

---

# **Diseño conceptual de un banco de pruebas estático para motores de cohetes tipo G y K**

---

Presentado por

**Andrés Rodríguez Ramírez**  
**Robinson Higuera Hernández**



**LOS LIBERTADORES**  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

**Fundación Universitaria Los Libertadores**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Bogotá D.C, Colombia

2021



---

# **Diseño conceptual de un banco de pruebas para motores de cohetería tipo G y K**

---

Presentado por

**Andrés Felipe Rodríguez Ramírez**

**Robinson Higuera Hernández**

LOS LIBERTADORES

en cumplimiento parcial de los requerimientos para optar por el

título de

**Ingeniero Aeronáutico**

*Dirigida por*

**Ph.D Luisa Fernanda Mónico Muñoz**

*Codirector*

**Msc. Jaime Enrique Orduy Rodriguez**

*Presentada a*

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Fundación Universitaria Los Libertadores

Bogotá D.C, Colombia

2021



Nota de aceptación



---

---

---

---

---

# LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C, Julio de 2021.





# LOS LIBERTADORES

## FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores y a los resultados de su trabajo.





## **Dedicatoria**

El presente trabajo investigativo, se lo dedicamos a nuestros padres, hermanos y familiares, por brindarnos su apoyo y confianza durante esta aventura.

A nuestros docentes y compañeros, por sus consejos técnicos, acompañamiento y apoyo moral, que nos brindaron a lo largo de esta etapa tan importante en nuestras vidas.

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito, en especial aquellos que nos abrieron las puertas de su conocimiento y lo compartieron con nosotros.

**LOS LIBERTADORES**  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA



# Agradecimientos

Expresamos nuestro total agradecimiento a:

La Ingeniera y directora del proyecto de grado, Luisa Fernanda Mónico Muñoz, por su motivación en los momentos difíciles, por el apoyo brindado desde el inicio hasta la culminación de la investigación, por la confianza e interés mostrado durante el proceso y desarrollo de este proyecto, y por su aporte constante de conocimientos y experiencia, a ella, muchas gracias.

Al semillero de investigación SISPRO por la generación de espacios de investigación y tutoría y al semillero de investigación AERSYS.

Al Ingeniero Hernando Enrique Rodríguez Pantano, por su colaboración y consejos en aspectos de análisis estructurales.

Al Ingeniero Pedro Fernando Melo, por brindar acompañamiento, guía y consejos en la selección de dispositivos electrónicos usados en el proyecto.

# ÍNDICE GENERAL

Diseño conceptual de un banco de pruebas para motores de cohetería tipo G y K.....	3
Ingeniero Aeronáutico .....	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	15
Capítulo 1.....	19
Introducción .....	20
Capítulo 2.....	21
Planteamiento del problema .....	21
Antecedentes .....	21
Descripción y formulación del problema .....	25
2.1    Objetivos .....	25
2.1.1    Objetivo general .....	25
2.1.2    Objetivos específicos .....	26
2.2    Justificación .....	26
Alcances .....	26
Limitaciones .....	27
Capítulo 3.....	28
Marco Teórico .....	28
3.1    Partes de un cohete.....	28
Fuselaje.....	28
Aletas.....	29
Ojiva.....	29
Sistema de recuperación de un cohete .....	30
3.2    Propelente solido .....	31
3.3    Motores de combustible solido .....	33
3.4    Bancos de prueba .....	36
Capítulo 4.....	38
Metodología aplicada.....	38
Capítulo 5.....	41
Diseño conceptual del BEMCO .....	41
5.1    Requisitos del cliente.....	41
5.2    Estudio conceptual .....	44

5.2.1 Análisis funcional.....	45
5.2.2 Generación de conceptos.....	48
5.2.3 Proceso de filtrado .....	53
5.2.4 Conceptos globales.....	54
5.2.4 Lluvia de ideas .....	56
5.3 Despliegue función de calidad y evaluación final .....	62
Relación funcional .....	62
Evaluación .....	62
Análisis de resultados .....	73
Capítulo 7.....	76
Conclusiones y recomendaciones.....	76
7.1 Conclusiones .....	76
7.2 Recomendaciones .....	77
APÉNDICE.....	80
Apéndice A: Encuesta .....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. 1 Coeficiente de resistencia (Salazar, 2011).....	30
Tabla. 2 Características de los motores cohete (Nakka, 2015).....	35
Tabla. 3 Dimensiones de los motores cohete (Nakka, 2015).....	35
Tabla. 4 Calificación de los requerimientos .....	44
Tabla. 5 Conceptos generados para la función "medir parámetros del motor".....	50
Tabla. 6 Conceptos generados para la función "permitir fácil operación" .....	51
Tabla. 7 Conceptos generados para la función "asegurar integridad del operario" .....	51
Tabla. 8 Generación de conceptos para la función "soportar peso y vibraciones del motor" .....	52
Tabla. 9 Generación de conceptos para la función "fácil desplazamiento" .....	53
Tabla. 10 Generación de conceptos para la función "resistir temperatura de operación" .....	53
Tabla. 11 Proceso filtración de conceptos .....	54
Tabla. 12 Lluvia de ideas .....	59
Tabla. 13 QFD del BEMCO .....	66
Tabla. 14 Materiales concepto 1 .....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Partes del cohete (Muller, 2013).....	28
Fig. 2 a). Posición de aletas alineadas con el centro de presiones b). posición de aletas alienadas con el centro de gravedad (Riveros, 2010) .....	29
Fig. 3 Diseño de una ojiva (Salazar, 2011).....	30
Fig. 4 Sistema de recuperación (Muller, Modelismo Espacial, 2013).....	31
Fig. 5 Grano Propelente (Nakka, 2015). .....	32
Fig. 6 Perfiles empuje-tiempo (traducción libre) (Nakka, 2015).....	33
Fig. 7 Motor Cohete (Sutton, 2001).....	34
Fig. 8 Motor tipo G y Tipo K (Gonzales J. J., 2011) .....	36
Fig. 9 Banco estático tipo horizontal (Gonzales J. J., 2011).....	37
Fig. 10 Banco estático tipo vertical con la tobera hacia abajo (Gonzales J. J., 2011) .....	37
Fig. 11 Banco estático tipo vertical con la tobera hacia arriba (Gonzales J. J., 2011) .....	37
<i>Fig. 12 Diagrama de flujo con la metodología</i> .....	40
Fig. 13 a). Características físicas b). Parámetros operativos .....	42
Fig. 14 Estructura diseño conceptual (Peña, 2011).....	45
Fig. 15 Estructura de una caja negra (Peña, 2011) .....	46
Fig. 16 Caja negra del BEMCO.....	46
Fig. 17 Diagrama o despliegue funcional del BEMCO .....	47
Fig. 18 Diagrama de cuerpo libre del BEMCO .....	55

# Abreviaturas

<b>BEMCO</b>	Banco de Ensayos de Motores Cohete.
<b>C.E.A.</b>	Cohetería Experimental Amateur.
<b>QFD</b>	Despliegue Función de Calidad.
<b>HQ</b>	House Quality



# Conceptual design of a static test bench for type G and K rocket engines

## Abstract

A test bench for rocketry is a structural platform whose purpose is to carry out tests of measuring instruments, allowing the verification, analysis, behavior, and results of the element to be studied (Rocket). There are certain components of the rocket test bench such as sensors, electronic components, boards, clocks, flame deflector, which allow operation and access to engineering knowledge in propulsion systems.

When conducting the background investigation of the test benches, remote 800 years ago in China in the use of gunpowder in the use of fireworks, and over the years the engineers and specialists of certain branches have had to carry out sufficient studies before launching rockets in order to avoid catastrophes, accidents or damage due to uncorrected errors, through this, the use of test benches (BEMCO) have that objective.

Government and private entities and universities are encouraged to carry out low-cost test benches, which will contribute to research and industry with great developments, and thus generate broad interest to the student or researcher of the aeronautical engineering program of Los Libertadores University. With this conceptual design, it will allow the reader to know the techniques that will be used, such as the deployment of the quality function, the methodology used and the functional analysis, which helped to evaluate the different concepts generated during the research, and finally the dominant design was chosen.

**keywords:** Test bench, rocket engine, operational parameters, fuel solid.

# **Diseño conceptual de un banco de pruebas estático para motores de cohería tipo G y K**

## **Resumen**

Un banco de pruebas para cohería es una plataforma estructural que tiene como propósito de realizar ensayos mediante instrumentos de medición, permitiendo la comprobación, análisis, comportamiento y resultados al elemento a estudiar (Cohete). Existen ciertos componentes del banco de pruebas para cohete como lo son los sensores, componentes electrónicos, tableros, relojes, deflector de llama, que permiten el funcionamiento y acceso a los conocimientos ingenieriles en sistemas de propulsión.

Al realizar la investigación en antecedentes de los bancos de pruebas, remota hace 800 años en China en la utilización de la pólvora en el uso de los juegos artificiales, y con el paso de los años los ingenieros y especialistas de ciertas ramas se han tenido que realizar suficientes estudios antes de hacer lanzamientos de cohetes con el fin de evitar catástrofes, accidentes o daños por errores no corregidos, por medio de ello, la utilización de los bancos de prueba (BEMCO) tienen ese objetivo.

Entidades gubernamentales, privadas y universidades se incentivan en la realización de bancos de pruebas a bajo costo, que permitan aportar en la investigación e industria con grandes desarrollos, y así generar un amplio interés al estudiante o investigador del programa de ingeniería aeronáutica de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Con este diseño conceptual permitirá al lector, conocer las técnicas que se utilizaron como lo son el despliegue de función de calidad, metodología utilizada y análisis funcional, la cual ayudó a evaluar los diferentes conceptos generados durante la investigación, y finalmente se escogió

el diseño dominante.

**Palabras claves:** Banco de pruebas, motor cohete, parámetros operacionales, combustible sólido.

# Capítulo 1

## Introducción

Un banco de pruebas sirve para medir las prestaciones de los diferentes sistemas que transformen algún tipo de energía, como son la simulación del comportamiento de un motor y sus características operativas en ciertas condiciones controladas, ya que permiten tener un registro de su comportamiento tanto en las condiciones normales de funcionamiento como en las situaciones extremas. Es importante conocer la finalidad y propósitos del desarrollo de un banco de pruebas ya sea para producción, investigación o rectificación; e importante las pruebas a realizar como ensayos de potencia, control de temperaturas, flujos máscicos, entre otros (Pamplona, 2007).

Universidades y empresas enfocadas en el campo aeroespacial cuentan con el desarrollo de vehículos autopropulsados con ascenso vertical, tienen la necesidad de diseñar y construir su propio banco de pruebas para motores cohete, con el objetivo de analizar el comportamiento del motor antes de un posible lanzamiento del cohete.

Existen diferentes tipos de motores cohete, los cuales en cohetería experimental son los que utilizan combustible líquido y sólido para su propulsión (Ver Marco teórico, Pág. 30). Este documento describe los criterios fundamentales del diseño conceptual de un banco de pruebas para motores de cohetería experimental de combustible sólido, orientado en motores tipo G y K ya que en su proceso de fabricación son más sencillos y económicos, respecto a los demás motores de cohetería.

## Capítulo 2

### Planteamiento del problema

#### Antecedentes

Antes de tocar el problema planteado para este trabajo es importante hablar un poco de la historia de los bancos de pruebas para motores cohete y la importancia en el campo aeronáutico.

Las primeras ideas de desarrollar propulsores en misiles cohete fueron los chinos hace 800 años, usándose en actividades relacionadas con la pólvora en los fuegos artificiales. Luego de unos siglos más adelante la cohetería impacta en el uso militar, como por ejemplo en los conflictos globales que se presentaron durante la primera década de los años veinte (Sutton, 2001).

