes de separación (# piezas)	5,00	2,00	3,80	0,19	4	0,20	3,80	0,19	4	0,20	3	0,15	3	0,15	4,50	0,23
8 Es robusto	12,50	5,00	3,50	0,44	3,50	0,44	3,50	0,44	3,50	0,44	3,50	0,44	3,50	0,44	3,50	0,44
9 Rápida reacción del sistema	7,50	3,00	4,50	0,34	4,50	0,34	3,50	0,26	3,50	0,26	3,50	0,26	3,50	0,26	4,30	0,32
10 No requiere energía externa	2,50	1,00	4	0,10	4	0,10	3,50	0,09	3,50	0,09	3	0,08	3	0,08	4	0,10
11 Es liviano	12,50	5,00	3	0,38	3	0,38	3	0,38	3	0,38	3	0,38	3	0,38	3	0,38
TOTAL		3,60	3,59		3,39		3,38		3,38		3,38		3,62			
ORDEN		2	3		4		5		6		7		1			
¿CONTINUAR?		NO	NO		DESARROLLAR											

8. ESPECIFICACIONES FINALES

Las especificaciones finales reflejan las características técnicas que tendrá el sistema de separación al finalizar su diseño.

Tabla 9. Especificaciones finales

Nº	Métricas	Unidades	Valor
1	Velocidad de separación	m/s	5
2	Latencia	s	1
3	Esfuerzo	Pa	Si
4	Energía de operación	v	24
5	Volumen total	m ³	< 0,25
6	Masa total	kg	< 6
7	Facilidad de instalación	subjetivo	Si
8	Prueba de robustez	binario	Si

De la métrica # 3, esfuerzo, se esperaría un valor cuantitativo, sin embargo en este caso es subjetivo ya que este valor depende de los materiales de diseño seleccionados; sólo se garantiza que tales materiales soportarán las cargas propias durante su operación.

9. DESARROLLO DE LA ARQUITECTURA DE PRODUCTO

La arquitectura de un producto determina el tipo de relación existente entre los elementos físicos y funcionales, donde los primeros no son más que la representación tangible o componentes del sistema para el desempeño de los segundos. La arquitectura de un producto puede ser de dos tipos:

- Arquitectura modular, caracterizada por:
 - Elementos físicos que desempeñan una o pocas funciones.
 - Interacciones entre los elementos físicos muy bien definidas y de vital importancia para las funciones primarias del sistema.

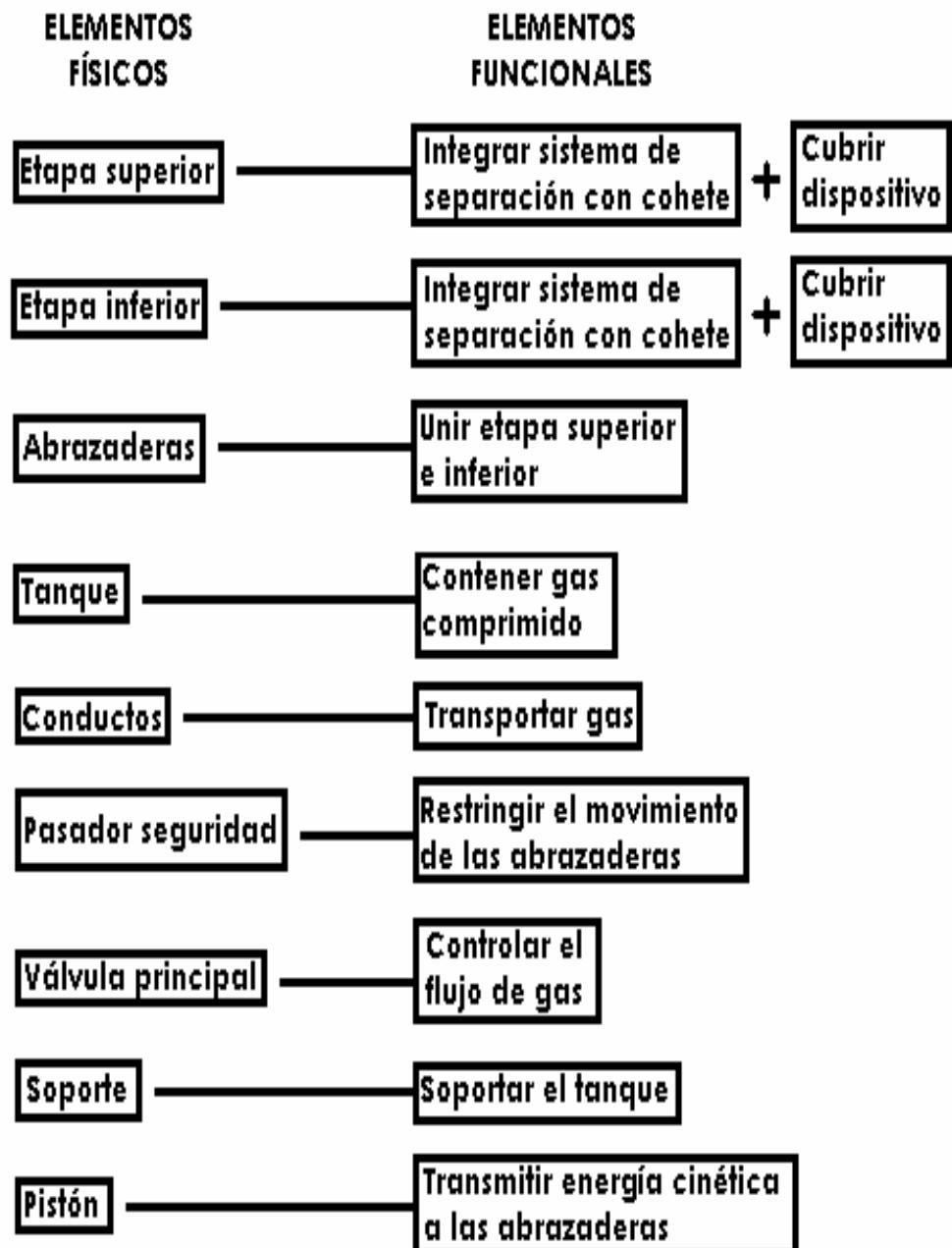
- Arquitectura integral, caracterizada por:
 - Implementar más de un elemento físico para desempeñar una función.
 - Interacciones entre los elementos físicos no muy bien definidas.

9.1 INTERACCIONES FUNDAMENTALES

Las interacciones fundamentales establecen la relación directa de un componente a otro, y como su nombre lo indica son fundamentales para el funcionamiento del sistema, lo que implica que estas sean planeadas para el intercambio de información entre dichos componentes.

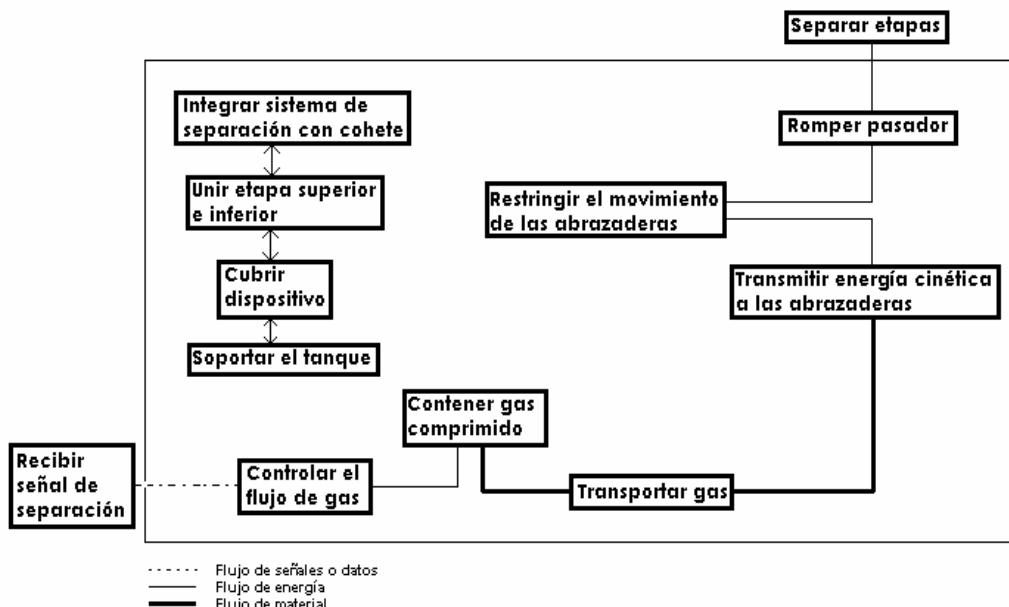
9.1.1 Elementos físicos y funcionales. Las interacciones fundamentales del diagrama de la figura 15, muestran claramente como cada elemento físico desempeña sus respectivas funciones, sin compartirlas con ningún otro.

Figura 15. Diagrama elementos físicos y funcionales



9.1.2 Elementos funcionales e interacciones fundamentales. En el diagrama de la figura 16 se pueden apreciar todos los elementos funcionales del sistema, donde sólo se muestran las conexiones principales entre elementos.

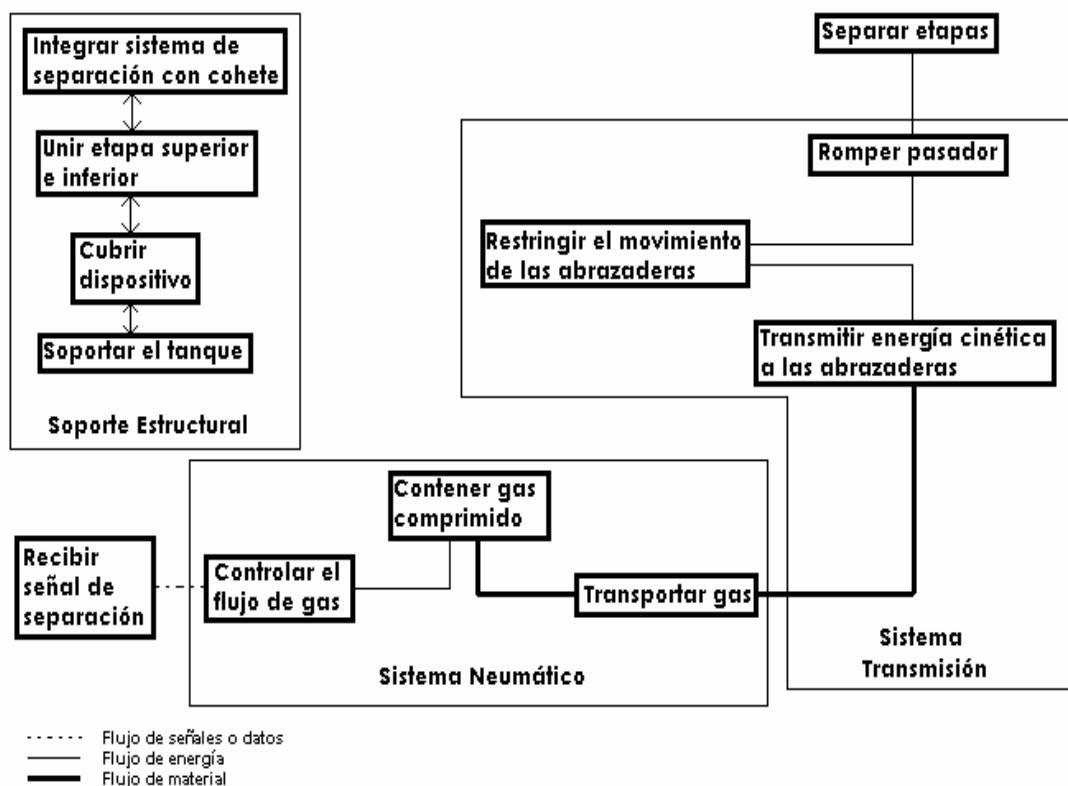
Figura 16. Elementos funcionales e interacciones fundamentales



9.1.3 Agrupación elementos funcionales. Para agrupar los elementos funcionales en componentes se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Integración y precisión geométricas.
- Compartir una función
- Similitud de la tecnología de diseño o de producción.

Figura 17. Agrupación elementos funcionales en componentes

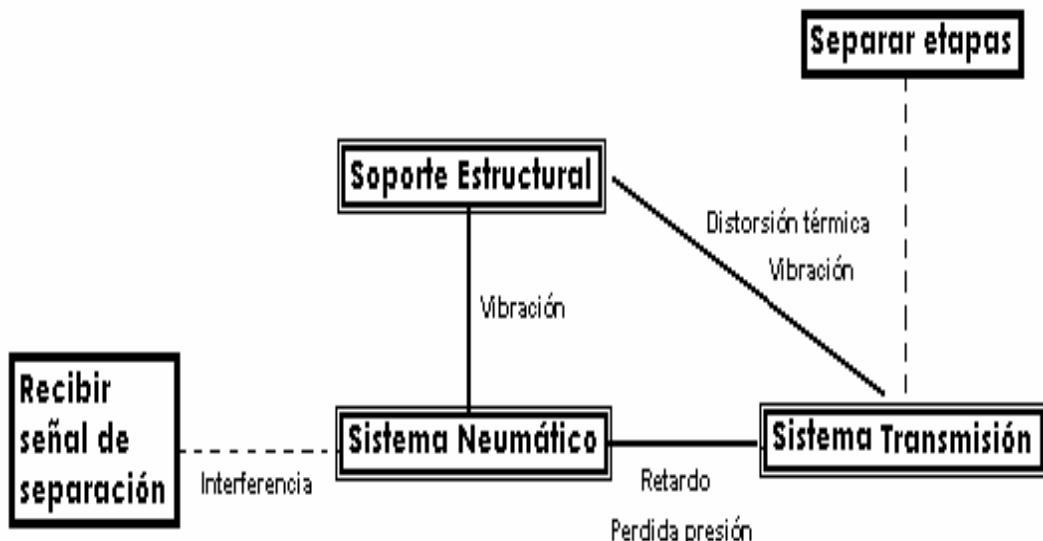


- **Soporte estructural:** Este componente o agrupación de elementos funcionales, tiene la finalidad de brindar soporte al dispositivo e integrar geométricamente sus partes.
- **Sistema neumático:** Este componente se encarga de almacenar la energía necesaria para la separación del sistema y distribuirla en forma controlada.
- **Transmisión:** Este componente permite transmitir y transformar a través de sus componentes la energía obtenida del sistema neumático para la ruptura del pasador de seguridad y posterior separación del sistema.