A comienzos del siglo XX la propulsión de cohetes tuvo lugar para el físico ruso Konstantin E. Ziolkowski, a quien se le atribuye la fundamental ecuación de vuelo de cohetes para su desarrollo, y pionero de los viajes espaciales lo que se convirtió la inspiración de muchos científicos e investigadores. Más adelante German Hermann Oberth, un físico y padre de la astronáutica, desarrolla una teoría matemática más detallada (Sutton, 2001), la cual propulso vehículos de varias etapas para vuelos espaciales y cámaras de empuje refrigeradas por combustible. En 1926 el ingeniero estadounidense Robert H. Goddard, desarrollo el primer vuelo con un motor de cohete con propulsor líquido.

Para los enfrentamientos mundiales, la cohetería se empleó para el derribe de globos de observación o zeppelines dirigibles, con la desventaja de ser un cohete altamente inflamable en su manipulación. Luego de unos años, los cohetes Le Prieur originarios de Francia y utilizados en la batalla de Verdún, fueron un tipo de proyectil aire-aire lanzados desde los

aviones para atacar a distintas aeronaves u otro entorno alrededor, con un alcance de 115 metros. Unos años después, durante la intermediación de la Primera y Segunda Guerra Mundial, los aviones de caza se utilizaron para el lanzamiento de misiles mediante pilones que se encontraban debajo de las alas (Martínez, 2004).

Las primeras ideas para el diseño de un banco de prueba surgen en el año 1.935 por el ingeniero alemán Wernher Von Braun, en el cual él radicado en Estados Unidos, junto con su equipo, desarrollan este banco para la realización de un misil balístico, nombrado Polaris A3 UGM-27; junto con los cohetes Redstone que luego más adelante la NASA adopta para su uso en las misiones espaciales (Parsch, 2007).

Estos modelos dieron como esparcimiento y crecimiento a los estudios de este sector a países con alcance al desarrollo y diseño, tales como la Unión Soviética de ese entonces que demarca rivalidad entre los Estados Unidos en la competición del sector aeroespacial e inicio de la Guerra Fría. Ya con estas tensiones y conflictos sociales del pasado, estos países siguieron en la pujanza y en un ritmo constantemente acelerado, surgieron nuevos proyectos, diseños, estudios en la cohetería con combustibles sólidos y líquidos como el cohete Saturno que iba ser lanzado a la estación espacial Skylab que además fue un banco de pruebas, pero el proyecto no cumplió la totalidad de la misión espacial (Press, 2007).

En este banco de pruebas ubicado en Merritt Island Florida (Press, 2007) se realizó el estudio en las instalaciones estructurales y dinámicas en transbordadores y otros vehículos aeroespaciales corrigiendo los principales problemas que podían causar fallas en el transbordador y demás vehículos.

En Colombia los diseños de cohetería actualmente se encuentran en sus etapas iniciales de estudio y desarrollo, un claro ejemplo son las investigaciones en planteles de sector educativo y gubernamental como la Universidad Nacional de Colombia. En la que han trabajado en un

diseño de banco de pruebas estático en motores cohete que proporcionan un empuje de 1000 N. Este trabajo fue sustentado al VII Congreso Argentino de tecnología espacial en la ciudad de Buenos Aires, Argentina (Rojas N. Á., 2015).

En la Universidad de San Buenaventura, se realizó un estudio cuyo objetivo fue el diseño y construcción de un motor cohete propulsado por combustible sólido que genera un empuje de 800 N. La construcción y el lanzamiento del cohete los llevó a comprobar que Colombia tiene ventajas en los campos geográfico y astronómico para facilitar el lanzamiento de artefactos, ya que se encuentra bajo la órbita sincrónica geoestacionaria que es una órbita circular situada en el plano ecuatorial terrestre (Reina, 2010).

Adicional, se ha desarrollado el estudio de un diseño y construcción de un banco de ensayo estático para los motores cohete, mencionando brevemente la determinación de variables como empuje y presión al variar sus condiciones operativas (Gonzales J. J., 2011). El banco de pruebas está diseñado con una celda de carga y un transductor de presión cuya función principal es la de obtener los datos precisos del motor en prueba.

En la Universidad de Los Andes, se llegó a realizar el estudio de la factibilidad de la primera misión colombiana en lanzamiento de un cohete hasta la estratósfera, un alcance máximo de 50 km desde el punto del lanzamiento. La propulsión de este cohete (Ainkaa 1) se basó en combustión sólida llamada “Candy”, usando como base tecnológica y científica en trabajos anteriores la simulación del cohete por software (Rocksim). Para el banco de pruebas se explica brevemente la utilización de tubería Koll Roll de ½ pulgada para su ensamble, quedando en forma triangular para realizar mediciones de rendimiento de motor mediante una célula de carga hidráulica con un manómetro de 0 a 100 psi (Urrego, 2012).

Unos años más adelante se realizó el lanzamiento de la misión colombiana de cohetaría experimental con propulsión líquida llamado Seneca VI. En el que mencionan poner a prueba

el motor cohete PUA I1-6S 2000n a estudios de funcionamiento, manufactura y ensamble. Para el ensayo mediante banco de pruebas, se utiliza el UCAND-1, capaz de soportar cargas de 10000kN y determinar variables de empuje, presión y temperatura, visualizándose en tiempo real los datos almacenados para ser consultados en el futuro y mejorar resultados (Longas, 2013).

UCAND-1 fue el primer modelo realizado por la universidad de Los Andes de Colombia experimentado en proyectos que se mencionaron anteriormente en donde se determinan las variables de presión y temperatura en el interior de la cámara de combustión y empuje generado por el motor rediseñado (Rojas F. A., 2012). Se realizó un rediseño para los modelos UCAND-2 y -3 con el objetivo de cumplir la mejora de atributos de calidad y estética.

La Fundación Universitaria Los Libertadores, ha desarrollado en el transcurso de los últimos tres años, estudios sobre bancos de pruebas, aunque no esencialmente de coherencia, pero se ha realizado la adquisición y procesamiento de señales eléctricas de un banco de pruebas para motores de combustión interna, la cual este proyecto desarrollado por el programa de Ingeniería electrónica, mejora en evaluar el desempeño y el rendimiento de un motor Diesel de 4 tiempos, y con esto generar energía eléctrica a través de un alternador y comprobar la potencia total entregada al conectarse a un banco de resistencias (Acevedo, 2019). También se ha desarrollado junto con la ayuda y colaboración de la escuela de aviación del ejército de Colombia, un banco de pruebas de lavado de inyectores que permite realizar los respectivos mantenimientos de los inyectores de las cámaras de combustión a la flota de aeronaves de tal entidad, con el fin de hacer más larga su vida útil de trabajo y rendimiento en el motor, teniendo en cuenta el riesgo humano que implica la operación manual de estos componentes, generando la posibilidad de accidentes y riesgos laborales, operacionales (Abarka, 2019).



## **Descripción y formulación del problema**

Las instituciones académicas colombianas han presentado un interés en el área aeroespacial en los últimos 12 años, motivando a los estudiantes a trabajar en bancos de pruebas capaces de obtener una visión más completa del funcionamiento de los motores enfocados en este campo, extendiendo los conocimientos en el ámbito académico de la ingeniería aeroespacial y aeronáutica, en universidades como Los Andes, la Pontificia Bolivariana, Universidad de San Buenaventura, Universidad de Antioquia, y Universidad Nacional de Colombia. El desarrollo conceptual de un banco de pruebas estático para motores cohete tipo G y K determinará el comportamiento de los diversos parámetros que intervienen en el funcionamiento del motor y de esta forma, sus curvas características de operación; como la temperatura y la presión (Urrego, 2012).

Durante el análisis del Banco de pruebas para Motores Cohete (BEMCO), se tendrá que llevar a cabo la búsqueda de información que permitan la funcionalidad y cumplimiento de los objetivos, mediante una fase del enfoque ingenieril que abarque el desarrollo del diseño conceptual, y con esto poder comprender a:

**¿Cómo es el análisis funcional, metodológico y desarrollo estructural de un diseño conceptual de un banco de pruebas para motores cohete?**

## **2.1 Objetivos**

### **2.1.1 Objetivo general**

Diseñar conceptualmente un banco de pruebas para motores cohete de tipo G y K de combustible sólido.

### **2.1.2 Objetivos específicos**

- Definir los parámetros operativos que intervienen en el funcionamiento del motor.
- Identificar conceptualmente los requisitos estructurales a los que estaría sometido el BEMCO.
- Seleccionar los materiales ideales para el diseño del BEMCO.

## **2.2 Justificación**

El desarrollo de un banco de pruebas estático para motores cohete es una gran implementación ya que, por medio de este, se realiza una prueba del motor antes de ponerlo en práctica real, evitando de esta forma sobrecostos innecesarios. Al medir los parámetros operacionales esenciales del motor es posible optimizarlo antes de un lanzamiento.

La Fundación Universitaria Los Libertadores no cuenta con un banco de pruebas estático para motores de coherería, lo cual la implementación de este podría ayudar a investigaciones futuras dentro de la institución, y así mismo, contribuirá para avances en prácticas de laboratorio de espacios académicos que lo requieran. Como parte de la justificación del problema se nombran los alcances y limitaciones del proyecto.

### **Alcances**

- Se analizará la función del diseño conceptual del banco de pruebas para motores cohete.
- Este BEMCO proporcionara mediciones de presión bajo el rango de 300 psi hasta 1300 psi lo cual permitirá caracterizar datos que abarquen la funcionalidad de la tobera del cohete.

- Se realizará un despliegue de la función de la casa de calidad del BEMCO.

### **Limitaciones**

- No se construirá el banco de pruebas, solo se realiza el diseño conceptual.
- No se realizarán cálculos estructurales, no se desarrollará ninguna simulación, ni diseño por medio de algún programa de CAD, esto por ser solo un diseño conceptual.

# Capítulo 3

## Marco Teórico

### 3.1 Partes de un cohete

La cohetaría experimental ha permitido conocer una variedad de resultados a partir de investigaciones teóricas y teórico-prácticas. Gracias a las múltiples teorías ya existentes sobre cohetaría, se obtiene que los cohetes tienen una configuración y partes que lo conforman ya definidas, como se observa en la Fig. 1 y se describen a continuación (Muller, 2013).



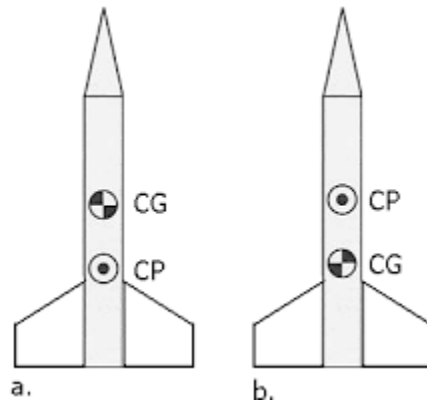
*Fig. 1 Partes del cohete (Muller, 2013).*

#### Fuselaje

Es uno de los elementos estructurales principales de un cohete, su diseño posee formas cilíndricas huecas con una determinada longitud y diámetro. Su estructura debe soportar cargas combinadas de compresión y flexión. El fuselaje se mantiene unido a la ojiva gracias al cordón de amarre, su material elástico y resistente soporta el “tirón” en el momento de la expulsión (Muller, 2013). El aro retén es el tope del motor cohete y hace que el empuje de este se transmita al fuselaje.

## Aletas

Su función es brindarle estabilidad a la trayectoria del vuelo de manera adecuada (PACHÓN, 2016). La ubicación de este elemento se encuentra en la parte inferior de cada etapa, de esta manera el centro de presiones se mantiene por debajo del centro de gravedad, logrando estabilizar de esta forma el cohete. Su superficie debe ser lisa y perfectamente alineada, las aletas se encuentran ancladas en la parte exterior del fuselaje, estas siempre deben estar estabilizadas por debajo del centro de gravedad y centro de presiones. En la Fig. 2 se observa la posición exacta de las aletas estabilizadoras.



*Fig. 2 a). Posición de aletas alineadas con el centro de presiones b). posición de aletas alienadas con el centro de gravedad (Riveros, 2010)*

La cantidad de aletas influye en el sistema estabilizador del cohete. El número de superficies puede variar desde dos aletas hasta ocho aletas.

## Ojiva

Su forma aerodinámica tiene como objetivo sellar la parte frontal del cuerpo del cohete y así disminuir la resistencia que el aire opone al movimiento de este (Salazar O. , 2016) . Existen diferentes alternativas de diseño como lo es la forma cónica, la forma de ojiva y la forma de

parábola, las cuales se presentan en la Fig. 3, siendo la forma de ojiva la más usada por su forma aerodinámica.

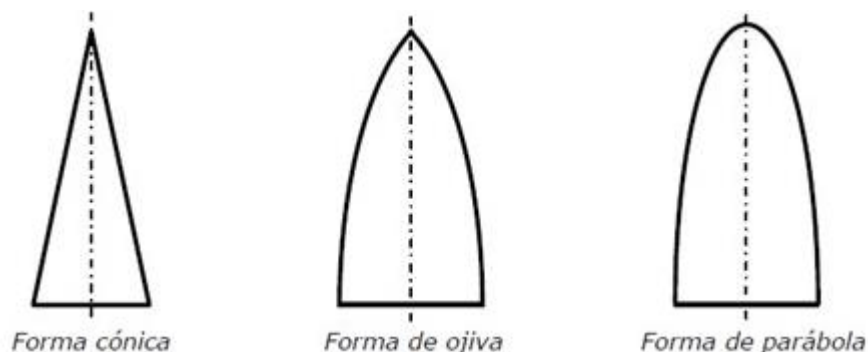


Fig. 3 Diseño de una ojiva (Salazar, 2011)

La magnitud de la resistencia que el aire opone al movimiento del cohete (*Drag*), depende fundamentalmente de la geometría de la ojiva, del diámetro del fuselaje del cohete y de la velocidad de este. El coeficiente de resistencia al aire cambia respecto a su forma y esta es diseñada para distintos regímenes de velocidad. En la Tabla. 1 se observa como el diseño de la ojiva afecta al coeficiente de resistencia, siendo este el que menor resistencia al aire tiene, actuando en un régimen de velocidad subsónico.

Tabla. 1 Coeficiente de resistencia (Salazar, 2011)

DISEÑO DE OJIVA	COEFICIENTE DE RESISTENCIA	RÉGIMEN DE VELOCIDAD
Cónicas	0,67	Supersónica
Parabólicas	0,5	Transónica-Subsónica
Ojivales	0,45	Subsónica

### Sistema de recuperación de un cohete

Es el encargado de que el cohete aterrice con seguridad (Herria, 2017) En la cohetaría experimental cuando el cohete llega al punto más alto del vuelo (apogeo), este sistema se encarga de expulsar un paracaídas para que el cohete descienda lentamente. Este sistema

tiene un diseño robusto y seguro, ya que es vital el correcto despliegue del paracaídas en el momento adecuado, para esto, la gran parte de los cohetes disponen de un ordenador de vuelo que detecta el lanzamiento y hace una cuenta regresiva hasta alcanzar el apogeo, donde expulsa el sistema de recuperación (el paracaídas) con una carga explosiva en el interior del cohete. En la Fig. 4 se muestra de manera gráfica como se activa el sistema de recuperación de un cohete. Las características principales de un dispositivo de recuperación son el *Drag* y la estabilidad.

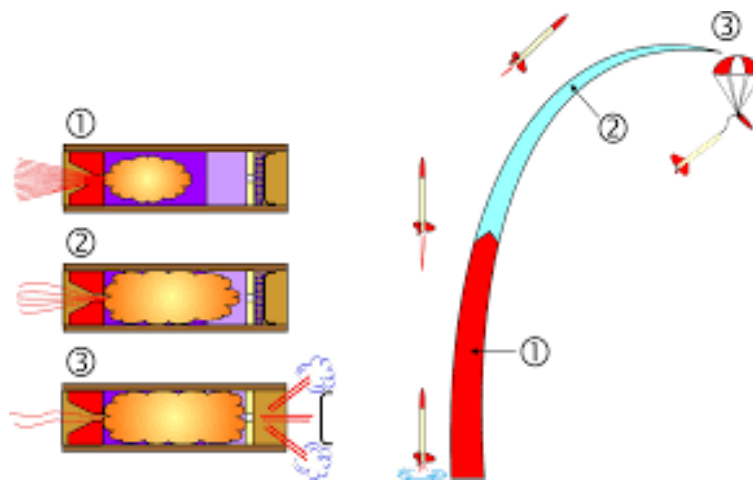
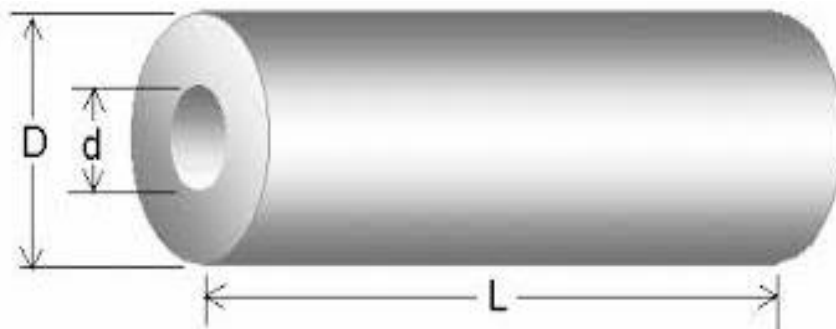


Fig. 4 Sistema de recuperación (Muller, Modelismo Espacial, 2013)

## 3.2 Propelente solido

La selección del propelente es crucial para el diseño del motor cohete. Un propelente solido debe tener un alto rendimiento o impulso específico, tasa de combustión predecible, reproducible e inicialmente ajustable a la necesidad del diseño del grano y el requisito del tiempo de empuje. El propelente debe tener una densidad alta, esto permite poder diseñar un motor de pequeño volumen, como también es necesario la baja absorción de humedad, lo que a menudo causa un deterioro químico (Sutton, 2001).

El grano propelente utilizado en los motores cohete de tipo experimental es de composición simple, siendo la combinación de dos constituyentes principales- combustible y oxidante, un ejemplo claro son los propelentes con base de “azúcar” que resultan económicos y muy prácticos para la Cohetería Experimental Amateur (C.E.A) (Nakka, 2015). Sin importar su composición, todos los propelentes son procesados en una forma geométrica similar, como regla, los granos propelentes son de forma cilíndrica para encajar perfectamente dentro del motor cohete. El grano propelente puede consistir solo de un segmento cilíndrico como se observa en la Fig. 5 , o puede consistir en varios segmentos.



*Fig. 5 Grano Propelente (Nakka, 2015).*

El segmento más importante del grano propelente es el núcleo, puede tener una amplia variedad de formas como: circular, estrella, cruz, etc. (Walter, 2008). Para los motores tipo experimental, como lo son el tipo G y K, la forma más usada es la tubular, ya que la forma del núcleo tiene una profunda influencia en la forma del perfil empuje-tiempo. En la Fig. 6 se observa la influencia que tiene la forma del núcleo del propelente en la curva empuje-tiempo, por ejemplo, el grano propelente de forma tabular provee una combustión progresiva, en comparación con las otras formas.



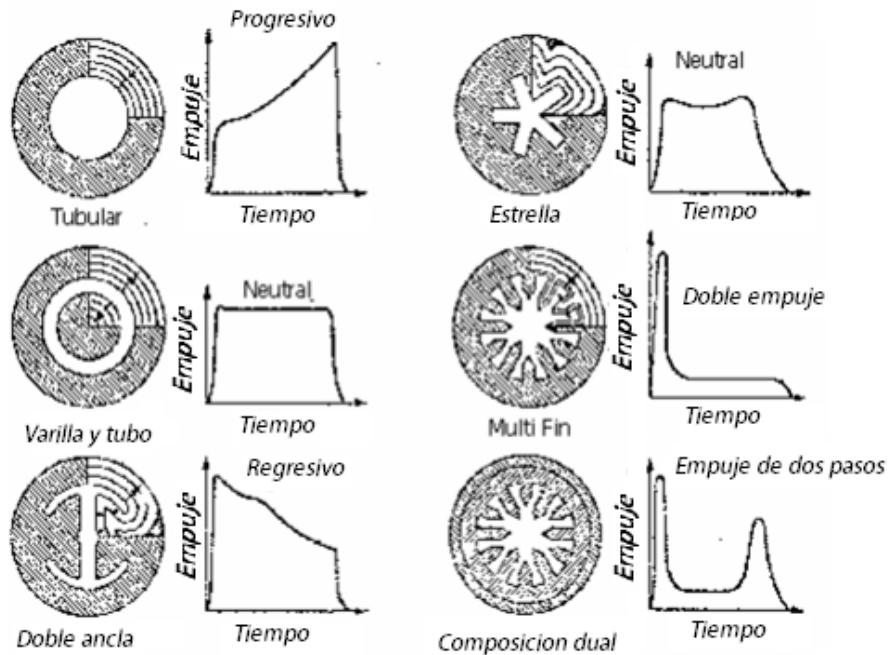


Fig. 6 Perfiles empuje-tiempo (traducción libre) (Nakka, 2015).

En el caso de los motores tipo K también utilizan un tipo de grano propelente llamado, grano BATES, que es un grano con múltiples segmentos, hueco y cilíndrico pegado a las paredes del motor, el motor K utiliza este tipo de configuración con un total de cuatro segmentos (Nakka, 2015).

### 3.3 Motores de combustible sólido

Los cohetes que usan motores de combustible sólido suelen estar desarrollados con la intención de generar altos empujes y eficiencias considerables durante un breve periodo de tiempo en el que genere el empuje necesario para romper su inercia y obtener una aceleración cuya velocidad sea lo suficiente para llegar incluso a orbitar la tierra o simplemente elevarlo hasta determinada altura (Nakka, 2015).

Los motores tipo G y K son de apariencia simple e inherentes, con pocos componentes y una única mezcla de propelente sólido dentro de la cámara de combustión, el desempeño de estos

motores es determinando por la naturaleza y la forma geométrica del propelente, y la continuidad del quemado de este. Estos motores por su sencillez son muy utilizados en las áreas: militar, académica, amateur, boosters espaciales y unidades de propulsión de las aeronaves (Correa, 2009).

Este tipo de motores se componen básicamente por una cámara de combustión tobera propulsiva y el grano propelente. En la Fig. 7 se observan las partes del motor cohete, este tipo de motores son utilizados en misiles (Sutton, 2001).



*Fig. 7 Motor Cohete (Sutton, 2001)*

Existen diferentes tipos de motores cohete experimental, se pueden clasificar según sus características principales como el empuje y la presión. En la Tabla. 2 se muestra la clasificación de los motores experimentales según sus características de funcionamiento, observando que el motor tipo G es el motor que menos empuje genera. Los motores cohete también se pueden clasificar según sus dimensiones, como la longitud de la tobera y la longitud del cuerpo del cohete. En la Tabla. 3 se muestra la clasificación de los motores cohete según sus dimensiones, observando que el motor tipo K es el motor con mayor longitud total comparándolo con los demás motores de cohetaría “amateur”. Los motores de

combustible sólido son los más usados en cohetaría experimental por su económica fabricación.

*Tabla. 2 Características de los motores cohete (Nakka, 2015)*

<b>Tipo</b>	<b>Altitud (ft)</b>	<b>Empuje (lb)</b>	<b>Presión (psi)</b>
Motor L	20000	521	1131
Motor J	5905,51	391	984
Motor K	11000	360	1200
Motor I	2952,76	325	1129
Motor H	1968,50	260	998
Motor G	1345,14	88	328

*Tabla. 3 Dimensiones de los motores cohete (Nakka, 2015)*

<b>Tipo</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Longitud cuerpo (mm)</b>	<b>Longitud tobera (mm)</b>	<b>Longitud total (mm)</b>
Motor J	48	368	62	430
Motor L	74	610	84	694
Motor G	29,71	157,48	71,11	228,59
Motor H	37,973	212,34	68,072	280,45
Motor I	44,46	228,6	120,64	349,24
Motor K	63,5	483,96	100,33	584,29

A continuación, se observa de manera gráfica las dimensiones de los motores Tipo G de color plateado y Tipo K color verde, en forma de comparación, dado que uno es sumamente más grande que el otro, y esto influye en los diseños de los cohetes.