9.2 INTERACCIONES INCIDENTALES

Aunque las interacciones incidentales son consideradas producto del funcionamiento propio de las partes o de la distribución geométrica de las mismas, en el sistema de separación, es de vital importancia brindarles especial atención, ya que por la propia naturaleza del cohete y el medio en que operará el dispositivo de separación, es posible que aumente la magnitud de dichas interacciones.

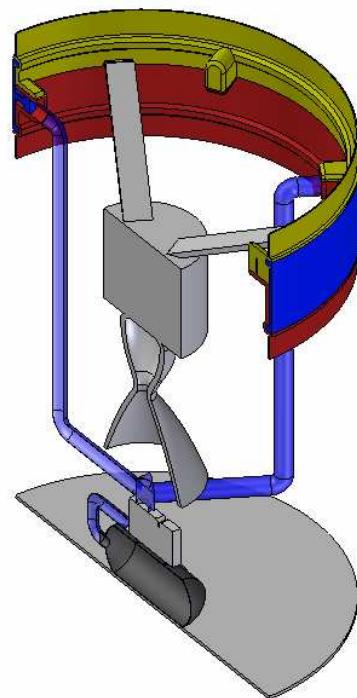
Figura 18. Interacciones incidentales



9.3 LAYOUT O DISTRIBUCIÓN GEOMÉTRICA

El layout o distribución geométrica permite analizar y seleccionar la más adecuada distribución de componentes en el espacio disponible para el diseño, sin llegar a ocasionar deficiencias en el funcionamiento del sistema.

Figura 19. Layout - vista en corte

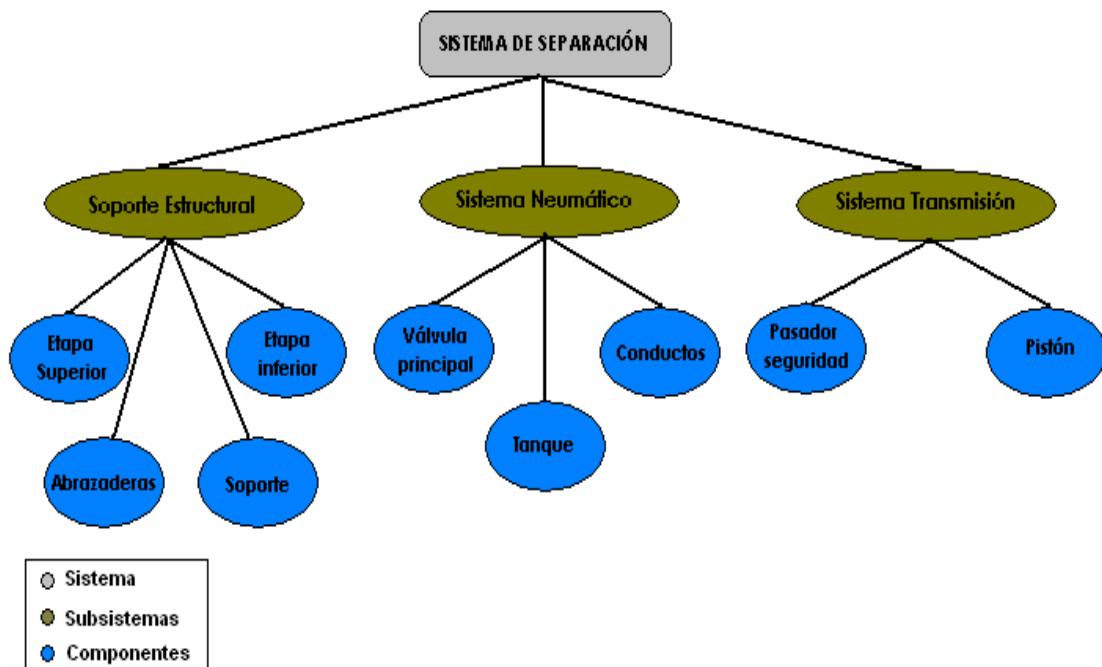


9.4 SELECCIÓN DE LA AQUITECTURA

9.4.1 Definición de niveles. Los niveles son formas de clasificación, que permiten visualizar de forma más clara las jerarquías de los grupos que conforman el sistema. Se definieron los siguientes niveles para el dispositivo de separación:

- Sistema
- Subsistemas
- Componentes

Figura 20. Niveles



9.4.2 Definición arquitectura predominante por niveles.

➤ **Sistema.** En general, el dispositivo de separación presenta una arquitectura modular, debido a dos factores principales:

- La propia naturaleza del cohete y su medio de operación, implica la implementación de elementos costosos y que eventualmente requieren de cambios.
- El sistema es de mucha precisión y requiere de una interacción exacta entre sus partes.

Como se sabe, es muy pocas ocasiones un producto presenta arquitectura estrictamente modular o integral. En el sistema de separación algunos componentes presentan arquitectura integral, como el caso del pistón que no sólo rompe el pasador de seguridad sino que a su vez sujetas las abrazaderas.

➤ **Subsistemas y componentes.** La arquitectura modular puede ser de tres tipos:

- Arquitectura ranura-modular
- Arquitectura bus-modular
- Arquitectura seccional-modular

A nivel de subsistemas y componentes, para ser más precisos, existe una arquitectura de tipo ranura modular, ya que las interfaces entre los componentes son de tipos diferentes; y en general, en este tipo de arquitectura cada componente requiere una interfaz diferente para adaptar interacciones únicas entre ese componente y el resto del producto.

9.5 ARQUITECTURA SISTEMA ELECTRÓNICO

9.5.1 Requisitos y especificaciones. Los requisitos (necesidades) y especificaciones generales del sistema de separación asociados directamente al sistema electrónico son:

Tabla 10. Requisitos y especificaciones sistema electrónico

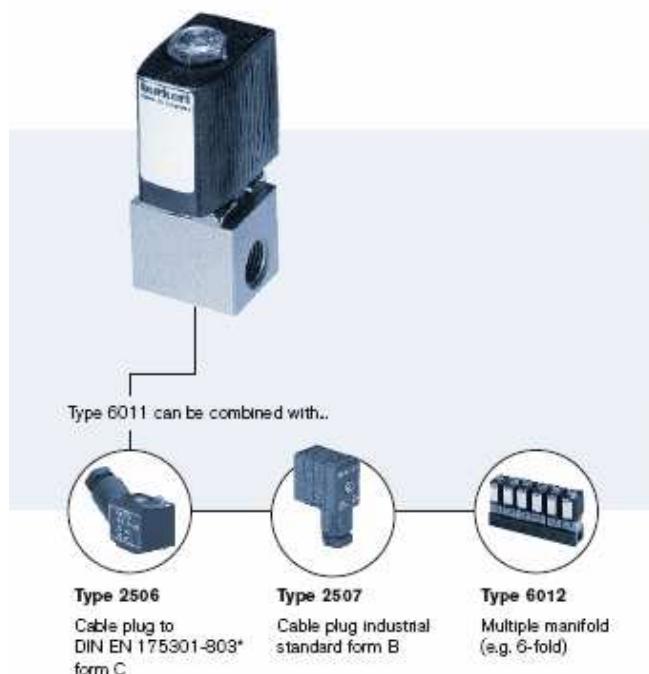
#	Necesidades	Especificaciones	Unidades
3	Resiste cambios de temperatura	Temperatura	°C
9	Rápida reacción del sistema	Latencia	s
10	No requiere energía externa	Energía de operación	v
11	Es liviano	Masa total	g

9.5.2 Diseño arquitectural.

- **Interacciones.** El sistema de separación interactúa con el resto del sistema de forma sencilla, recibe una señal de 24V ordenando la separación del sistema y este automáticamente separa las etapas, lo cuál elimina cualquier interacción directa con algún usuario/operario.

- **Componentes.**

Figura 21. Electroválvula 24V



10. DISEÑO INDUSTRIAL

10.1 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL DISEÑO INDUSTRIAL

10.1.1 Evaluación de las necesidades ergonómicas.

➤ Necesidades ergonómicas:

- La estructura del sistema de separación debe ser aerodinámica para no afectar la trayectoria del cohete.
- La estructura del sistema de separación debe tener la altura apropiada para no afectar la geometría del cohete.

Figura 22. Valoración ergonomía



- **Facilidad de uso:** El sistema de separación es un sistema de tipo científico, por lo cual sólo es usado por personal calificado.
- **Facilidad de mantenimiento:** El mantenimiento del sistema de separación es complejo ya que se requiere un alto conocimiento de su funcionamiento.
- **Cantidad de interacciones:** Las interacciones del sistema con el usuario son pocas ya que este sólo debe recibir una señal para su activación.

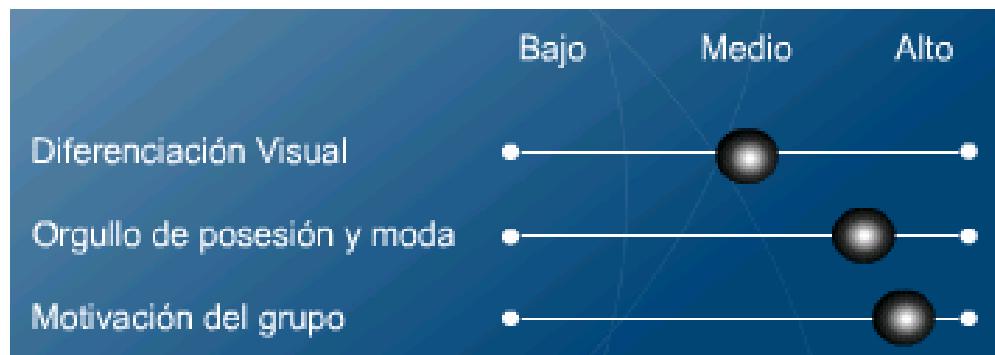
- **Novedad de interacciones:** El sistema de separación requiere de interacciones que permitan un correcto funcionamiento, basadas en la optimización del proceso más que en el entendimiento por parte del usuario.
- **Seguridad:** El sistema de separación tiene un alto nivel de seguridad, ya que esta es una de las necesidades más importantes de diseño.

10.1.2 Evaluación de las necesidades estéticas.

➤ **Necesidades estéticas:**

- El aspecto del sistema de separación debe ser sencillo pero agradable.
- El logo de la empresa debe ser visible y debe ser acorde al proyecto.

Figura 23. Valoración estética



- **Diferenciación visual:** Este es un sistema que similar a otros sistemas de separación, pero busca marcar diferencia en su aspecto, sin dejar de lado los estándares.
- **Orgullo de posesión y moda:** El sistema de separación es un producto que genera mucho orgullo de posesión ya que hace parte de un sistema (cohete) considerado de última tecnología y que abarca muchos aspectos científicos.
- **Motivación del grupo:** Este proyecto causa gran motivación ya que es un sistema de alto nivel tecnológico y su uso va en pro del desarrollo aeroespacial colombiano.

10.1.3 Evaluación de la calidad.

➤ **Calidad de las interfaces del usuario.** El sistema de separación es un producto que va dirigido a usuarios capacitados que conocen su funcionamiento, razón por la cual su manipulación no podría llevarse a cabo por cualquier usuario.

➤ **Requerimientos emocionales:**

- El aspecto del producto no es lo más importante, sin embargo en su aspecto es agradable.
- Esta clase de proyectos genera mucho orgullo tanto para el equipo de desarrollo como para sus propietarios.
- Al observar este sistema se brinda una noción de seguridad y estabilidad.

➤ **Facilidades de mantenimiento y reparación.**

• **¿Es el mantenimiento del producto obvio?, ¿es fácil?** El mantenimiento del producto no es obvio, ya que no es un producto que se comercialice en un mercado común. De igual forma, el sistema está diseñado para ser usado en una sola ocasión.

• **¿Las características del producto informan efectivamente los procedimientos de ensamble y desensamble?** Debido a la geometría del sistema es evidente la forma de ensamble, sin embargo sería prudente puntualizar los pasos para dichas actividades.

➤ **Uso apropiado de recursos. ¿Es el material seleccionado apropiado (en términos de costo y calidad)?** Los materiales se seleccionaron para satisfacer las restricciones de manufactura, para soportar condiciones ambientales extremas y para cumplir con los criterios de apariencia.

➤ **Diferenciación del producto. ¿Podrá un cliente que mire el producto en una tienda distinguirlo por su apariencia?** Este es un producto con un objetivo tecnológico, por lo que sus virtudes son visibles más por su desempeño que por su aspecto.

Figura 24. Valoración calidad



10.2 PREDOMINIO DEL DISEÑO INDUSTRIAL DEL PRODUCTO

Este es un producto que es fuertemente dominado por la tecnología, esta pensado para ser usado por expertos, pero aún así es importante la interacción con el usuario.

Figura 25. Predominio diseño industrial



11. DISEÑO PARA MANUFACTURA

El diseño y la manufactura son dos aspectos que no deben separarse, por tanto, el diseño de piezas de un sistema no sólo debe ser concebido para cumplir con unas necesidades y unos requerimientos establecidos, sino que de igual forma en la práctica puedan ser manufacturados económica y eficientemente.

El diseño para manufactura (DFM) es un proceso complejo que involucra los siguientes aspectos:

- Proceso de diseño con los materiales.
- Métodos de manufactura.
- Planeación de procesos.
- Ensamble
- Prueba
- Aseguramiento de la calidad

El DFM además de establecer relaciones cuantitativas para facilitar la manufactura, lo hace para realizar un ensamblaje de piezas a un costo de producto mínimo.

11.1 PROCESO MANUFACTURA EN COMPONENTES PROPIOS

El sistema de separación posee tanto componentes estándar como componentes propios, donde los últimos fueron diseñados desde la selección de su material hasta la geometría de los mismos, por parte del equipo de diseño.