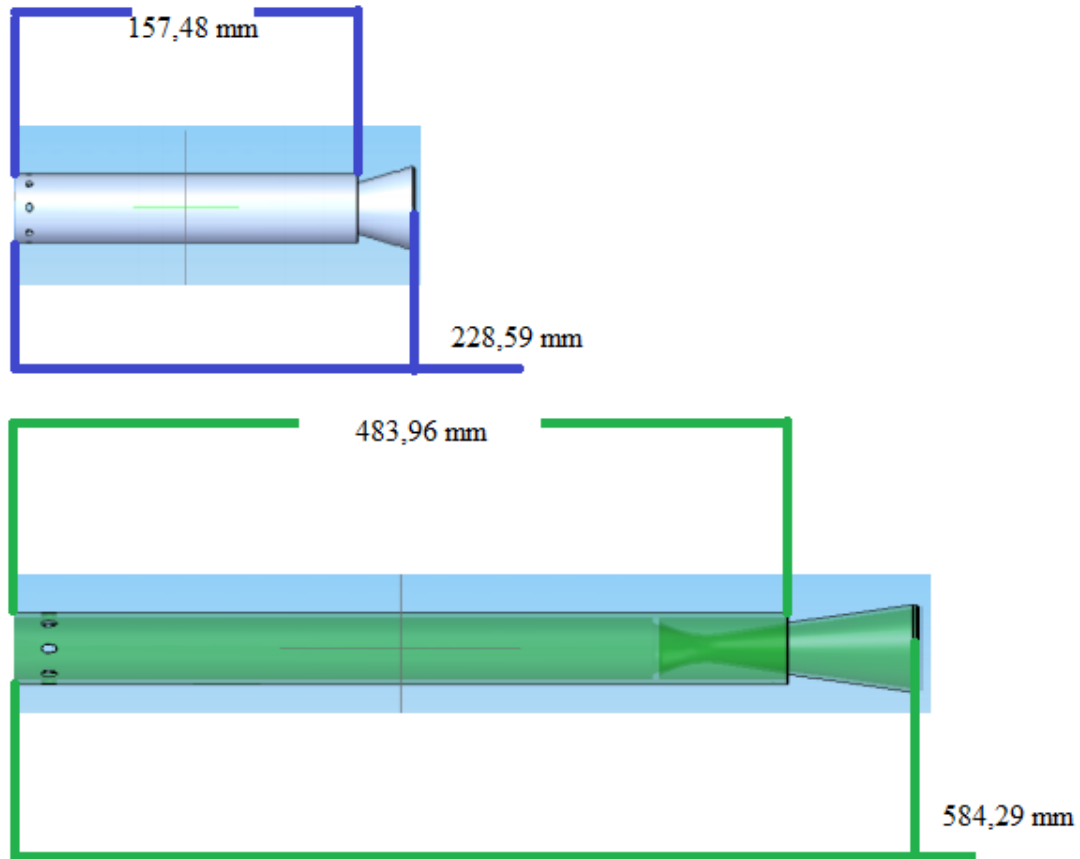


Fig. 8 Motor tipo G y Tipo K (Gonzales J. J., 2011)

### 3.4 Bancos de prueba

Los bancos de pruebas para motores cohete, se denominan (BEMCO), es un elemento esencial para el desarrollo y caracterización de un motor cohete. Si se pone en marcha un motor sin probar en un cohete se corre el riesgo de que pueda tener fallas durante el vuelo, por eso es esencial que un motor cohete sea probado en un BEMCO antes de su lanzamiento (Parczewski's, 2016).

Una forma de clasificar los BEMCO es por la forma de ubicar el motor cohete. En la Fig. 9 se observa la ubicación del motor cohete en posición horizontal, y en la Fig. 10 motor cohete en posición vertical, con la tobera hacia abajo, en esta configuración es necesario prever un deflector de la llama para que la misma no impacte en el suelo, siendo esta forma de diseño

la más utilizada en C.E.A (Cohetería experimental Amateur). Otra configuración es el motor cohete ubicado de forma vertical con la tobera hacia arriba, pero no es muy usada esta clase de diseño, se observa en la Fig. 11 (Parczewski's, 2016).

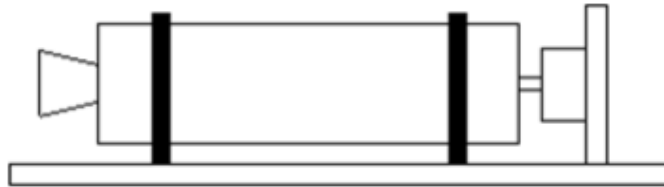


Fig. 9 Banco estático tipo horizontal (Gonzales J. J., 2011)

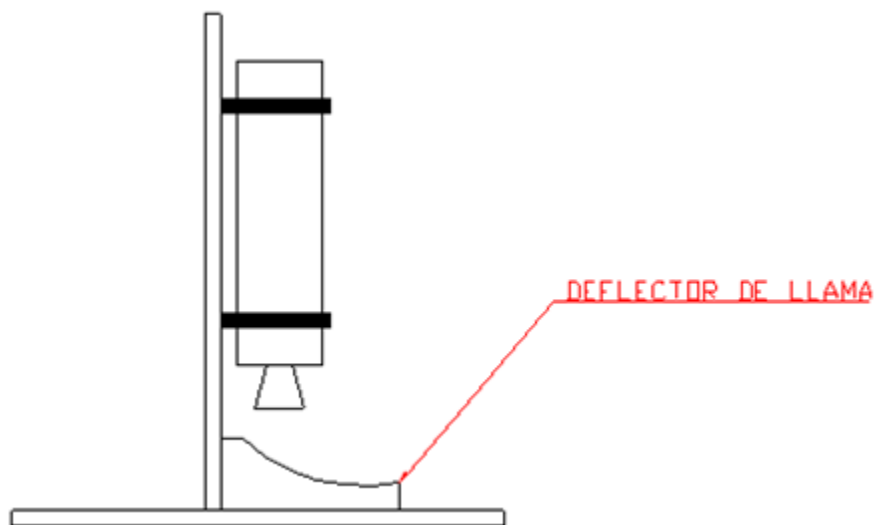


Fig. 10 Banco estático tipo vertical con la tobera hacia abajo (Gonzales J. J., 2011)

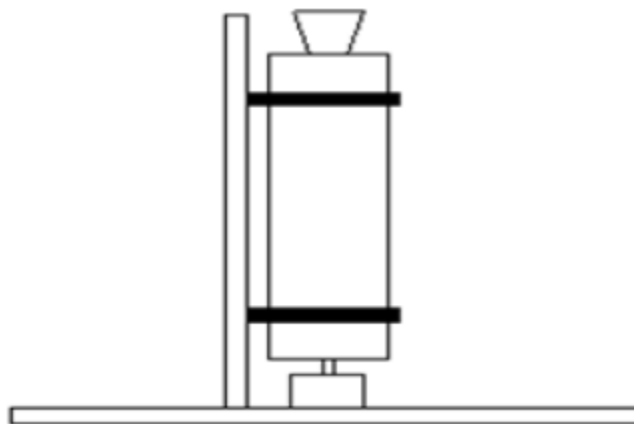


Fig. 11 Banco estático tipo vertical con la tobera hacia arriba (Gonzales J. J., 2011)

# Capítulo 4

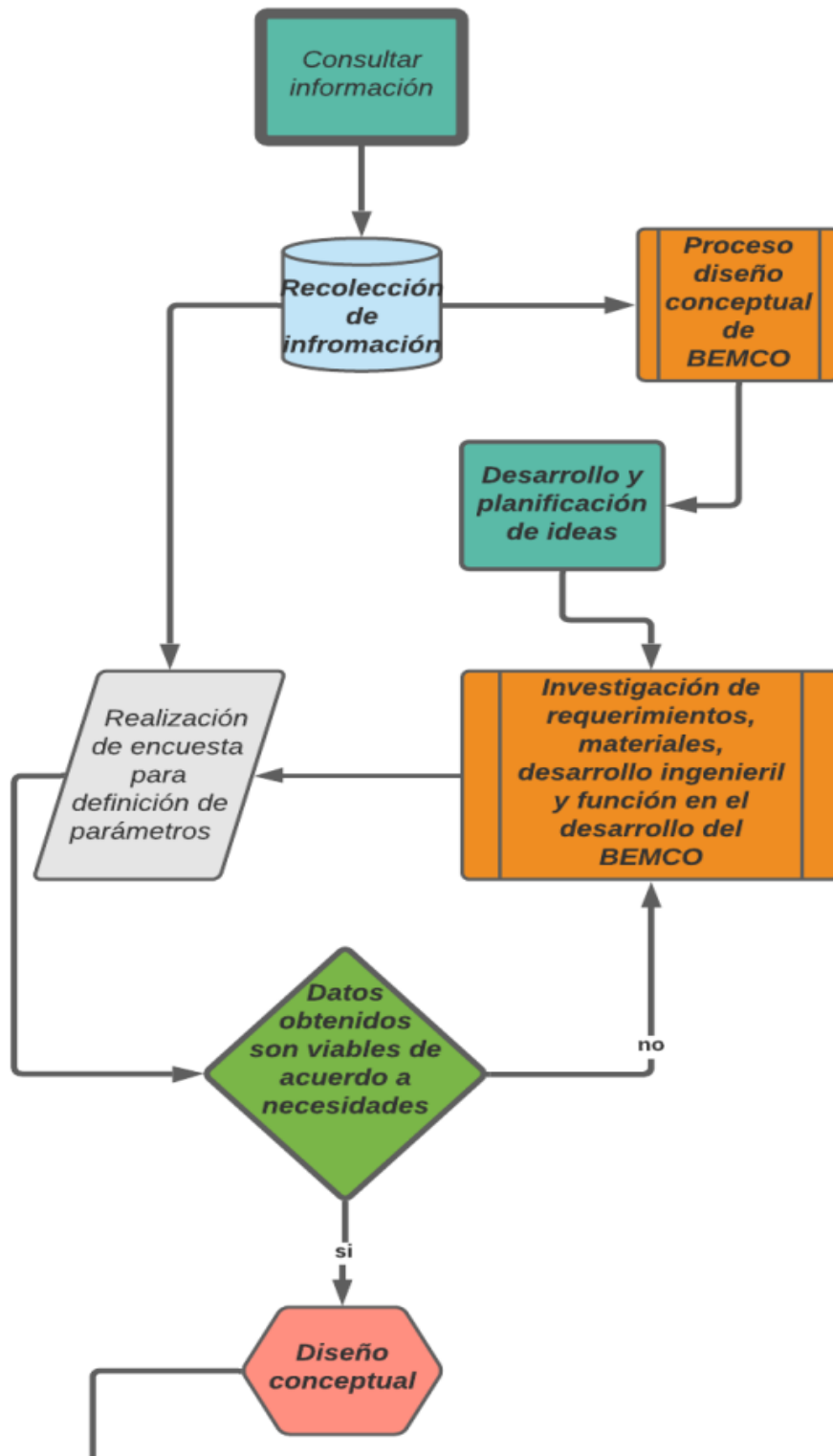
## Metodología aplicada

Este trabajo es llevado bajo la metodología analítica, que abarca la descomposición de definiciones, funcionamiento y análisis de parámetros que se vayan a utilizar en el BEMCO (Peña, 2011).

Este proyecto incluye una primera fase en la que se recolectó, recopiló y se aprobó información de diversas fuentes. La investigación de artículos, proyectos y tesis permitieron obtener información viable y de gran fiabilidad. Dichos proyectos basan su investigación en motores de coherencia experimental y el diseño detallado del banco de pruebas para C.E.A.

La segunda fase incluye un desarrollo ingenieril, donde se realiza el diseño conceptual, que está compuesto por tres etapas interrelacionadas: análisis funcional, que tiene como objetivo identificar las funciones a realizar por el producto. Generación de conceptos, está basado en aclarar el problema de diseño, generando ideas por medio de procesos creativos. Y la evaluación y selección del concepto global dominante, una vez generados los diferentes conceptos, se evalúan y se comparan. Se utilizará como herramienta la casa de calidad para evaluar dichos procesos, finalmente se realiza un control de calidad por medio de la misma herramienta, para garantizar la calidad del BEMCO.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la metodología y el desarrollo de actividades para el diseño conceptual del BEMCO.



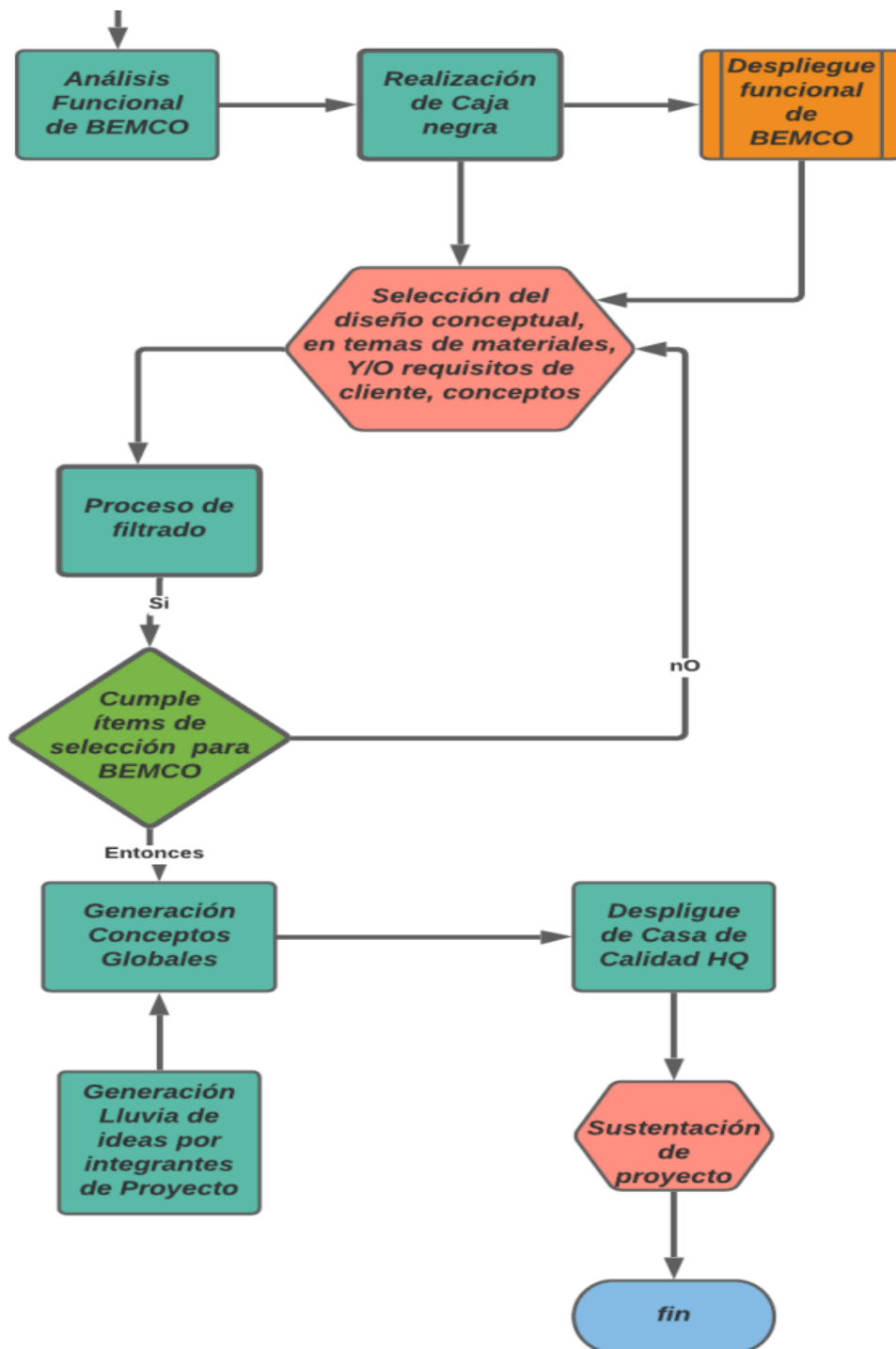


Fig. 12 Diagrama de flujo con la metodología



## Capítulo 5

# Diseño conceptual del BEMCO

Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto se han establecido algunas guías y técnicas basándose en diferentes fuentes, entre ellas, el libro de la metodología de diseño para ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, el cual presenta aspectos fundamentales para el desarrollo de un producto. Teniendo como primer paso identificar los “requerimientos iniciales de diseño” o “requerimientos del cliente”. Después de establecer las necesidades del cliente se procede a realizar el diseño conceptual del producto, teniendo en cuenta tres etapas fundamentales, el análisis funcional con el fin de identificar las funciones y subfunciones que deberá ejecutar el BEMCO y organizarlas de un modo lógico; generación de conceptos y, por último, se realiza la evaluación de cada concepto. Los conceptos se evaluarán teniendo en cuenta los requerimientos del cliente. El resultado principal de esta fase es la selección de un concepto global dominante o diseño conceptual final de un banco de pruebas para motores cohete tipo G y K, siendo el objetivo principal de este proyecto.

### 5.1 Requisitos del cliente

En este caso el cliente hace referencia a los docentes del programa de Ingeniería Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Se realizó una encuesta global a cada docente para definir y establecer las necesidades y/o aspectos para tener en cuenta para el desarrollo del BEMCO, el resultado de la encuesta se observa en la

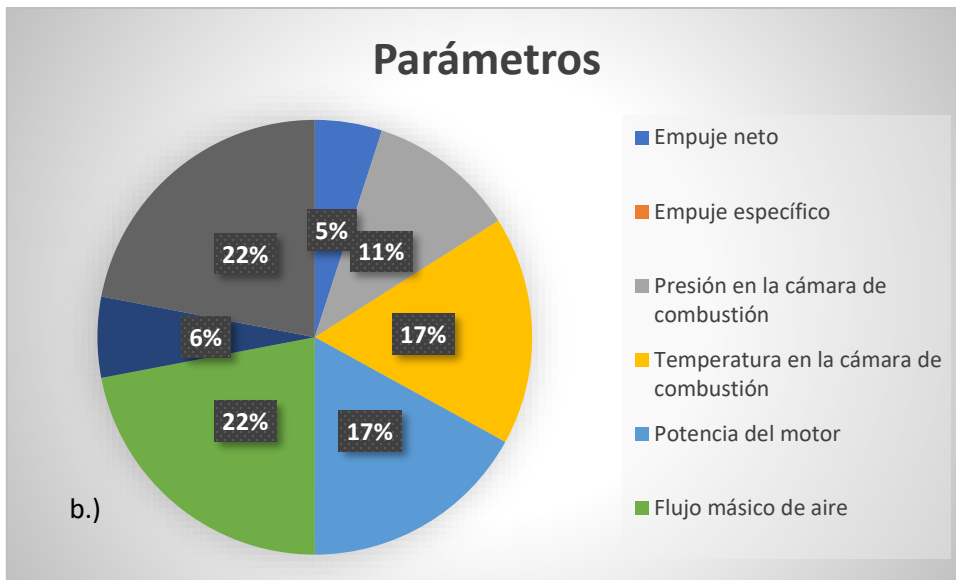


Fig. 13. Los cinco docentes encuestados de la facultad respondieron una encuesta de cuatro preguntas. Siendo la primera y la segunda pregunta: características físicas que se deben tener en cuenta para el desarrollo de un BEMCO, la tercera pregunta se realizó con el fin de obtener que parámetros de medición consideran favorables en un BEMCO los encuestados. Y la última pregunta, se realizó para conocer una opinión o sugerencia del docente, respecto al BEMCO. La primera y la segunda pregunta se unificaron en la evaluación de encuesta, ya que las dos pertenecen al mismo grupo “características”. La encuesta se observa en el apéndice A, al final del documento para poder ser leída con claridad.

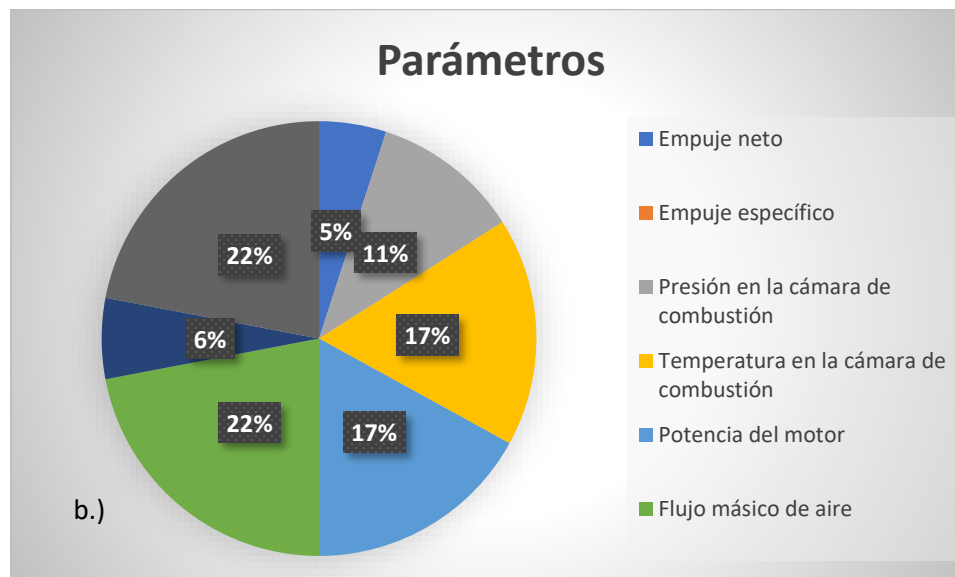
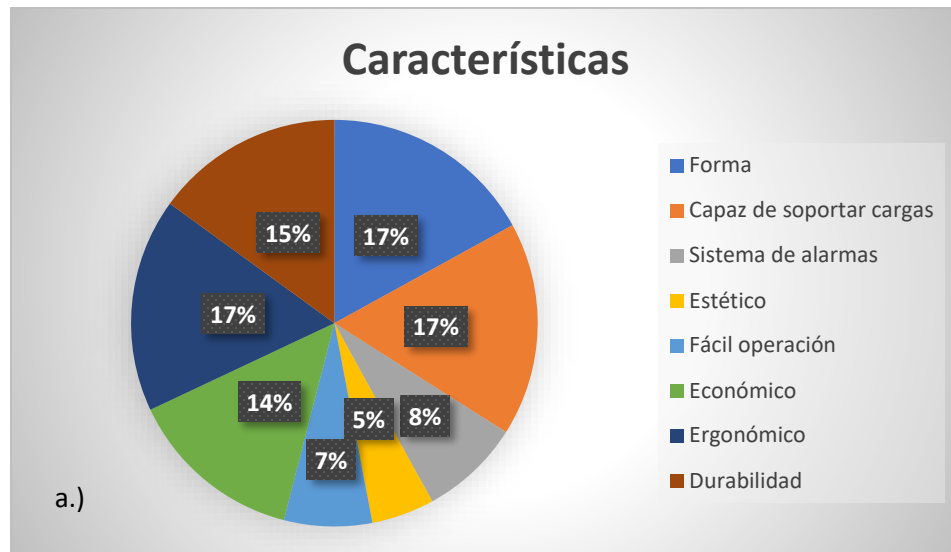


Fig. 13 a). Características físicas b). Parámetros operativos

En la Fig. 13 a) se observa que las características que tuvieron mayor calificación por los encuestados fueron: forma, ergonómico y capaz de soportar cargas, sumando más del cincuenta por ciento de la calificación total de la encuesta. En la Fig. 13 b) más del 40% de los encuestados, estuvieron de acuerdo en que, la presión en la tobera de escape y el flujo másico de aire son parámetros fundamentales para un BEMCO.