Figura 26. Costos de manufactura

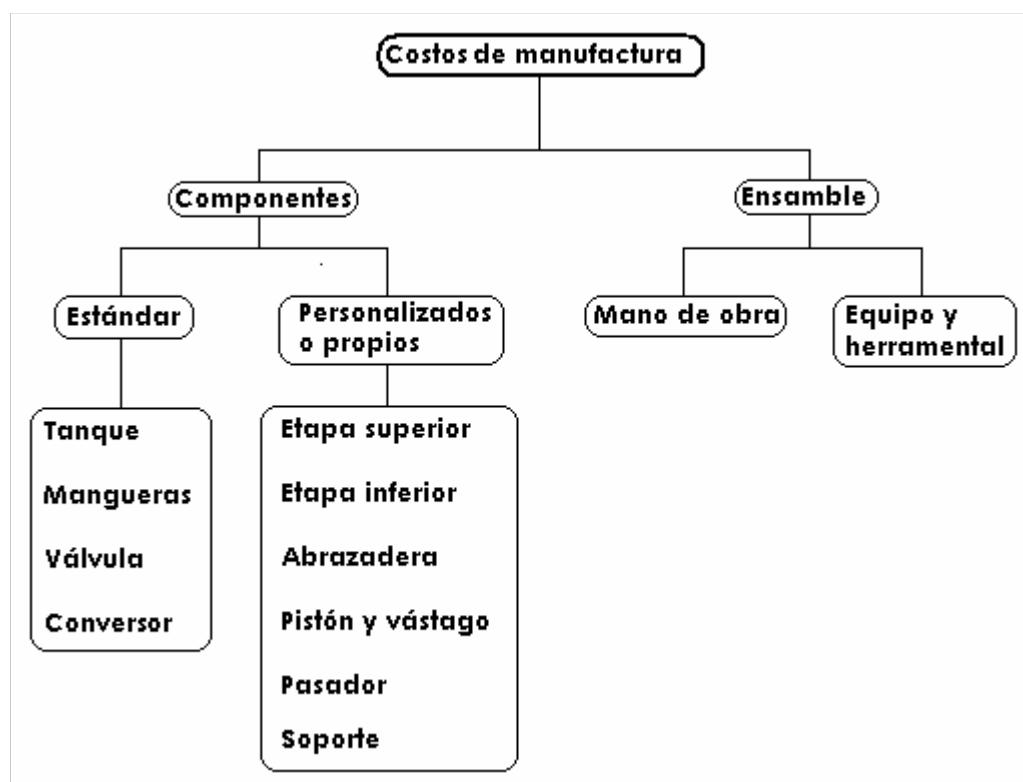
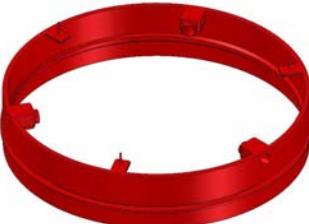
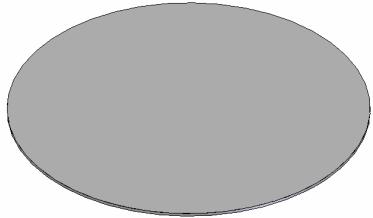


Tabla 11. Proceso de manufactura de componentes propios

Pieza	Cant.	Material	Proceso de manufactura
	1	Aluminio	Corte, fresado, taladrado y ranurado
Etapa superior			
	1	Aluminio	Corte, fresado, taladrado y ranurado
Etapa inferior			
	3	Aluminio	Corte, fresado y ranurado
Abrazaderas			
	3	Aluminio	Torneado, roscado
Vástago y Pistón			
	1	Aluminio	Torneado
Pasador			

	1	Madera triplex	Corte, lijado
Soporte tanque			

11.2 COSTOS DE COMPONENTES ESTÁNDAR

Tabla 12. Costos componentes estándar

Componente	Cantidad de piezas	Costo (\$)
Tanque	1	250000
Electroválvula	1	250000
Conversor 1/3	1	30000
Manguera	1 metro	4100
Total		534100

12. PROTOTIPADO

Un prototipo es una aproximación al producto a través de una o más dimensiones de interés, son de gran utilidad, ayudan a recrear ideas, probar conceptos y a dar una visión más tangible del producto. Para este proyecto se usaron varios tipos de prototipos desde bocetos en papel, hasta modelos tridimensionales modelados en software.

12.1 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR

Para realizar los modelos CAD (Diseño Asistido por Computador) se usó el software Solid Edge V 14. Desde el principio del proceso de diseño se recrearon los conceptos, y de igual forma se hicieron las modificaciones correspondientes según demandaba el diseño.

- **Prototipos preliminares.**

Figura 27. Primer prototipo en 3D de concepto pirotécnico

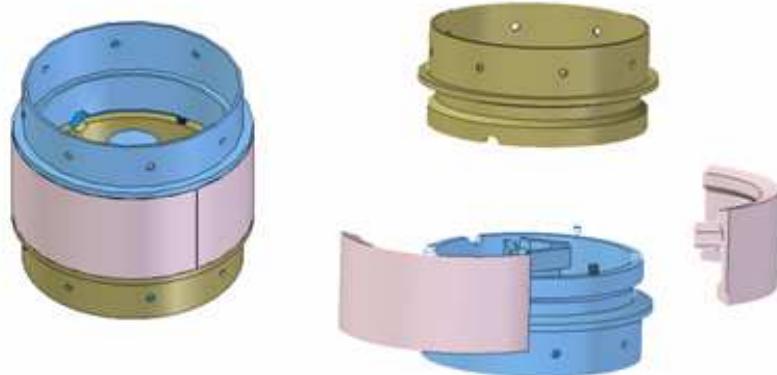


Figura 28. Prototipo de concepto motor-gancho

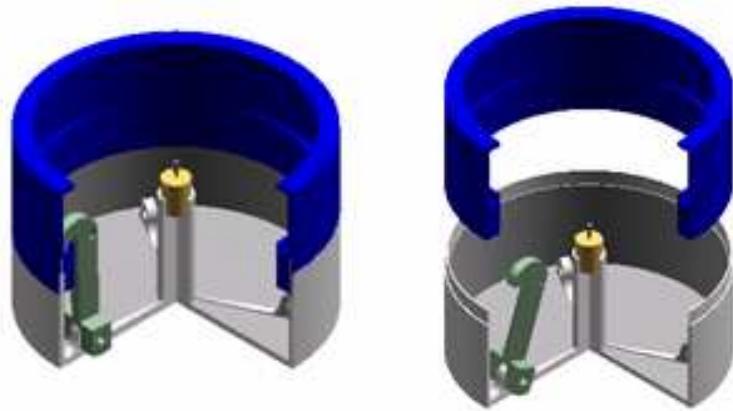


Figura 29. Boceto de concepto con energía neumática

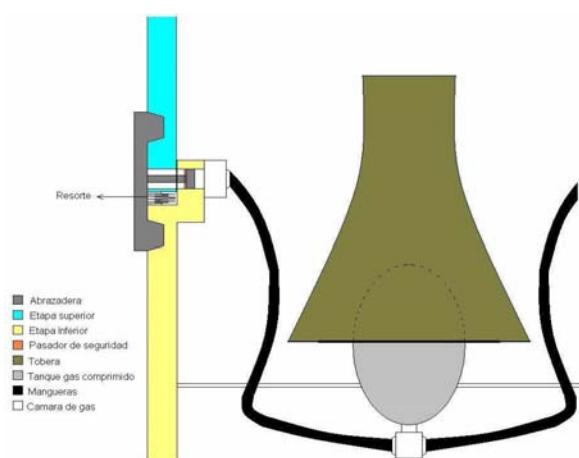


Figura 30. Modelo de concepto seleccionado



- **Prototipo final.** Luego de hacer varias modificaciones al concepto seleccionado, debido a requerimientos de diseño, se estableció el sistema el final que se modeló en Solid Edge. Este prototipo se puede considerar de tipo analítico.

Figura 31. Componentes

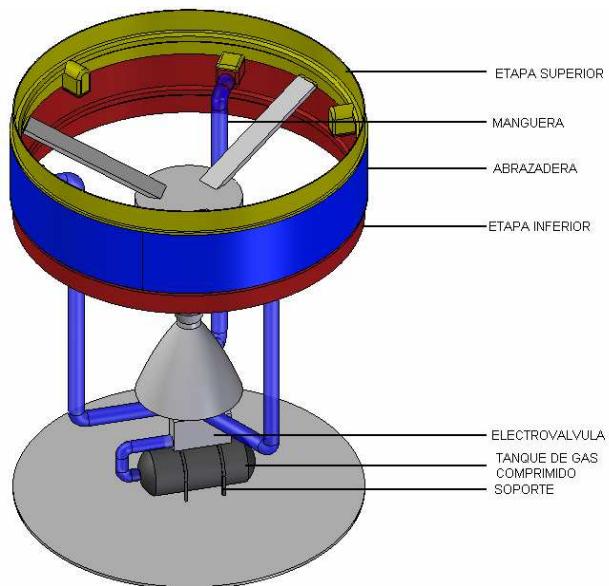


Figura 32. Vista en corte isométrico

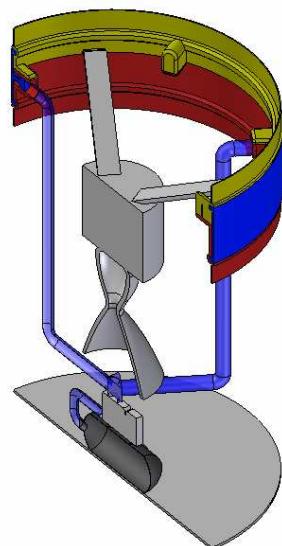


Figura 33. Vista perfil subsistema crítico

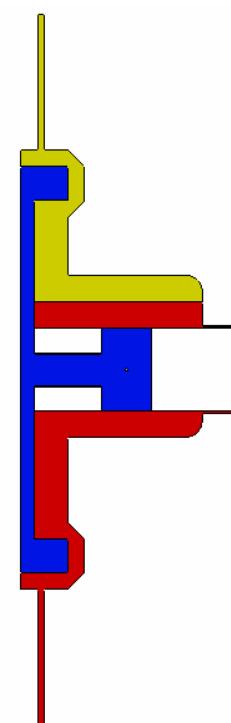
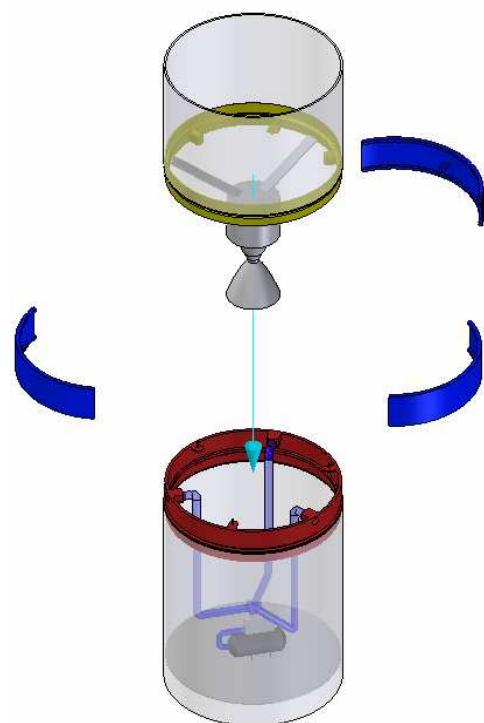


Figura 34. Separación del sistema



12.2 INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR

El siguiente paso luego de crear el modelo CAD, fue generar un modelo CAE (Ingeniería Asistida por Computador). La ingeniería asistida por computador, consiste en usar un ordenador o computador para realizar análisis a los modelos generados por una herramienta CAD, en este caso se utilizó el software Algor, que trabaja con el método de elementos finitos o FEM. Este método se basa en dividir el cuerpo o estructura en una serie de subdominios denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización, donde dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. El conjunto discretizado en su totalidad se le conoce con el nombre de malla.

Los cálculos se realizan sobre una malla, y de acuerdo con las relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales.

Durante esta parte del diseño, se realizaron pruebas estructurales al sistema, para evaluar por ejemplo si resistiría a las fuerzas a las que estaría sometido, al igual que la fuerza necesaria para romper los pasadores, entre otras.

Figura 35. Sistema mallado

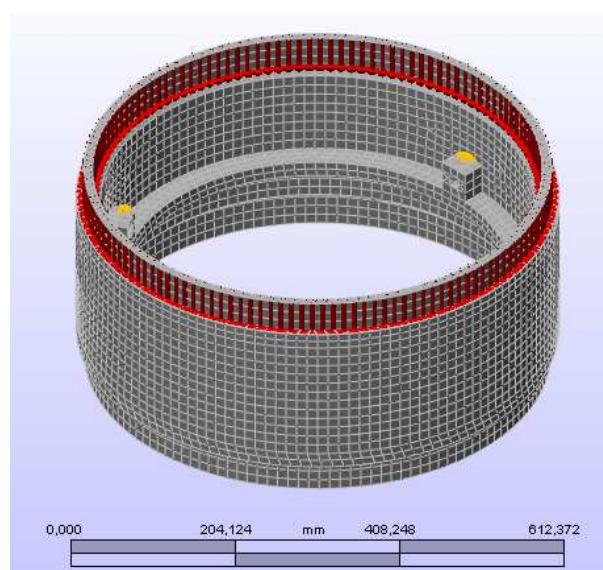


Figura 36. Factor de seguridad

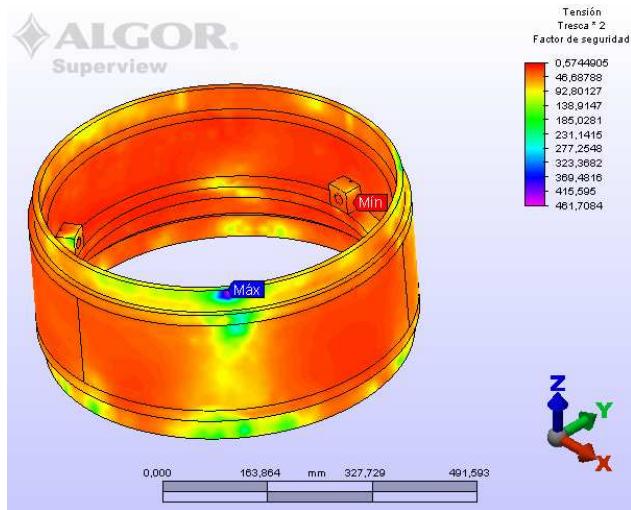
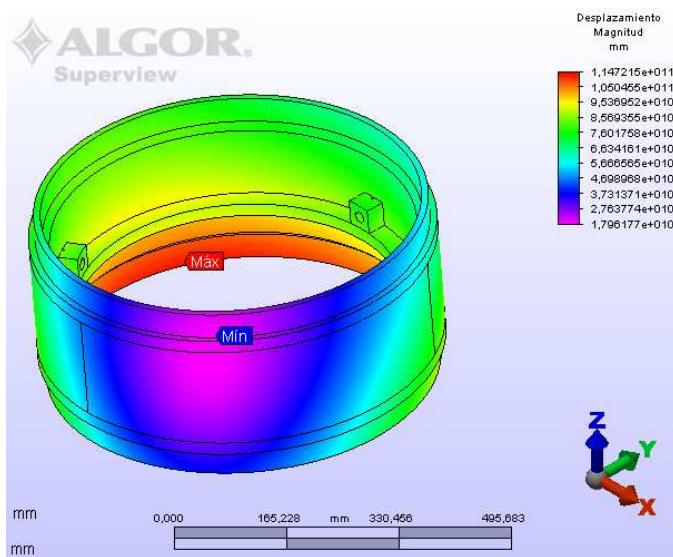


Figura 37. Desplazamiento

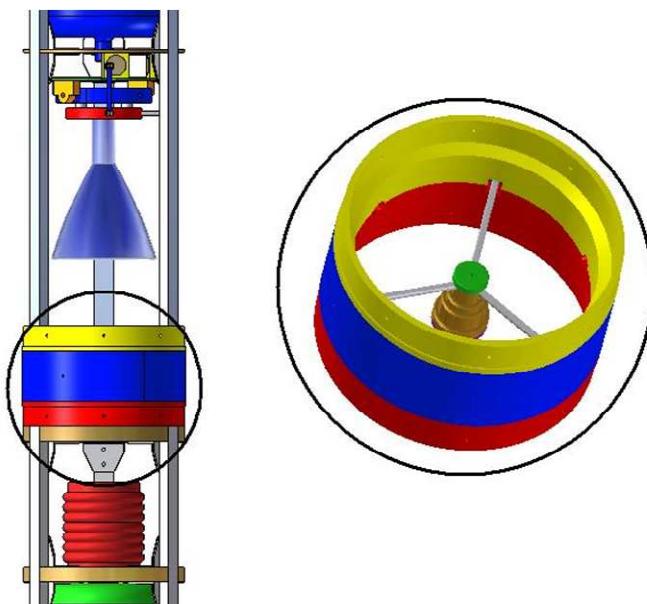


Si bien los datos arrojados por el software no son la base del análisis mecánico del proyecto, se usaron como apoyo para corroborarlos, al igual que con las pruebas de laboratorio realizadas.