Los requerimientos y parámetros se calificaron por medio de su grado de importancia, la evaluación se realizó de la siguiente manera:

- Más del 20% se calificó con un grado de importancia Superior.
- Más del 15% se calificó con un grado de importancia Alto.
- Entre 14% y 15 % se calificó con un grado de importancia Medio.
- Menos del 14% se calificó con un grado de importancia Bajo.
- Menos del 7% se calificó con un grado de importancia Muy Bajo

A continuación, en la Tabla. 4 se observa una lista de los parámetros y características que se escogieron como requerimientos del cliente, dado su nivel de importancia. Tienen un valor numérico siendo, superior (5), alto (4), medio (3), bajo (2) y muy bajo (1). Solo se tuvo en cuenta los requerimientos cuyo nivel de importancia estuvieran entre 3 y 5. Se descartaron los demás por tener un grado de importancia tan bajo.

Gracias a la encuesta se concluyó los aspectos generales que son fundamentales para el diseño conceptual del BEMCO. Se debe tener en cuenta que “económico” hace referencia al uso de materiales de bajo costo.

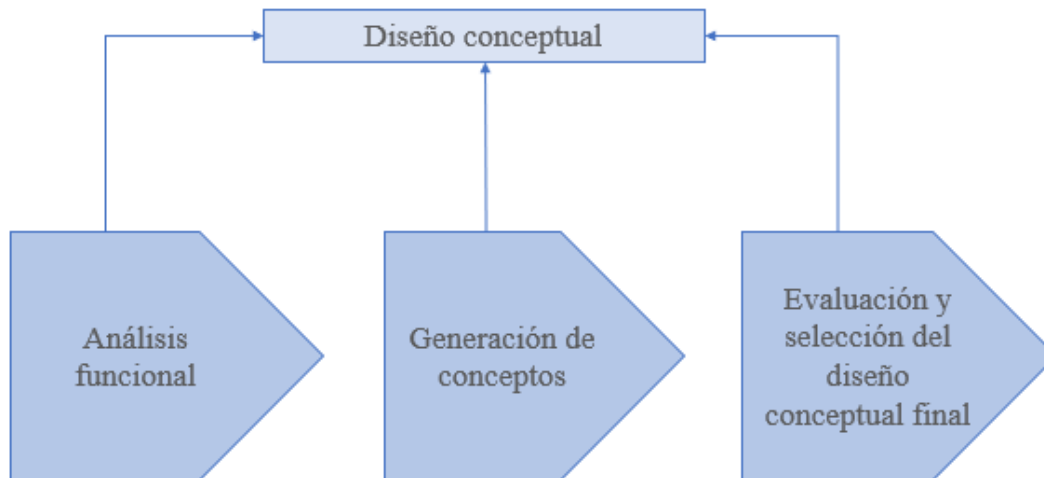
*Tabla. 4 Calificación de los requerimientos*

<b><i>Requerimientos</i></b>	<b><i>Calificación</i></b>
Flujo masico de aire	5
Presión en la tobera de escape	5
Potencia del motor	4
Temperatura en la cámara de combustión	4
Forma	4
Capaz de soportar cargas	4
Ergonómico	4
Durabilidad	3

Estos requisitos definidos, serán tenidos en cuenta a lo largo de todo el proceso de desarrollo del diseño conceptual.

## **5.2 Estudio conceptual**

El diseño conceptual es la segunda fase del proceso de desarrollo de un producto, permite identificar conceptos o principios de solución a un problema por medio de la evaluación de las especificaciones o requerimientos del cliente. Un concepto se define como una idea que es suficientemente desarrollada y analizada para cumplir o brindar una solución a diferentes funciones. El diseño conceptual define en gran medida la calidad y los costos finales del producto, (Ullman, 2008). La estructura y composición del diseño conceptual se observa en la Fig. 14. Empezando con un análisis de funciones y subfunciones por medio de distintas herramientas que facilitan el desarrollo de un producto, siguiendo con un proceso creativo como lo es la generación de conceptos, donde cada integrante dado su experiencia o conocimientos del tema, realiza una composición o generación de ideas que cumplan con la solución de las funciones o subfunciones analizadas en el punto anterior. Finalmente, en la estructura se encuentra la evaluación final, donde se analiza cada concepto generado y se evalúa teniendo en cuenta los requisitos iniciales del cliente (Cogollo, 2012).



*Fig. 14 Estructura diseño conceptual (Peña, 2011)*

### **5.2.1 Análisis funcional**

La primera fase del diseño conceptual es el análisis funcional, su principal objetivo es identificar las funciones y subfunciones que deberá ejecutar el producto. Para realizar el análisis funcional, se cuenta con dos herramientas básicas: El diagrama de caja negra y el árbol de descomposición funcional. El diagrama de caja negra ayuda a establecer las entradas y salidas de materiales, energías e información al producto que se desarrolla. El árbol de descomposición funcional o comúnmente llamada diagrama funcional, es útil para organizar jerárquicamente y por categorías las distintas funciones y subfunciones a realizar por el producto (Peña, 2011). Esta descomposición funcional facilita la siguiente etapa del diseño conceptual que es la generación de conceptos.

El diagrama de caja negra tiene una estructura muy simple, la cual se puede observar en la Fig. 15. Tiene tres opciones de entrada, materiales, energía e información. Su objetivo es obtener una respuesta o una salida con el fin de interactuar cada elemento de la entrada con el producto a desarrollar.

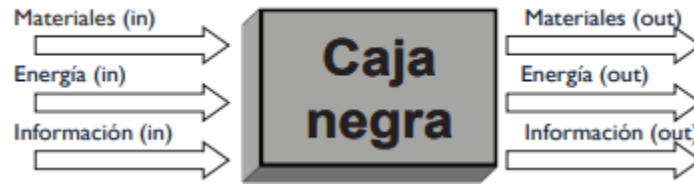


Fig. 15 Estructura de una caja negra (Peña, 2011)

Para el desarrollo de la caja negra del BEMCO se tuvieron en cuenta las siguientes entradas:

- Materiales (in): materiales resistentes.
- Energía (in): energía eléctrica.
- Información (in): integridad del operario.

La caja negra del BEMCO se observa en la Fig. 16. Se tuvo en cuenta la energía eléctrica, ya que el BEMCO va a tener en su mayoría conexiones eléctricas, por lo tanto, se vio la necesidad de analizar la energía eléctrica y obtener su interacción con el BEMCO. Por otra parte, la entrada de información se optó por analizar la integridad del operario, ya que el BEMCO será operado por docentes y/o estudiantes de la Universidad.

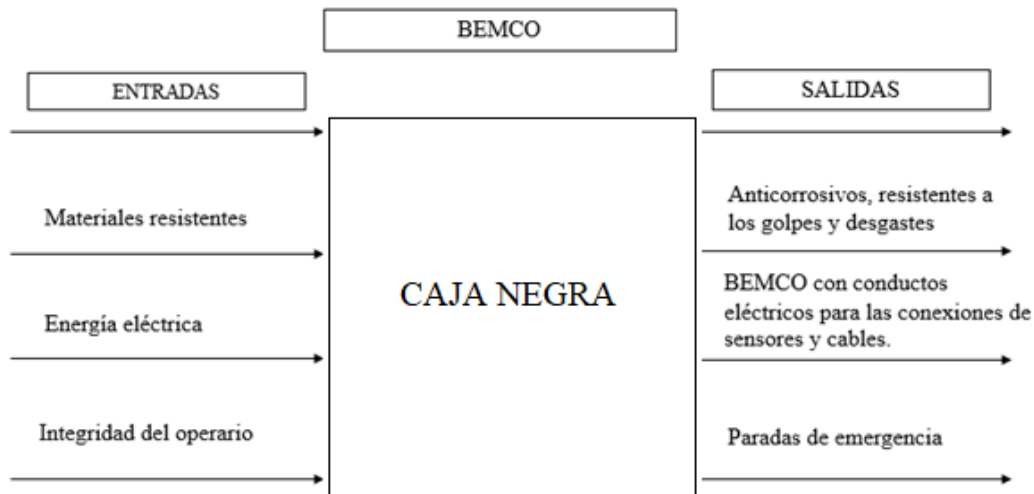


Fig. 16 Caja negra del BEMCO

Con el diagrama de caja negra, se pudo analizar que los materiales que necesita el BEMCO, deben tener propiedades anticorrosivas y resistentes a los golpes, daños o desgastes. También

se obtuvo que el BEMCO debe tener paradas de emergencia para asegurar la integridad del operario.

Después de obtener las respuestas y entender que interacciones son necesarias para el desarrollo conceptual del BEMCO, se realizó el diagrama funcional, se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Teniendo en cuenta los requerimientos o requisitos iniciales del cliente, se evalúan y se obtienen las funciones y subfunciones que el BEMCO debe cumplir para satisfacer los requerimientos del cliente.

- Las funciones específicas se encuentran en los recuadros de color verde
- Las subfunciones a) se encuentran en los recuadros de color azul.
- Las subfunciones b) se encuentran en los recuadros de color rosado (esta subfunción es derivada de la subfunción a). Esta es más específica, y ayuda a tener una idea más clara sobre la función del BEMCO).

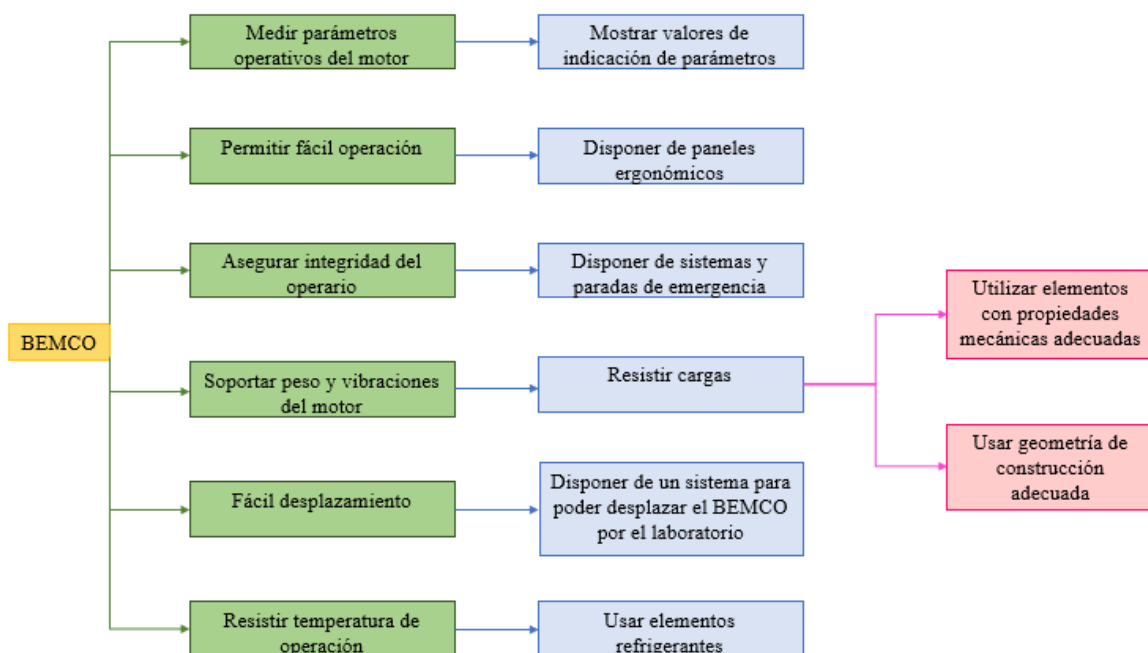


Fig. 17 Diagrama o despliegue funcional del BEMCO



Para el despliegue funcional, se analizó cada requisito del cliente para poder encontrar una función clara, que cumpla con cada uno de los requisitos expuestos por el cliente.

- Medir parámetros del motor: esta función permitirá cumplir con los requerimientos más importantes del cliente, que son: medir flujo másico de aire, presión en la tobera de escape, potencia del motor y temperatura en la cámara de combustión.
- Permitir fácil operación y fácil desplazamiento: el cliente enfatizó en tener un producto ergonómico, estas funciones cumplen con el requisito.
- Soportar peso, vibraciones del motor y resistir temperaturas de operación: para el cliente es importante tener un producto que sea capaz de soportar cargas y que sus materiales sean duraderos, estas funciones permiten cumplir con los requerimientos iniciales del cliente.
- Asegurar integridad del operario: esta función no cumple con ningún requerimiento del cliente, pero en el análisis de la caja negra, se obtuvo que es un parámetro muy importante para tener en cuenta, ya que se debe asegurar la integridad del docente u alumno que opere el BEMCO.

En el despliegue funcional también se encuentran las subfunciones. Estas subfunciones permiten encontrar, materiales, elementos, estructura, forma que brinda una respuesta para que cada función se ejecute de la mejor manera.

### **5.2.2 Generación de conceptos**

Como segunda etapa del diseño conceptual está la generación de conceptos, el cual está basado en aclarar el problema de diseño, desarticularlo en problemas más simples y luego buscar soluciones parciales a cada uno de ellos. Las soluciones parciales se alcanzan por

medio de un correcto mapeo desde las funciones y subfunciones identificando los conceptos aplicables en cada caso (Peña, 2011).

La generación de conceptos se realiza siguiendo dos estrategias de búsqueda, la primera (búsqueda externa) basada en las experiencias, conocimientos, ideas y resultados logrados por otros. Pueden ser tesis de investigación, artículos, revistas o expertos en el tema a consultar; y la segunda basada en generación de conceptos endógena del equipo de proyecto (búsqueda interna). Para llevar a cabo la segunda estrategia de búsqueda es útil apoyarse en procesos o técnicas creativas relacionadas a la generación de conceptos (Peña, 2011). Las técnicas de creatividad pueden ser, la lluvia de ideas, que se caracteriza por suspender críticas y juicios frente a los posibles conceptos que cada uno de los miembros del equipo propone con respecto al producto final, o el método de los seis sombreros del pensamiento, donde cada uno de los integrantes del proyecto toma un determinado rol (basado en sentimientos de gusto o disgusto, en miradas objetivas, críticas, control de procesos de pensamiento) para la generación de conceptos (Eppingers, 2013).

Es importante resaltar que la generación de conceptos se realiza teniendo en cuenta las funciones y subfunciones generadas en el diagrama funcional.

Para el desarrollo de conceptos del BEMCO, primero se realizó la generación de conceptos para cada función, teniendo en cuenta la primera estrategia de búsqueda, ya que tiene como fuerte fundamento la experiencia y conocimientos de diferentes fuentes. En este punto la mayoría de los conceptos generados se obtuvieron gracias a la experiencia, ideas y consejos que aportaron distintos docentes de la facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Cada concepto pasó por un proceso de filtrado para descartar aquellos conceptos que por acción lógica no pueden hacer parte del diseño del

BEMCO, y también se descartan los conceptos que representen alguna desventaja para el BEMCO en materia de operación.

Finalmente, se realizó un proceso creativo como la lluvia de ideas, donde cada integrante del proyecto optó por generar conceptos globales distintos para ser evaluados. El proceso creativo se logró gracias a los conocimientos, ideas, concejos e información adquirida en la búsqueda externa.

En la Tabla. 5 se observa los conceptos para la función principal “medir parámetros del motor” los conceptos generados se realizaron mediante las ideas y concejos aportados por el Ing. (Melo Daza, 2021), gracias a sus conocimientos en el área de circuitos y electrónica, y a su amplia experiencia en proyectos con sensores y celdas de carga eléctrica.

*Tabla. 5 Conceptos generados para la función "medir parámetros del motor"*

<b>Medir parámetros del motor</b>	
<b>Requisitos del cliente</b>	<b>Concepto</b>
Flujo másico de aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudalímetro</li> <li>• Anemómetro</li> <li>• Medidor de rueda alada</li> <li>• Caudal compacto</li> </ul>
Presión en la tobera de escape	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tubo Pitot</li> <li>• Sensor de presión piezorresistivo</li> <li>• Sensor de presión con salida digital</li> </ul>
Potencia del motor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Celda de carga</li> </ul>
Temperatura en la cámara de combustión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Termistores</li> <li>• Termopares</li> </ul>

En este caso no se tomó en cuenta la subfunción de la función “medir parámetros del motor” ya que se vio opcional generar conceptos de cada uno de los parámetros del motor, estos teniendo en cuenta los requerimientos iniciales del cliente, cada concepto se revisará, pero el concepto “sensor de medición de potencia” será el definitivo para el BEMCO ya que no se tendrá en cuenta otro concepto para ese requerimiento del cliente “potencia del motor”.

En la Tabla. 6 se observa los conceptos generados para la función “permitir fácil operación”. Estos conceptos se generaron gracias a la información y conocimientos adquiridos de diferentes fuentes, entre ellas, un estudio del proceso de comunicación en los sistemas “hombre – máquina” (Giovanny, 2015).

*Tabla. 6 Conceptos generados para la función "permitir fácil operación"*

<b>Permitir fácil operación</b>	
<b>Subfunción</b>	<b>Concepto</b>
Disponer de controles ergonómicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Botón pulsador manual</li> <li>• Botón pulsador de pie</li> <li>• Interruptor de palanca</li> <li>• Perillas</li> <li>• Sistema de adquisición de datos</li> </ul>

Los conceptos se generaron teniendo en cuenta la subfunción de la función dado que es más específica y clara para poder llegar a una solución de diseño de esta función. Los conceptos generados son controles sencillos, y de fácil adquisición, ya que se busca que el BEMCO sea fácil de operar.

En la Tabla. 7 se muestra los conceptos para la función “asegurar integridad del operario” se generaron bajo los conocimientos que se tienen sobre seguridad ocupacional.

*Tabla. 7 Conceptos generados para la función "asegurar integridad del operario"*

<b>Asegurar integridad del operario</b>	
<b>Subfunción</b>	<b>Concepto</b>
Disponer de sistemas y/o paradas de emergencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señalización</li> <li>• Alarma contra incendios</li> <li>• Switch apagado de emergencia</li> </ul>

Estos conceptos generados no tendrán “proceso de filtrado” ya que los tres se consideran de suma importancia para asegurar la integridad del operario y de esta manera los tres conceptos son definitivos para el desarrollo del BEMCO, y se garantiza un producto seguro en materia de operación.

En la Tabla. 8 se observa la generación de conceptos para la función “soportar peso y vibraciones del motor”. Se tuvieron en cuenta las subfunciones b) ya que son más claras y específicas facilitando la generación de conceptos. Este proceso se logró a partir del Ing. (Lozano Tafur, 2021) dado su experiencia en el área de materiales de ingeniería. Se aclara que conceptos, como el acero estructural debe pasar por un procedimiento de recubrimiento anticorrosivo, esto se debe tener presente al momento de escoger los conceptos globales.

*Tabla. 8 Generación de conceptos para la función "soportar peso y vibraciones del motor"*

<b>Soportar peso y vibraciones del motor</b>	
<b>Subfunción</b>	<b>Concepto</b>
Utilizar elementos con propiedades mecánicas adecuadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acero inoxidable</li> <li>• Acero estructural</li> <li>• Aleaciones de aluminio</li> <li>• Materiales compuestos</li> </ul>
Usar geometría de construcción adecuada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo vertical con la tobera hacia arriba</li> <li>• Tipo vertical con la tobera hacia abajo</li> <li>• Tipo horizontal</li> </ul>

Para la subfunción b). “usar geometría de construcción adecuada” se tuvo en cuenta los conocimientos adquiridos en el proceso de “marco referencial” donde se conoció que tipo de geometrías son las adecuadas para la construcción de un BEMCO.

Se debe tener en cuenta que existe una variedad de designaciones para los materiales, bien sea, acero, aluminio, etc. En este proyecto solo se especifica el tipo de material, más no el número de designación, ya que esto requiere un análisis y calculo estructural siendo este un proceso de diseño detallado más no conceptual.

En la Tabla. 9 se observa la generación de conceptos para la función “fácil desplazamiento”. Estos conceptos se generaron gracias a la búsqueda de información sobre el tema, ya que no se tenía conocimiento alguno.

Tabla. 9 Generación de conceptos para la función "fácil desplazamiento"

<b>Fácil desplazamiento</b>	
<b>Subfunción</b>	<b>Concepto</b>
Disponer de un sistema para poder desplazar el BEMCO por el laboratorio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema UFE410FLEX</li> <li>• Sistema Canapé</li> <li>• Carro de desplazamiento</li> </ul>

Se debe tener en cuenta que el sistema de desplazamiento debe ser adecuado y acoplado a las aulas de laboratorio de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

En la Tabla. 10 se muestra la generación de conceptos para la función “resistir temperaturas de operación”. Se realizó una investigación respecto a que elementos serian útiles en este caso.

Tabla. 10 Generación de conceptos para la función "resistir temperatura de operación"

<b>Resistir temperatura de operación</b>	
<b>Subfunción</b>	<b>Concepto</b>
Usar elementos refrigerantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ventilador</li> <li>• Aire acondicionado</li> <li>• Nitrógeno líquido</li> </ul>

### 5.2.3 Proceso de filtrado

Se entiende como proceso de filtrado a un conjunto de métodos que se encargan de descartar aquellos conceptos que representan una desventaja para el BEMCO en materia de operación, representan altos costos o por acción lógica no pueden hacer parte del diseño del BEMCO.

En la Tabla. 11 se observan los conceptos descartados en este proceso. El anemómetro y el medidor de rueda alada fueron descartados ya que representan una desventaja operativa para el BEMCO, porque no son muy precisos y su uso es manual, dependiendo también de la precisión de la persona que lo utilice, es por esto que en esta clase de dispositivos se recomienda realizar más de tres mediciones para obtener un promedio. Se descartó el sistema Canapé porque es demasiado robusto y costoso, y el nitrógeno líquido se descartó por acción

lógica, no se cree un elemento que se pueda utilizar como elemento refrigerante en el BEMCO, porque su mala manipulación puede causar riesgos para la salud, además es necesario de un contenedor especial, lo que causaría mayores costos en la realización del BEMCO.