12.3 REDISEÑOS EJECUTADOS

- **Distribución geométrica.** Se analizó más a fondo el concepto seleccionado, y se encontró un problema de distribución de las partes o layout, ya que debido a la disposición de los componentes, el sistema no se adaptaba correctamente a la etapa superior del cohete.

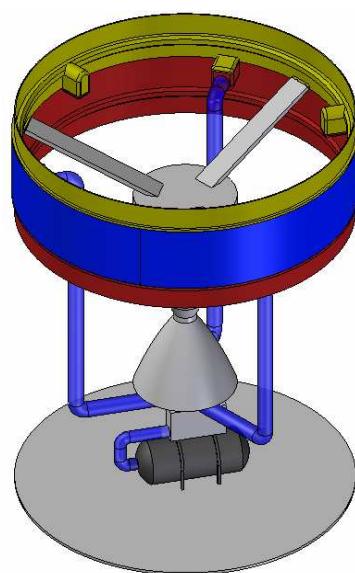
Figura 38. Sistema antes del rediseño



Como se observa en la figura 31, el sistema de separación se encuentra debajo de la tobera de la etapa superior debido a su geometría, con el almacenamiento de aire comprimido en el centro y las abrazaderas unidas al sistema a través de unos sujetadores, lo cual impide que la tobera quede ubicada dentro del sistema de separación como sería lo esperado, en razón a que luego de efectuarse la separación de las dos etapas, la etapa superior debe iniciar el proceso de ascenso por si sola, esto se hace encendiendo la segunda tobera, para lo cual esta debe tener total libertad en su movimiento.

Si se llevara a cabo la separación con esta distribución, la tobera quedaría dentro del cohete ya que la separación se haría debajo de ella, razón por la cual se reorganizaron los componentes del sistema, labor facilitada gracias a las ventajas de canalización y distribución que posee la energía neumática. El tanque de aire comprimido y la electroválvula se ubicaron debajo de la tobera, y por medio de mangueras se conduce el gas los pistones, modificando de esta forma la distribución sin variar el principio de funcionamiento.

Figura 39. Sistema rediseñado



De esta forma luego de la separación, la tobera quedará fuera del cohete y así tendrá libertad de movimiento como se requiere.

Figura 40. Cohete antes de separación



Figura 41. Instante luego de separación

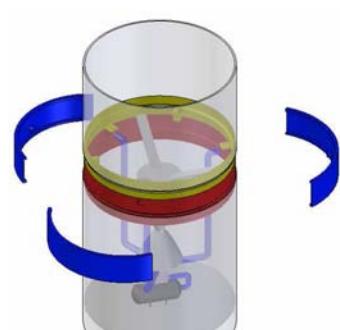
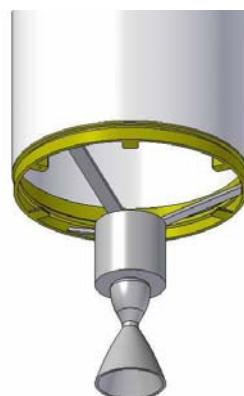
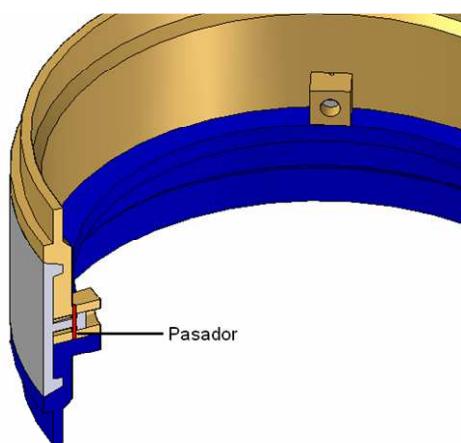


Figura 42. Tóbera libre



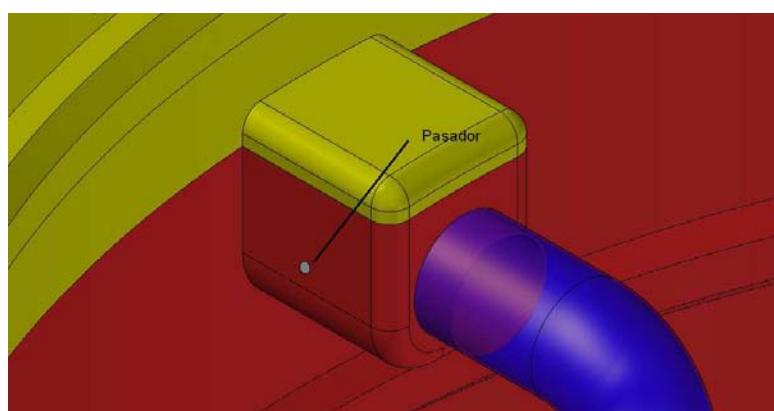
- **Reorientación del pasador.** Otro rediseño realizado a través del proceso fue la reorientación del pasador.

Figura 43. Pasador vertical



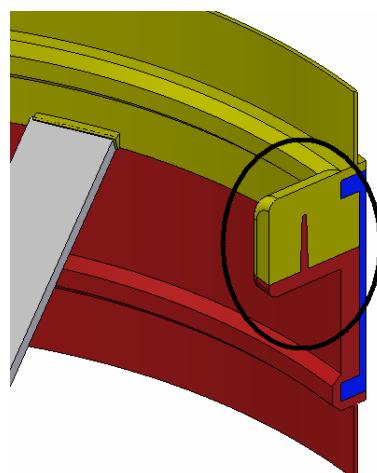
El pasador inicialmente se encontraba ubicado verticalmente, lo cual podría ocasionar que cuando el pistón rompa este pasador, pudiesen quedar esquirlas sobre el conducto por donde sale el pistón que obstaculizarían su movimiento y de esta forma se podría atascar e impedir la separación. Por esta razón en el sistema final se utiliza un pasador horizontal, disminuyendo las probabilidades de que las esquirlas queden en un lugar donde puedan obstaculizar la salida del pistón.

Figura 44. Pasador horizontal



- **Adición de pines.** Otra modificación realizada fue la adición de unos pinos que se encargan de centrar, guiar la dirección de la separación y absorber fuerzas o cargas que puedan afectar las partes fundamentales del sistema.

Figura 45. Pin



13. DISEÑO DETALLADO

13.1 CÁLCULOS FÍSICOS Y MECÁNICOS

13.1.1 Datos generales.

Peso total	1500 kg
Peso etapa I (inferior)	1000 kg
Peso etapa II (superior)	500 kg
Aceleración máx. etapa I	3 G
Aceleración máx. etapa II	5,5 - 6,8 G
Aceleración angular máx.	0,1 rad/s ²
Altura etapa I (separación)	54 km
Altura etapa II (máxima)	185 km
Diámetro cohete	0,6 m

13.1.2 Masa sistema separación.

- **Masa sistema de sujeción o abrazaderas.**

Figura 46. Perfil abrazadera



Masa sección 1 (centro)

masa = volumen * densidad
masa = $[(\pi \cdot R^2 \cdot h) - (\pi \cdot r^2 \cdot h)] \cdot \rho / 3$
masa = $(\pi \cdot h) \cdot (R^2 - r^2) \cdot \rho / 3$
masa = 0,691537 kg

Variables

R(radio >) 0,300 m
r (radio <) 0,296 m
h (altura) 0,100 m
 ρ (densidad) 2770 kg/m³
material aluminio

Masa sección 2 (cabeza 1)

masa = volumen * densidad
masa = $[(\pi \cdot R^2 \cdot h) - (\pi \cdot r^2 \cdot h)] \cdot \rho / 3$
masa = $(\pi \cdot h) \cdot (R^2 - r^2) \cdot \rho / 3$
masa = 0,237977 kg

Variables

R(radio >) 0,300 m
r (radio <) 0,286 m
h (altura) 0,010 m
 ρ (densidad) 2770 kg/m³
material aluminio

Masa sección 3 (cabeza 2)

masa = 0,237977 kg

Masa sección 4 (vástago)

masa = volumen * densidad
masa = $\pi \cdot r^2 \cdot l \cdot \rho$
masa = 0,004351 kg

Variables

r (radio) 0,005 m
l (longitud) 0,020 m
 ρ (densidad) 2770 kg/m³
material aluminio

Masa sección 5 (pistón)

masa = volumen * densidad
masa = $\pi \cdot r^2 \cdot l \cdot \rho$
masa = 0,020396 kg

Variables

r (radio) 0,013 m
l (longitud) 0,015 m
 ρ (densidad) 2770 kg/m³
material aluminio

Masa total de una abrazadera

masa total = s1+ s2 + s3 + s4 + s5
abrazadera

masa total = 1,192238 kg
abrazadera

Masa total sistema sujeción

masa total = masa total abrazadera * 3
sis. sujeción

masa total = 3,576715 kg
sis. sujeción

Masa total sistema separación

masa total = m abrazaderas + m tanque + m mangueras + m válvula
sis. separación

masa total = 3,576 kg + 0,736 kg + 0,030 kg + 0,125 kg
sis. separación

masa total = 4,467 kg
sis. separación

13.1.3 Fuerzas externas sobre sistema de separación.

Fuerza etapa I

Variables

$$\text{fuerza 1} = \text{masa etapa I} * 3 * \text{gravedad}$$

$$\begin{aligned} m_1 &= 1000 \text{ kg} \\ g &= 9,814 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

$$\text{fuerza 1} = m_1 * 3g$$

$$\text{fuerza 1} = 29442 \text{ N}$$

Fuerza etapa II

Variables

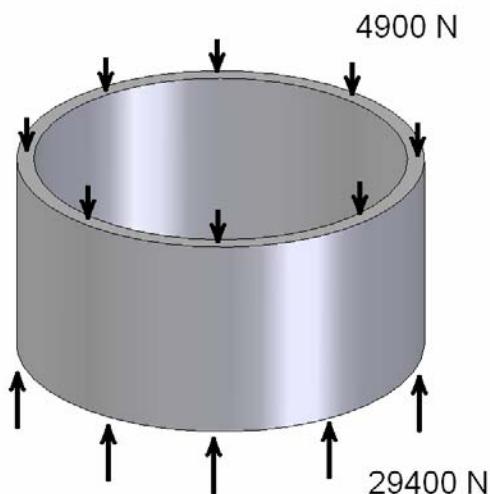
$$\text{fuerza 2} = \text{masa etapa II} * \text{gravedad}$$

$$\begin{aligned} m_2 &= 500 \text{ kg} \\ g &= 9,814 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

$$\text{fuerza 2} = m_2 * g$$

$$\text{fuerza 2} = 4907 \text{ N}$$

Figura 47. Fuerzas sobre sistema de separación



13.1.4 Esfuerzo cara superior del sistema de separación.

Área cara superior

Variables

$$\text{área} = \text{área mayor} - \text{área menor}$$

$$R(\text{radio} >) \ 0,300 \text{ m}$$

$$\text{área} = [(\pi^* R^2) - (\pi^* r^2)]$$

$$\text{área} = 0,0257 \text{ m}^2$$

Esfuerzo cara superior

Variables

$$\text{esfuerzo} = \text{fuerza} / \text{área}$$

$$f2 \text{ (fuerza 2)} \ 4907 \text{ N}$$

$$\text{esfuerzo} = f2 / a$$

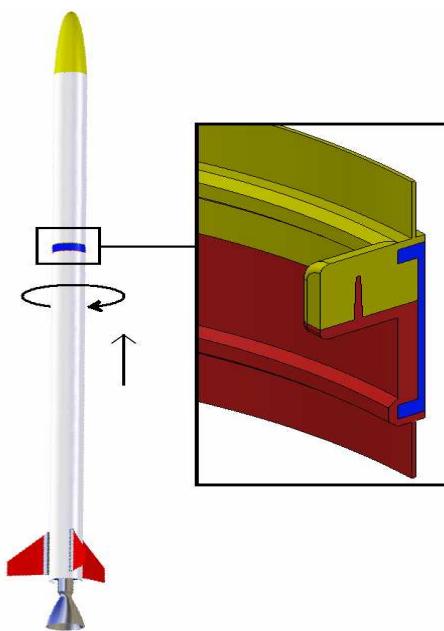
$$a \text{ (área)} \ 0,0257 \text{ m}^2$$

$$\text{esfuerzo} = 190388 \text{ Pa}$$

Resistencia última aluminio = 310 MPa > Esfuerzo cara superior

13.1.5 Esfuerzo cortante sobre un pin.

Figura 48. Torque etapa inferior



Momento inercia etapa I

$$\text{momento} = \text{masa} * (\text{Radio}^2 + \text{radio}^2) / 2$$

inercia (I)

$$\text{momento} = m_1 * (R^2 + r^2) / 2$$

inercia (I)

$$\text{momento} = 88,513 \quad \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

inercia (I)

Variables

$$R(\text{radio} >) \quad 0,300 \quad \text{m}$$

$$r(\text{radio} <) \quad 0,295 \quad \text{m}$$

$$m_1(\text{masa} 1) \quad 1000 \quad \text{kg}$$

Torque etapa I

$$\text{torque} (T) = M \cdot \text{inercia} * \text{aceleración angular}$$

$$\text{torque} (T) = I * \alpha$$

$$\text{torque} (T) = 8,8512 \quad \text{N}$$

Variables

$$I(\text{M. inerc.}) \quad 88,513 \quad \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\alpha(\text{a. ang.}) \quad 0,100 \quad \text{rad/s}^2$$

Área corte

$$\text{área corte} = \pi * (\text{radio pin})^2$$

$$\text{área corte} = \pi * r^2$$

$$\text{área corte} = 1,73E-05 \quad \text{m}^2$$

Variables

$$r(\text{radio pin}) \quad 0,0024 \quad \text{m}$$

Esfuerzo cortante pin

$$\text{esfuerzo} = \text{fuerza} / \text{área corte}$$

cortante

$$\text{esfuerzo} = T / a$$

cortante

$$\text{esfuerzo} = 510173,6 \quad \text{Pa}$$

cortante

Variables

$$T(\text{torque}) \quad 8,8512 \quad \text{N}$$

$$a(\text{área corte}) \quad 1,7E-5 \quad \text{m}^2$$

Resistencia a cortante aluminio = 207 MPa > Esfuerzo cortante pin

13.1.6 Fuerzas sobre pasador antes de la separación.

Peso abrazadera sobre pasador	Variables
fuerza = masa abrazadera * 3 * gravedad	m (masa) 1.1922 kg g 9,814 m/s ²
fuerza = m * g	
fuerza = 35,10188 N	

13.1.7 Presión neta sistema neumático.

Volumen tanque	Variables
volumen = $\pi * radio^2 * altura tanque$	r (radio) 0,04 m h (altura) 0,2 m
volumen = $\pi * r^2 * h$	
volumen = 0,00100531 m ³	
Volumen manguera	Variables
volumen = $\pi * radio^2 * longitud manguera$	r (radio) 0,004 m l (longitud) 0,6 m
volumen = $\pi * r^2 * h * l$	
volumen = 3,02E-05 m ³	
volumen 3 = 9,05E-05 m ³	
mangueras	

Caída de presión del tanque	Variables
caída = (vol. manguera / vol. tanque) * 100	vm 9,05E-5 m ³ presión vt 0,001 m ³
caída = (vm / vt) *100	
caída = 9 %	

Presión neta sistema neumático	Variables
presión = p tanque - (9% * p tanque) neta	pt 16 bar
presión = pt - (9% * pt) neta	
presión = 14,56 bar neta	
presión = 1456000 Pa neta	

13.1.8 Resistencia viento.

Área choque abrazadera	Variables
área choque = 2 * π * radio cohete * altura / 3	r (radio) 0,3 m
área choque = 2 * π * r * h / 3	h (altura) 0,12 m
área choque = 0,075398 m ²	

Resistencia viento	Variables
resistencia = Cx * 1/2 ρ * velocidad ² * área viento	ρ(densidad) 0,01 kg/m ³
resistencia = Cx * 1/2 ρ * v ² * a viento	v (velocidad) 5 m/s
resistencia = 0,009425 N	a (a choque) 0,07 m ² Cx (coef. penetración aerodinámica)

13.1.9 Rozamiento sin lubricante.

Fuerza normal abrazadera	Variables
normal = masa abrazadera * 3 * gravedad	m (masa) 1,1922 kg g 9,814 m/s ²
normal = m * 3 g	
normal = 35,10188 N	

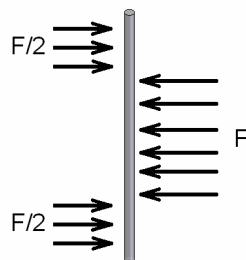
Fuerza rozamiento estático	Variables
Fuerza rozamiento estático = coef. roz. * normal	N (normal) 1,1922 N μ (coef. roz) 0,6 estático Al-Al)
$F_e = \mu * N$	
$F_e = 21,061$ N	

13.1.10 Rozamiento con lubricante.

Fuerza rozamiento estático	Variables
$F'_e = F_e \sin \text{lubricante} * \text{coeficiente lubricante}$	$F_e \sin \text{lubr.}$ 21,061 N Coef. lubr. 0,1
$F'_e = 2,1061$ N	

13.1.11 Esfuerzo cortante sobre un pasador.

Figura 49. Fuerzas sobre pasador



Área presión sobre pistón

$$\text{área presión} = \pi * (\text{radio pistón})^2$$

Variables

$$r (\text{r pistón}) \quad 0,0125 \text{ m}$$

$$\text{área presión} = \pi * r^2$$

$$\text{área presión} = 0,00049 \text{ m}^2$$

Fuerza neumática

$$\text{fuerza} = \text{presión} * \text{área}$$

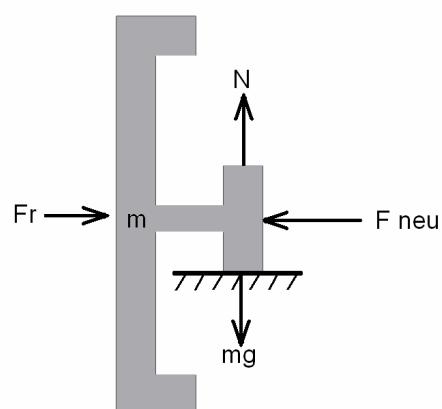
Variables

$$\begin{aligned} p (\text{presión}) & 1600000 \text{ Pa} \\ a (\text{área}) & 0,00049 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{fuerza} = p * a$$

$$\text{fuerza} = 785,4 \text{ N}$$

Figura 50. Fuerzas sobre abrazadera



Fuerza neta sobre pasador	Variables
fuerza neta = f. neumática - f. rozamiento - resistencia viento	fn 714,714 N fr 2,10611 N r 0,00942 N
fuerza neta = fn - fr - r	
fuerza neta = 712,6 N	
Fuerza corte pasador	Variables
fuerza corte = fuerza pistón / 2 pasador	f (f. pistón) 712,6 N
fuerza corte = f / a pasador	
fuerza corte = 356,3 N pasador	
Área corte pasador	Variables
área corte = 2 * π * (radio pasador) ²	r(r pasador) 0,0005 m
área corte = 2 * π * r ²	
área corte = 1,57E-06 m ²	
Esfuerzo cortante pasador	Variables
esfuerzo = fuerza / área corte cortante	f (fuerza) 356,3 N a (área corte) 1,5E-6 m ²
esfuerzo = f / a cortante	
esfuerzo = 227 MPa cortante	
Resistencia a cortante aluminio = 207 MPa < Esfuerzo cortante pasador	

13.1.12 Volumen de trabajo del sistema de separación.

Volumen de trabajo sistema de separación	Variables
volumen = $\pi * (\text{radio cohete})^2 * \text{altura}$	r (radio) 0,3 m
	h (altura) 0,774 m
volumen = $\pi * r^2 * h$	
volumen = 0,218844 m ³	

13.2 PRUEBAS DE LABORATORIO

Para reforzar y corroborar algunos de los cálculos realizados, se hicieron dos pruebas en el 'laboratorio de ingeniería mecánica' de la universidad:

- Prueba de corte simple
- Prueba de corte doble

La máquina implementada en ambas pruebas, utiliza presión neumática para realizar los cortes sobre las probetas, y requiere del accionamiento manual de un gato para su funcionamiento. La lectura de la presión a la cual se produce el corte se da en unidades psi, y la arroja uno de los dos manómetros que se aprecia en la figura 36.

Figura 51. Máquina de presión



La máquina de presión responde a la siguiente fórmula para calcular la fuerza producida por el actuador, debido a que este tiene un área de aplicación constante, donde la variable x corresponde a la presión dada por el manómetro en unidades psi, y la variable y a la fuerza equivalente en newtons.

$$y = 7,7967x + 35,811$$

13.2.1 Prueba de corte simple. En la prueba de corte simple, se efectúa un sólo corte sobre la probeta, lo que simula el corte producido sobre los pines centradores del sistema de separación. El esfuerzo al que se encuentran sometidos estos pines, se debe a que el cohete gira sobre su mismo eje, este efecto busca mejorar la dirección de vuelo, pero causa un esfuerzo cortante sobre los pines, ya que cuando la etapa inferior gira, la etapa superior se opone a este movimiento. El esfuerzo que soportan los pines esta dado por:

- Esfuerzo = Torsión / área cortante
- Torsión = I / aceleración angular
- Donde I es el momento de inercia de un cilindro hueco:

$$I = m * (R^2 + r^2) / 2$$

El resultado del esfuerzo sobre el área cortante del pin debe ser menor que el esfuerzo último a cortante del material, para que soporte satisfactoriamente las cargas a las que esta sometido.

➤ **Procedimiento de laboratorio.**

- Alistar dispositivo de corte simple y probeta.
- Remachar la probeta en el dispositivo.

Figura 52. Dispositivo de corte simple



Figura 53. Dispositivo de corte - vista lateral



- Ajustar dispositivo en la máquina de presión.

Figura 54. Dispositivo de corte montado



- Accionar la máquina hasta que se rompa la probeta.

Figura 55. Ruptura del pin



- Registrar lectura en el manómetro.

Figura 56. Manómetro



➤ **Datos arrojados.**

Tabla 13. Probeta para corte simple

Probeta para corte simple	
Material	Acero 1020
Radio	2,35 mm
Presión de corte	800 psi

➤ **Cálculos.**

Fuerza

$$y = 7,7967x + 35,811$$

$$y = 6273,2 \quad N$$

Variables

x: presión 800 psi
y: fuerza N

Área corte

$$\text{área corte} = \pi * (\text{radio pin})^2$$

$$\text{área corte} = \pi * r^2$$

$$\text{área corte} = 1,73E-05 \quad m^2$$

Variables

r (radio pin) 0,0024 m

Esfuerzo cortante pin	Variables
esfuerzo = fuerza / área corte cortante	f (fuerza) 6273,2 N a (área corte) 1,7E-5 m ²

$$\text{esfuerzo} = f / a$$

cortante

$$\text{esfuerzo} = 361576763,7 \text{ Pa}$$

cortante

$$\begin{aligned}\text{Resistencia a cortante teórica acero 1020} &= 0,82 * S_u \\ &= 0,82 * 393000000 \text{ Pa} \\ &= 322260000 \text{ Pa}\end{aligned}$$

$$\text{Resistencia a cortante práctica acero 1020} = 361576763 \text{ Pa}$$

13.2.2 Prueba de corte doble. En la prueba de corte doble, se efectúan cortes en dos puntos de la probeta, lo que simula el corte producido sobre el pasador que mantiene unidas las abrazaderas. El esfuerzo al que se someten los pasadores, se debe a la fuerza generada por la presión neumática con que se quiere romper el pasador. El esfuerzo que soportan los pasadores está dado por:

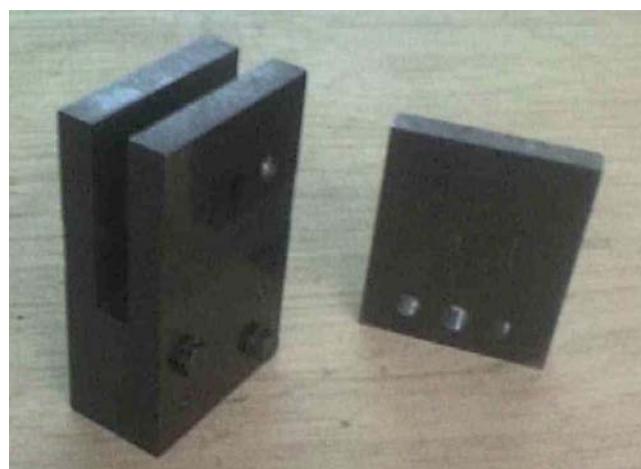
- Esfuerzo = fuerza / (2*área cortante)

El resultado del esfuerzo sobre el área cortante del pasador debe ser mayor que el esfuerzo último a cortante del material, para que se pueda romper con las cargas a las que está sometido.

➤ **Procedimiento de laboratorio.**

- Alistar dispositivo de corte doble y probeta.

Figura 57. Dispositivo de corte doble



- Ajustar la probeta en el dispositivo.

Figura 58. Probeta en dispositivo de corte



- Ajustar dispositivo en la máquina de presión.
- Accionar la máquina hasta que se rompa la probeta.

Figura 59. Probeta cortada



- Registrar lectura en el manómetro.

➤ **Datos arrojados.**

Tabla 13. Probeta para corte doble

Probeta para corte doble	
Material	Aluminio 6061
Radio	3,85 mm
Presión de corte	3400 psi

➤ **Cálculos.**

Fuerza

$$y = 7,7967x + 35,811$$

$$y = 6273,2 \quad N$$

Variables

x: presión 800 psi
y: fuerza N

Área corte pasador

$$\text{área corte} = 2 * \pi * (\text{radio pasador})^2$$

$$\text{área corte} = 2 * \pi * r^2$$

$$\text{área corte} = 9,3 E-06 \quad m^2$$

Variables

r(r pasador) 0,00385 m

Esfuerzo cortante pasador**Variables**

$$\text{esfuerzo} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área corte}}$$

cortante

$$\begin{aligned} f &(\text{fuerza}) & 6273,2 \text{ N} \\ a &(\text{área corte}) & 9,3E-6 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{esfuerzo} = \frac{f}{a}$$

cortante

$$\text{esfuerzo} = \frac{142509462}{\text{cortante}} \text{ Pa}$$

Resistencia a cortante teórica aluminio 6061 = 207000000 Pa

Resistencia a cortante práctica aluminio 6061 = 142509462 Pa

13.3 SELECCIÓN DE MATERIALES

- **Aluminio.** El aluminio es utilizado en la mayor parte del sistema de separación: en la etapa superior, etapa inferior, soportes o abrazaderas y en el pasador. Este material fue seleccionado por sus excelentes propiedades, como su baja densidad, alta resistencia mecánica, facilidad de adquisición y por que es relativamente barato. A continuación se muestran algunas propiedades del aluminio:

Tabla 14. Propiedades del aluminio

Densidad	2,70 g/cm ³ a 20 °C
Punto de fusión	933,47 K (660 °C)
Punto de ebullición	2792 K
Módulo de elasticidad	6.700 kg / mm ²
Tracción	16 a 20 kg / mm ²

- **Acero.** Este material se utilizó en una de las pruebas de laboratorio, para seleccionar el material adecuado de los pinos, y cuyos resultados ayudaron a comprobar que con los pinos manufacturados con aluminio, bastaba para soportar las fuerzas a las que estarían sometidos, ya que aunque los pinos de acero soportan muy por encima dichas cargas, comparándolo con el aluminio, que de igual forma lo hace, el acero es más pesado y agregaría material diferente al de la mayoría de las piezas, razones de peso para seleccionar como material para los pinos el aluminio. A continuación se muestran algunas propiedades del acero:

Tabla 15. Propiedades del acero

Densidad	7,9 g/cm3 a 20 °C
Punto de fusión	1400 - 1455 °C
Alargamiento	< 50%
Dureza brinell	170
Módulo de elasticidad	190-210 GPa
Resistencia a la tracción	530-1200 MPa

14. CONCLUSIONES

- Se diseñó un sistema de separación de dos etapas de un cohete.
- Se hizo uso de criterios de ingeniería relacionados con mecánica, electrónica.
- Se diseñó un sistema robusto capaz de soportar las condiciones ambientales que se prevén durante su periodo de uso.
- La mayoría de los diseños en ingeniería son rediseños de sistemas ya existentes, ya sea que su tecnología este disponible en el mercado o en la naturaleza.
- Cuando se está diseñando un sistema que haga parte de un proyecto de tipo aeroespacial, es decir, que requiere de una gran inversión económica, tecnológica y que no es muy comercial, es difícil encontrar diseños establecidos, disponibles que sirvan como referencia.
- Siguiendo un proceso de diseño estructurado como el utilizado en este proyecto, es posible transformar los requerimientos del cliente en un producto que cumpla con todas sus expectativas, ya que a través de este es posible llevar los requerimientos del cliente a lo largo del diseño y realimentarlos constantemente.
- Con una metodología de diseño apropiada, los integrantes del equipo de diseño estarán al tanto de los aspectos más importantes del producto que permiten tomar decisiones importantes para el resultado del proyecto, y futuras modificaciones.
- Para determinar el tipo de energía a seleccionar para el sistema, se tuvieron en cuenta las condiciones a las que estaría sometido, ya que es un sistema que funcionará en un medio poco favorable para este, debido a que enfrentará condiciones críticas, como grandes cambios en la temperatura en tiempos cortos, así como grandes fuerzas de muchos tipos, entre otras; todo esto, además de tomar en cuenta el no poner en riesgo la integridad del mismo cohete.
- El uso de la energía neumática hizo posible algunas modificaciones que con otra clase de sistemas habría sido más difícil, gracias a la versatilidad del gas.

BIBLIOGRAFÍA

ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. 4 ed. México: Thomson Learning Ibero. 2004. 556 p.

BEER, Ferdinand; RUSEEL, E. Mecánica vectorial para ingenieros: Estática. 6 ed. Madrid: McGraw-Hill, 1997. 738 p.

KALPAKJIAN, Serope; SCHMID Steven R. Manufactura: Ingeniería y Tecnología. 4 ed. México: Pearson Educación, 2002. 1199 p.

MOTT, Robert L. Resistencia de materiales aplicada. 3 ed. México: Prentice Hall, 1996. 640 p.

NORTON, Robert L. Diseño de máquinas. México: Prentice Hall, 1999. 1048 p.

SERWAY Raymond A. Física para ciencias e ingeniería: tomo I. 5 ed. México: Mc-Graw Hill, 2002. 644 p.

ULRICH, Karl; EPPINGER, Steven. Desarrollo y diseño de productos: enfoque multidisciplinario. 3 ed. México: McGraw-Hill, 2004. 366 p.

ANEXOS

Anexo 1. Documentación neumática

- **Tanque: Depósito de aire CRVZS - 0,75 (FESTO)**

Figura 60. Deposito de aire



- **Especificaciones técnicas:**

Figura 61. Dimensiones depósito de aire

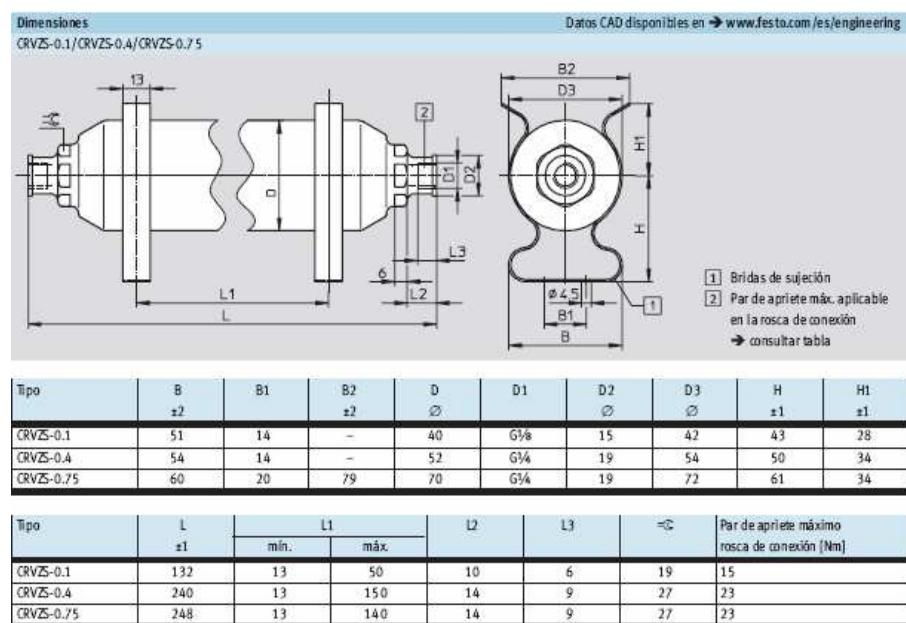


Tabla 16. Especificaciones técnicas depósito de aire

Volumen	0.75 l
Peso	736 g
Medio de funcionamiento	Aire comprimido filtrado, con o sin lubricación Nitrógeno
Temperatura del fluido	-10...+ 100º C
Temperatura ambiente	-10...+ 100º C
Presión funcionamiento PS	-0,95...16 bar
Presión de prueba PT	24 bar
Presión diferencial de funcionamiento máx. a 100º C (límite de resistencia)	13,5 bar
Fugas q_{nN}	0,0001 l/h
Límite de resistencia durante el vacío $\Delta p_{rel.}$	-0,95 bar
Tipo de fijación	Con bridales de sujeción
Grueso del cuerpo ea [mm]	2,0
Conexión roscada	G1/4
Par de apriete máx. permitido	23 Nm
Posición de montaje	Cualquier posición
Materiales:	
Cuerpo	Acero inoxidable
Bridas de fijación	Acero inoxidable

- Distribuidor: racor múltiple Quick Star QSLV3 (FESTO)

Figura 62. Distribuidor



- Especificaciones técnicas:

Figura 63. Dimensiones distribuidor

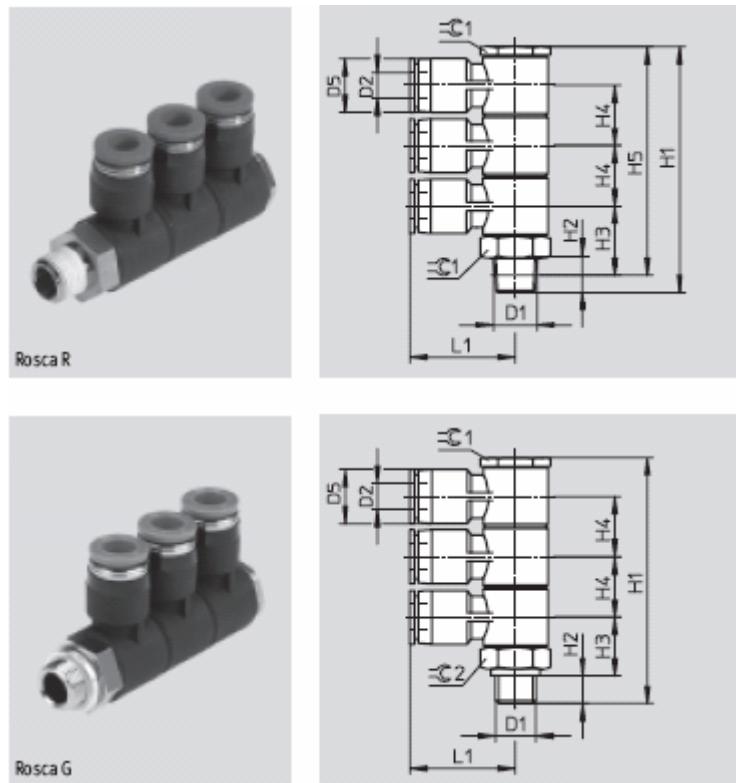


Tabla 17. Especificaciones técnicas distribuidor

Dimensiones y referencias														PE*	
Conexión	Diámetro nominal [mm]	Para tubo de diámetro exterior D2	D5 ∅	H1	H2	H3	H4	H5	L1	=C1	=C2	Peso/unidad [g]	Nº de art.	Tipo	
Rosca R															
R $\frac{1}{8}$	2,4	4		10	57,4	8	16,1	14	53,4	22,2	14	-	38	153 221	QSLV3-1/8-4
	3,5	6		12,5	57,4	8	16,1	14	53,4	24,2	14	-	41	153 222	QSLV3-1/8-6
	4,3	8		14,5	61,3	8	17,6	15	57,3	28,2	17	-	63	153 224	QSLV3-1/8-8
R $\frac{1}{4}$	3,5	6		12,5	60,4	11	17,1	14	54,4	24,2	14	-	44	153 223	QSLV3-1/4-6
	4,4	8		14,5	64,3	11	18,5	15	58,3	28,2	17	-	66	153 225	QSLV3-1/4-8
	5,3	10		18	75,8	11	22	18	69,8	32,5	22	-	114	153 227	QSLV3-1/4-10
R $\frac{3}{8}$	4,4	8		14,5	65,3	12	19,2	15	59	28,2	17	-	70	153 226	QSLV3-3/8-8
	5,4	10		18	76,8	15	22,7	18	70,5	32,5	22	-	120	153 228	QSLV3-3/8-10
	6,2	12		21	89,5	12	27,3	21	83,2	38,2	27	-	188	153 229	QSLV3-3/8-12
R $\frac{1}{2}$	6,3	12		21	92,5	15	28,4	21	84,3	38,2	27	-	196	153 230	QSLV3-1/2-12
Rosca G con anillo de junta															
G $\frac{1}{8}$	2,4	4		10	56,2	5,1	13,9	14	-	22,2	14	14	38	186 233	QSLV3-G1/8-4
	3,5	6		12,5	56,2	5,1	13,9	14	-	24,2	14	14	40	186 234	QSLV3-G1/8-6
	4,3	8		14,5	59,2	5,1	15,4	15	-	28,2	17	17	62	186 236	QSLV3-G1/8-8
G $\frac{1}{4}$	3,5	6		12,5	57,7	5,6	14,4	14	-	24,2	14	17	49	186 235	QSLV3-G1/4-6
	4,4	8		14,5	59,7	5,6	15,4	15	-	28,2	17	17	63	186 237	QSLV3-G1/4-8
	4,3	10		18	68,2	5,6	18,9	18	-	32,5	22	22	112	186 239	QSLV3-G1/4-10
G $\frac{3}{8}$	4,4	8		14,5	61,2	6,6	15,9	15	-	28,2	17	19	102	186 238	QSLV3-G3/8-8
	5,4	10		18	69,7	6,6	19,4	18	-	32,5	22	22	117	186 240	QSLV3-G3/8-10
	6,2	12		21	79,3	6,6	23,9	21	-	38,2	27	27	154	186 241	QSLV3-G3/8-12
G $\frac{1}{2}$	6,3	12		21	80,3	7,6	23,9	21	-	38,2	27	27	188	186 242	QSLV3-G1/2-12

- **Mangueras: Tubo flexible de material sintético PP (FESTO)**

Figura 64. Manguera



- **Especificaciones técnicas:**

Figura 65. Especificaciones técnicas manguera

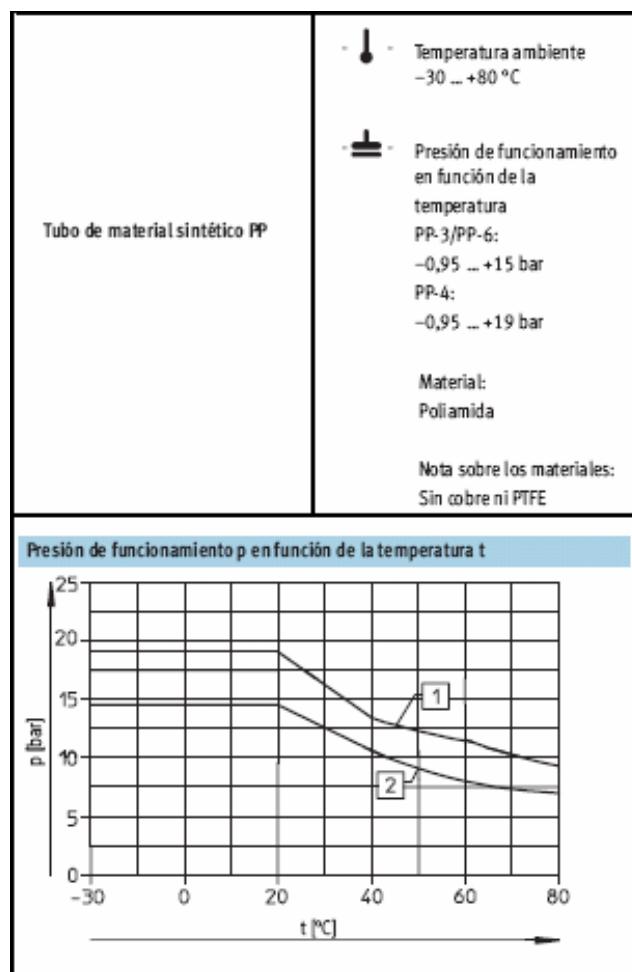


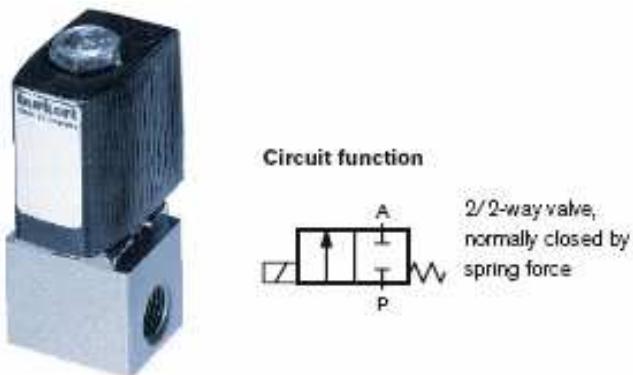
Tabla 18. Especificaciones técnicas manguera

Dimensiones y referencias							
Diámetro exterior [mm]	Diámetro interior [mm]	Radio de curvatura mín. [mm]	Radio de curvatura relevante para el caudal [mm]	Peso [kg/m]	Color	Nº de artículo	Tipo
							PE*
4	2,9	12	18	0,0062	Natural	4 572	PP-3-NT
6	4	14	32	0,0163	Natural	4 231	PP-4-NT
8	5,9	22	43	0,0238	Natural	4 191	PP-6-NT

* Unidad de embalaje

- **Electroválvula: 2/2-vías válvula miniatura solenoide (BURKERT)**

Figura 66. Electroválvula



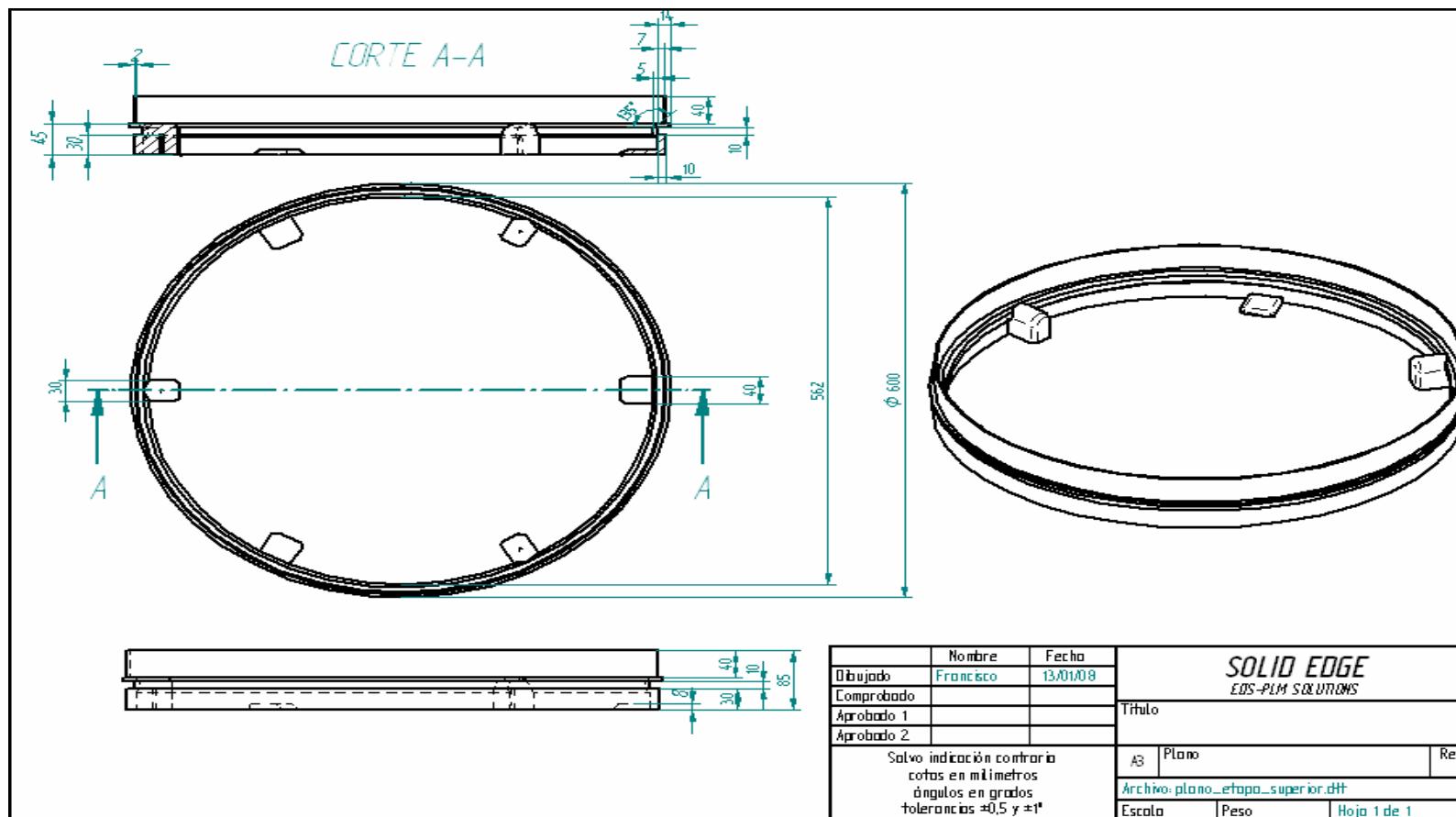
- **Especificaciones técnicas:**

Tabla 19. Especificaciones técnicas electroválvula

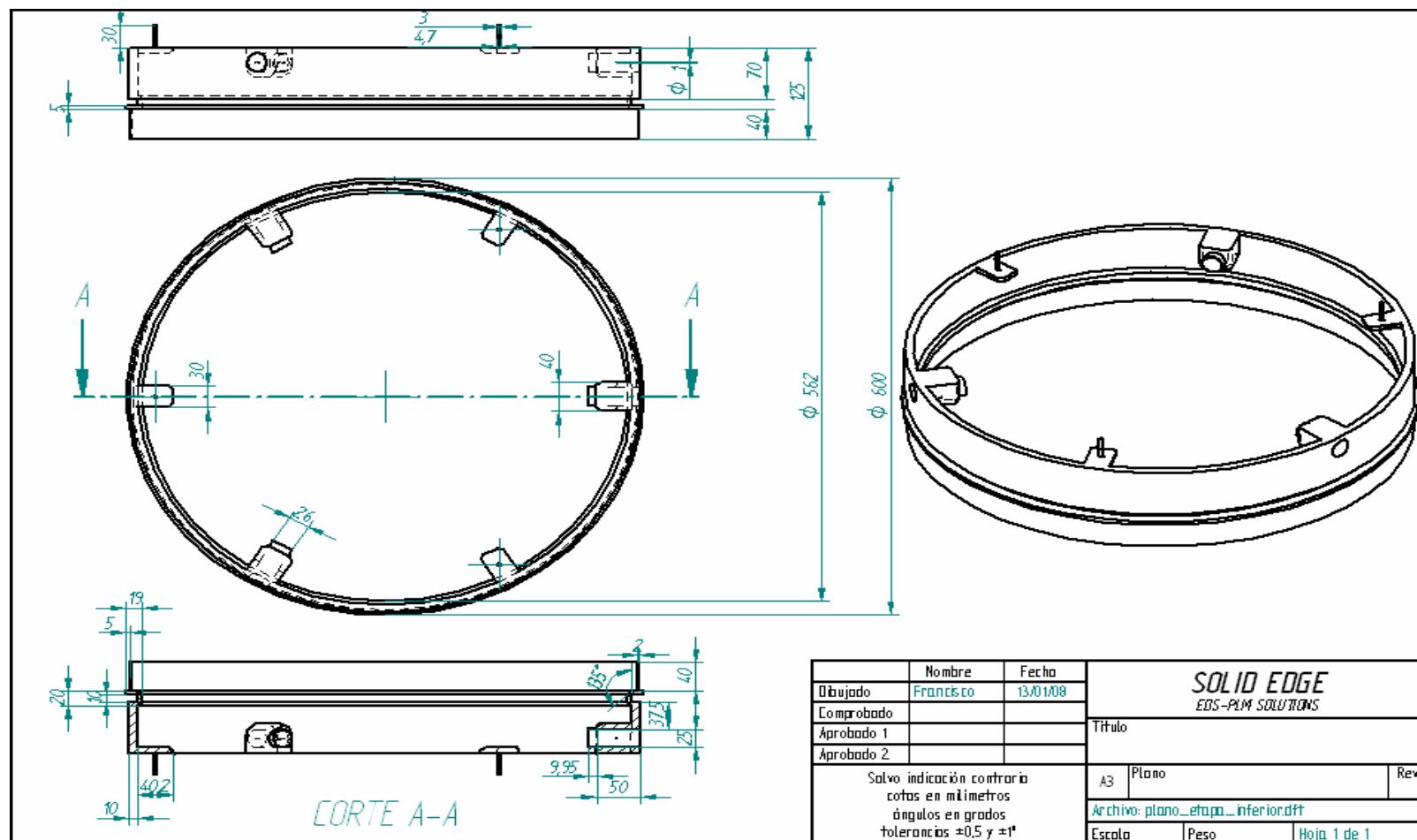
Technical data	
Body material	
Type 6011	brass, polyamide (PA),
Type 6011 A	brass, stainless steel 1.4305
Sealing material	FKM
Analytical version (Typ 6011 A)	version free from silicones, oil and grease leaktightness better than 10^{-4} mbar l/s
Limit value for remainder carbon (Type 6011 A)	< 0,2 mg/dm ²
Medium	<ul style="list-style-type: none"> ▪ technical vacuum ▪ neutral gases and fluids (e.g. compressed air, ▪ neutral/aggressive media that do not attack the body and seal materials
Medium temperature	-10 ... +100 °C
Ambient temperature	max. +55 °C
Viscosity	max. 21 mm ² /s
Port connection	
Type 6011	M5, G1/8, sub-base
Type 6011 A	G1/8, sub-base
Betriebsspannung	
Typ 6011	24 V DC, 24 W/50 Hz, 110 / 230 V / 50 Hz
Typ 6011 A	24 V DC, 230 V / 50 Hz
Voltage tolerance	± 10%
Duty cycle/single valve when mounted as a block on a manifold	100 % continuous rating Intermittent operation 60 % (30 min) or with 2 W coil (on request)
Electrical connection	<ul style="list-style-type: none"> ▪ to DIN EN 175301-803* Form C for cable plug Type 2506 (see Ordering chart for Accessories) ▪ Form B (industrial standard) for Type 2507 (see Ordering chart for Accessories)
Installation	as required, preferably with actuator upright
Installation	no oil, grease or silicones to be used as installation aids
Mass	ca. 125 g
Protection class	IP65 with cable plug

Anexo 2. Planos mecánicos

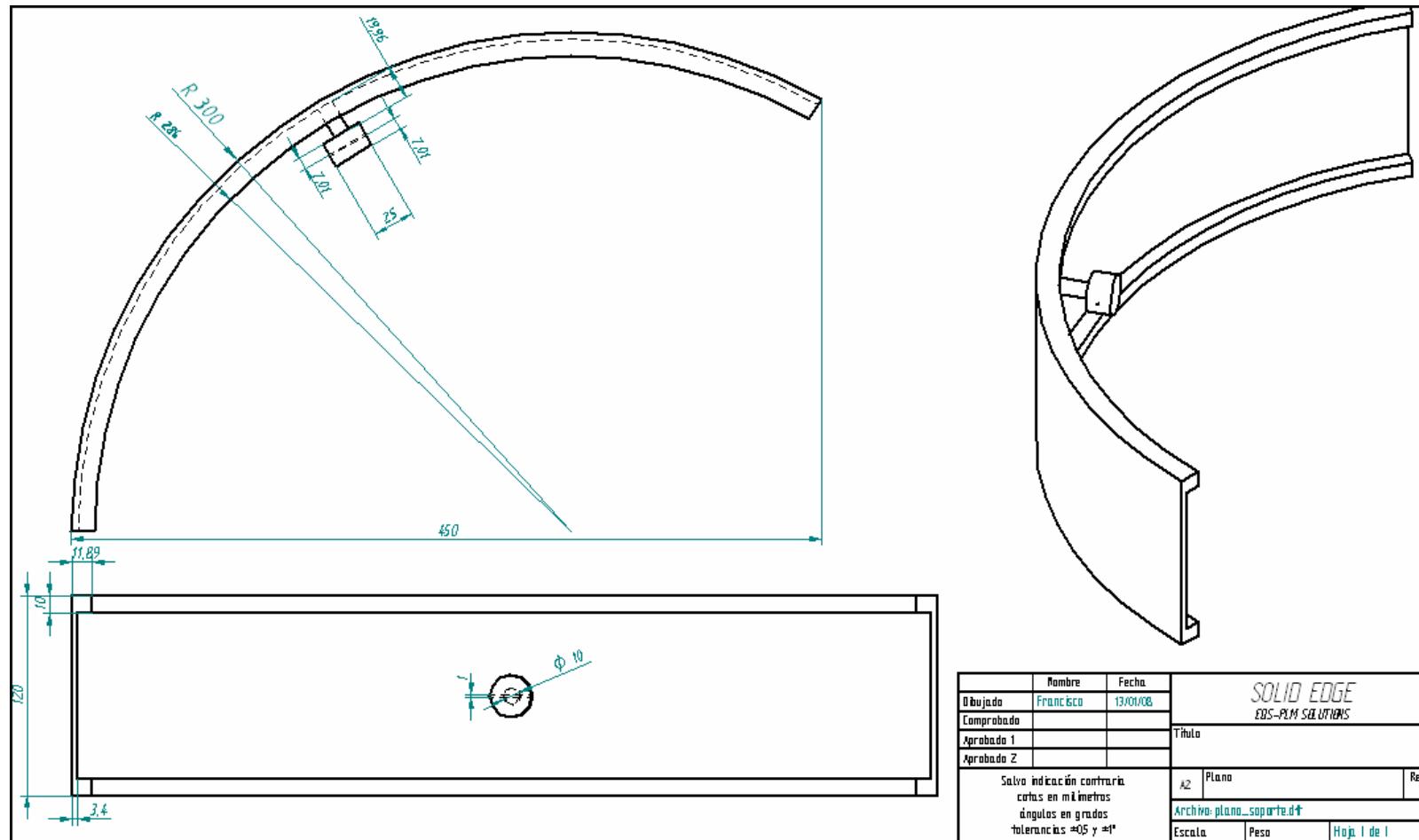
- Plano etapa superior



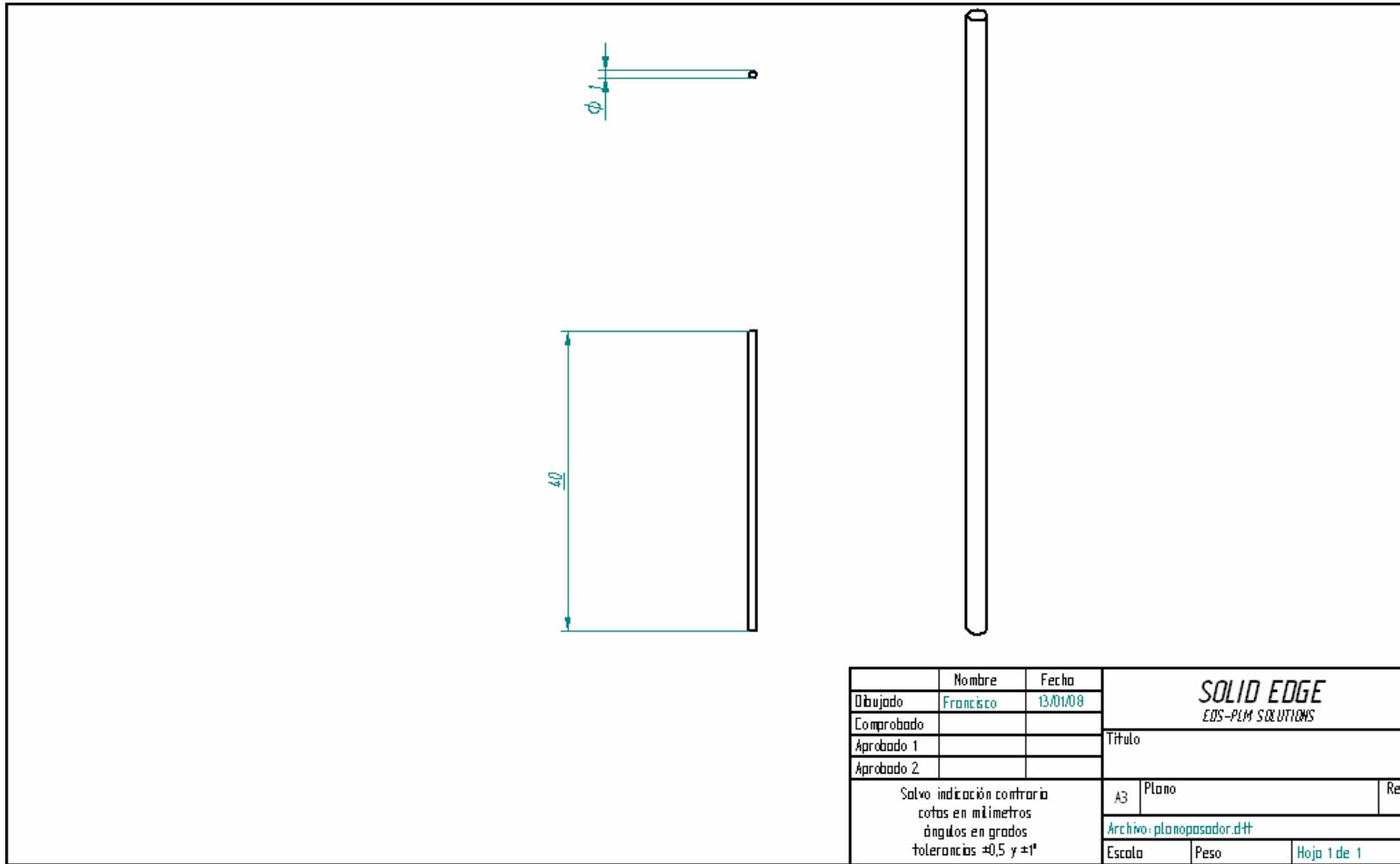
- Plano etapa inferior.



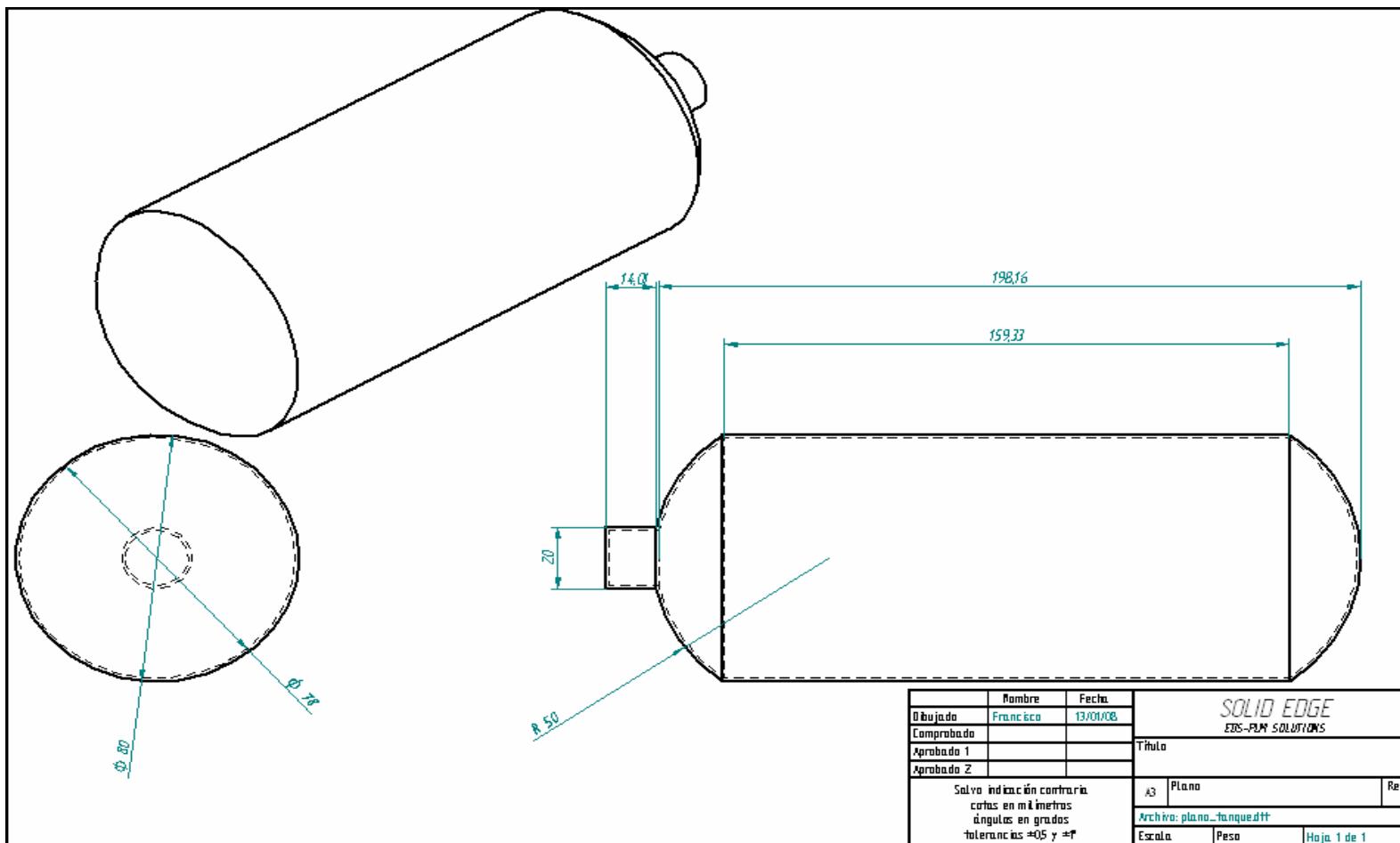
- Plano abrazadera.



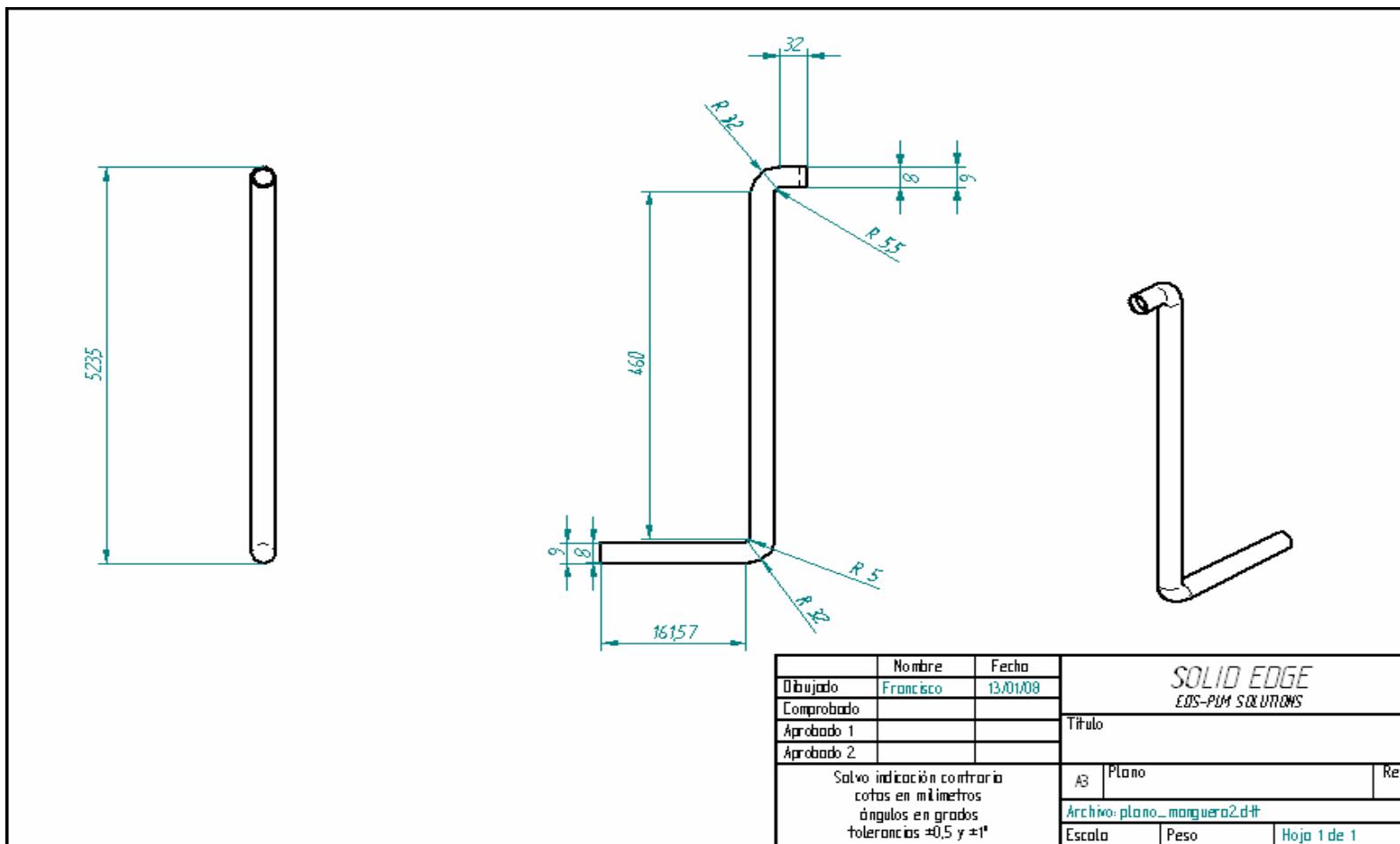
- Plano pasador.



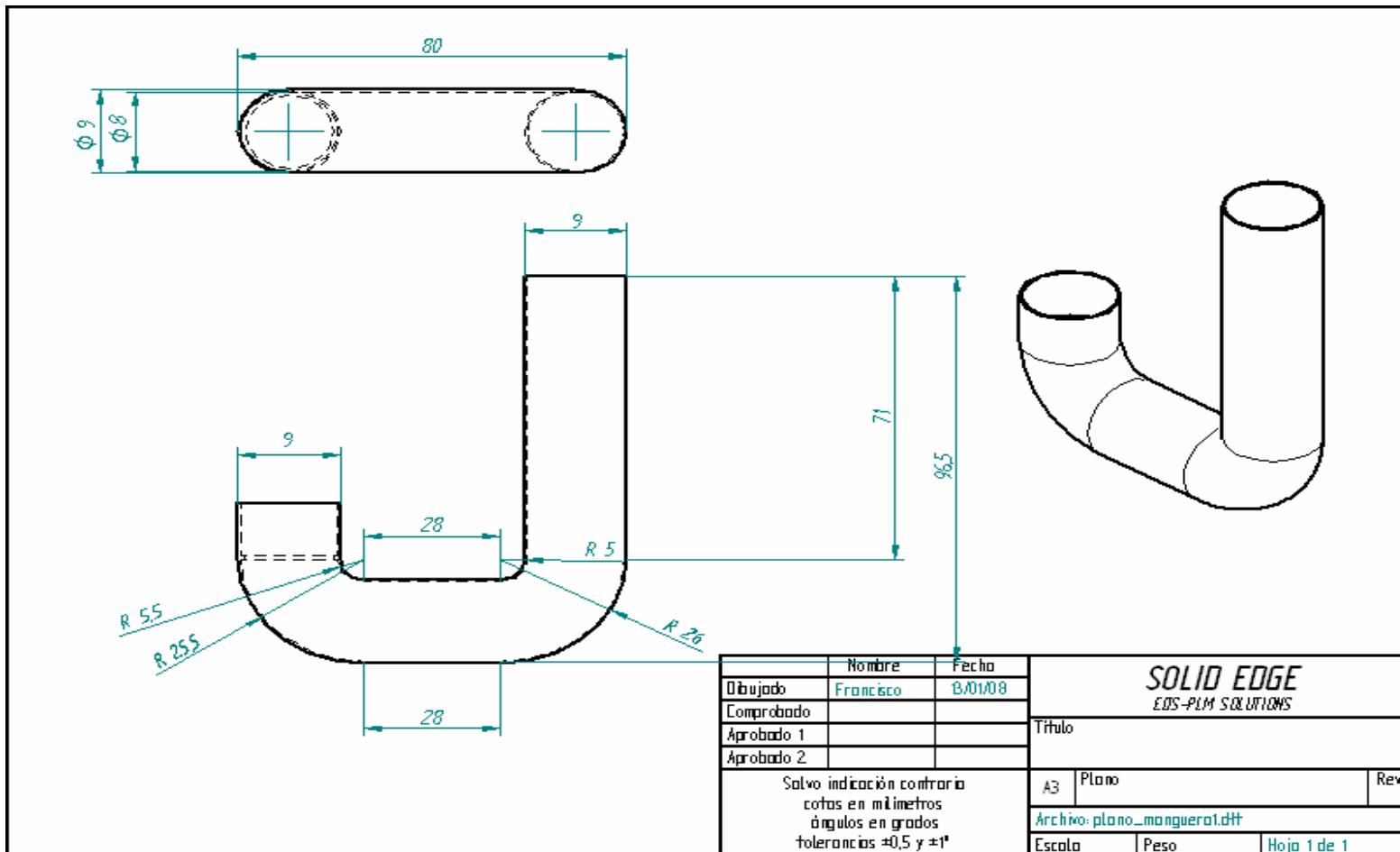
- Plano tanque.



- Plano manguera 1.



- Plano manguera 2.



- Plano conversor.