*Tabla. 11 Proceso filtración de conceptos*

<b>Proceso de filtrado</b>	
<b>Subfunción</b>	<b>Concepto</b>
Flujo másico de aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anemómetro</li> <li>• Medidor de rueda alada</li> </ul>
Disponer de un sistema para poder desplazar el BEMCO por el laboratorio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema Canapé</li> </ul>
Usar elementos refrigerantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nitrógeno líquido</li> </ul>

#### **5.2.4 Conceptos globales**

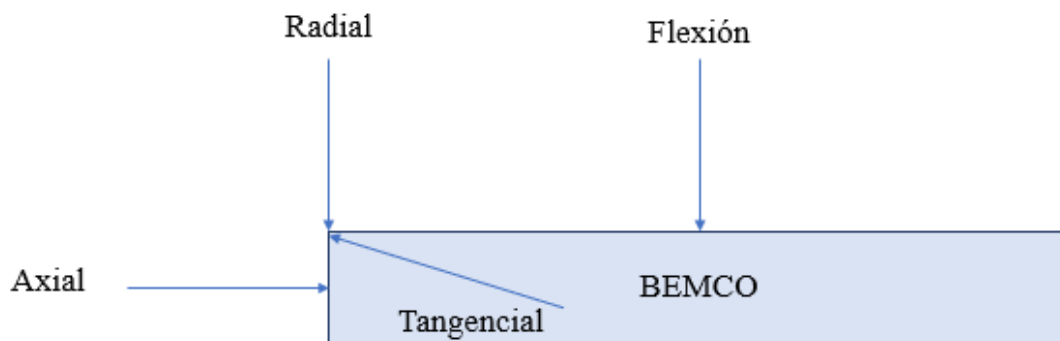
El proceso de generación de conceptos es una actividad divergente que trae como consecuencia el desarrollo de varias alternativas parciales de solución. El manejo de este gran número de soluciones sería muy difícil, y demorado si no se utilizan métodos de creatividad o métodos que ayuden a organizar e integrar las soluciones parciales en conceptos globales (Peña, 2011). Un concepto global es el resultado de la combinación de varios conceptos para formar un único producto, se debe tener varios conceptos globales o generales para ser evaluados uno por uno y escoger el que cumpla con los requerimientos impuestos por el cliente, este último siendo el diseño global dominante (Ullman, 2008).

Para el desarrollo de los conceptos globales se optó por la lluvia de ideas como método creativo, ya que se caracteriza porque toda idea es aceptada y documentada. Suspende la crítica y se debe tener en cuenta todos los conceptos globales que cada uno de los miembros del equipo considere como concepto dominante para ser evaluados. Los conceptos globales

se desarrollan basándose en el conocimiento adquirido en la búsqueda “externa” (Peña, 2011).

Antes de realizar la lluvia de ideas, se establecieron las cargas a las que estará sometida la estructura del BEMCO, esto con el fin de poder seleccionar el material adecuado.

Teniendo en cuenta las características físicas de los motores G y K como lo es su peso, para el motor G un peso aproximadamente de 330 g y para el motor K un peso aproximadamente de 1400 g (Nakka, 1997). De acuerdo con el Ing. (Rodríguez Pantano, 2021), Se propone que la estructura estará sometida a cargas estáticas (peso del motor) y cargas dinámicas (vibraciones del motor). Los esfuerzos a los que está sometida la estructura son: esfuerzo de flexión y tres esfuerzos dinámicos; radial, axial y tangencial generados cuando el motor está en funcionamiento (Mayori, 2017). Se puede observar en la Fig. 18 los esfuerzos a los que estará sometido la estructura del BEMCO.



*Fig. 18 Diagrama de cuerpo libre del BEMCO*

El esfuerzo de flexión provocado por el peso del motor, deformarían el BEMCO y este disminuiría su vida útil, problema que se requiere evitar. La carga axial y radial son generadas por las vibraciones del motor, y la carga tangencial es producida por el torque que genera el motor. Se aclara que para un estudio más exacto se debe realizar un análisis estructural (paso del diseño detallado) y de esta manera definir si estas cargas si afectarían la estructura del



BEMCO, por lo que las cargas anteriormente nombradas solo son una propuesta conceptual, pero se tendrán en cuenta para la lluvia de ideas.

#### **5.2.4 Lluvia de ideas**

Mediante esta técnica de creatividad se generaron los conceptos globales del BEMCO. Cada integrante desarrolló tres ideas distintas, teniendo en cuenta los conceptos, definiciones, experiencia obtenida durante la realización de este proyecto y consejos de algunos docentes de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Fundación Universitaria Los Libertadores. En la Tabla. 12 se observa la lluvia de ideas, donde se destaca en la totalidad de los conceptos globales, el uso del sistema UFE410FLEX, como sistema de desplazamiento para el BEMCO, siendo más opcional, económico y práctico, que los otros conceptos generados para esta función del BEMCO, también el uso de un ventilador, como sistema de refrigeración se consideró en todos los conceptos globales, ya que su instalación y mantenimiento son más sencillos y económicos, que el uso de un sistema de aire acondicionado. El sistema de emergencias de igual manera se consideró para todos los conceptos, ya que se busca siempre la seguridad del operario y/u operarios, al presentar un sistema de emergencia para todos los conceptos, se garantiza en gran parte la calidad del producto, siendo este para uso educativo. La celda de carga se seleccionó como único concepto para cumplir con el parámetro “medir potencia del motor” y por ende se encuentra en todos los conceptos globales. La celda de carga es una estructura diseñada para soportar cargas de compresión, tensión y flexión, esta celda permite medir el empuje que genera el motor (ERTIZA, 2019). Al obtener esta fuerza gracias a la celda de carga se facilita el cálculo de la potencia generada del motor y de esta manera se cumple el requisito inicial. Este

dispositivo será de tipo “s” ya que este tipo de celdas se caracteriza por ser uno de los más precisos.

Tabla. 12 lluvia de ideas

<b>LLUVIA DE IDEAS</b>						
<b>Generación de conceptos</b>	<b>Concepto 1</b>	<b>Concepto 2</b>	<b>Concepto 3</b>	<b>Concepto 4</b>	<b>Concepto 5</b>	<b>Concepto 6</b>
Caudalímetro	X	X	X	X		
Caudal compacto					X	X
Tubo Pitot	X		X	X	X	
Sensor de presión piezorresistivo		X	X			
Sensor de presión con salida digital						X
Celda de carga	X	X	X	X	X	X
Termistores	X		X		X	
Termopares		X	X	X		X
Botón pulsador manual	X	X	X	X		X
Botón pulsador de pie				X		
Interruptor de palanca					X	X
Perillas	X	X	X			
Sistema de emergencias	X	X	X	X	X	X
Acero inoxidable	X	X	X			X
Acero estructural				X	X	
Tipo vertical con la tobera hacia arriba		X				
Tipo vertical con la tobera hacia abajo	X		X	X	X	
Tipo horizontal						X
Sistema UFE410FLEX	X	X	X	X	X	X
Sistema de adquisición de datos	X	X	X	X	X	X
Ventilador	X	X	X	X	X	X

### **Concepto 1**

El uso de caudalímetros es el más común para mediciones de flujo masico, ya que proporciona una salida digital tanto para la cantidad total del caudal como para la velocidad del fluido, permite la medición con fluidos agresivos y fluidos no conductores, incluidos los gases, ofrecen mediciones muy puntuales y su mantenimiento e instalación son sencillos y económicos (Villajulca, 2010). La selección del tubo Pitot se da por la facilidad que requiere

su instalación y, sobre todo, porque se trata de una herramienta relativamente económica y que presenta diferentes modelos en cuanto al tamaño (Rodríguez J. , 2010). De hecho, se podría desarrollar el tubo Pitot de manera fácil y casera y sus pruebas de medición se podrían realizar en el túnel de viento que dispone la Fundación Universitaria Los Libertadores.

Los termistores son dispositivos muy utilizados para medir temperaturas, en un amplio rango de valores. Su fácil acceso en el mercado, su economía y su variación de tipos, como, termistores tipo perla, tipo sonda y axiales, los hacen muy atractivos para medir variaciones en la temperatura, son dispositivos tan buenos que destaca su uso en la electrónica de los automóviles (Mecafenix, 2018). En este concepto general se destaca el uso de botones pulsadores manuales y perillas, ya que su instalación es muy sencilla, y la forma de operarlos, los hace muy viables para los requerimientos del cliente.

Se va a hacer uso de los tres conceptos para el sistema de emergencia, como se mencionó en la generación de conceptos es importante que los tres estén en el BEMCO, ya que se necesita una ruta de señalización en la parte operativa del BEMCO y en la parte no operativa, para que las personas que no están capacitadas para su operación guarden una distancia, para evitar accidentes. Una alarma contra incendios ya que se trabajará con motores de combustible sólido y su mala operación puede ocasionar incendios. Por si algún dispositivo del BEMCO llegase a fallar es importante tener un Switch para apagar y/o finalizar la operación del BEMCO de manera urgente.

El acero inoxidable se consideró en este concepto y en la mayoría, primero por ser un material que no requiere de mucho mantenimiento y segundo por su gran resistencia al calor, resistencias mecánicas que soportan grandes pesos y vibraciones, gran durabilidad y resistencia a ambientes húmedos. La composición del acero inoxidable permite que la

suciedad y agentes externos como el polvo y las bacterias no queden adheridos a la superficie (Rago, 2018).

La selección de la geometría del BEMCO tipo vertical, con la tobera hacia abajo se consideró ya que es la forma de diseño más usada en C.E.A. Se debe tener en cuenta que en este tipo de BEMCO se debe diseñar un deflector de llama, ya que la misma impacta contra el suelo. Para las funciones “fácil desplazamiento y resistir temperaturas de operación” se dispuso de los sistemas más sencillos de instalar y de poco mantenimiento, como lo es el sistema UFE410FLEX que, comparándolo con un carro de desplazamiento, es mucho más pequeño y no requiere de constante mantenimiento, y un ventilador como sistema de refrigeración ya que en el mercado se encuentran ventiladores pequeños, económicos y disponen de una instalación sencilla en comparación con un sistema de aire acondicionado, ya que su instalación es más compleja y costosa. El sistema de adquisición de datos se encuentra en todos los conceptos, ya que su uso es importante para recopilar, documentar y analizar, toda la información obtenida por los sensores. Otro dispositivo que se encuentra relacionado con todos los conceptos es la celda de carga tipo “s”. Esta celda es un transductor de fuerza; es fácil de operar, posee gran adquisición en el mercado y aunque inicialmente está diseñado para medir “peso” puede usarse para medir distintas fuerzas (Rodríguez M. , 2001). En este caso será utilizado para medir el empuje que genera los dos distintos tipos de motor cohete, y con esta fuerza lograr calcular la potencia de los motores tipo G Y k.

### **Concepto 2**

En este concepto a diferencia del concepto 1 destaca el uso de un sensor piezorresistivo, ya que dispone de diversas sensibilidades, siendo capaz de medir presiones altas y bajas. El sensor piezorresistivo es muy usado en los automotores para medir, nivel de aceite, nivel de gas, detección de presión de aire. Es un sensor de bajo costo con tecnología avanzada en

procesamiento, su instalación es sencilla y no requiere de costos mantenimientos (técnicos, 2004). Lo que hace al sensor piezorresistivo muy útil para el diseño del BEMCO.

También se destaca el uso de termopares, ya que es un instrumento industrial, demasiado económico, intercambiable, tiene conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas (Jalloul, 2014).

Se considero en este concepto el banco estático tipo vertical con la tobera hacia arriba, ya que se encuentran escasos diseños de este tipo de BEMCO, sería una oportunidad para diseñar un producto que satisfaga las necesidades del cliente e innovador y escaso en el mercado.

### **Concepto 3**

En este concepto se tuvo la idea de unir dos sensores de presión y dos sensores de temperatura, con el fin de poder generar no solo un diseño que cumpla con los requisitos del cliente, si no presentarle un producto que tenga más funciones, ejemplo midiendo la temperatura en la cámara de combustión con un sensor y con otro distinto medir la temperatura de operación del motor, ya que los dos sensores tienen diferentes funciones, tamaños y operabilidad; entonces se analiza en cada área que sensor es más optimo, presentando un diseño nuevo, innovador, preciso, de alcance y que cumpla con los requerimientos iniciales.

### **Concepto 4**

En este concepto se destaca el uso de un pulsador manual y de pie, utilizados para activar y desactivar funciones del BEMCO como para casos de emergencia; el pulsador de pie tiene como característica que si el operador tiene las manos ocupadas puede utilizar el botón de pie siendo muy útil y económico (Giovanny, 2015). Se seleccionó el acero estructural para este concepto, ya que es un material que puede soportar grandes esfuerzos y dar mayor

seguridad a las estructuras, brinda ductilidad y tenacidad, el material puede sufrir deformidades sin romperse, siendo un aspecto para tener en cuenta ya que el BEMCO debe soportar grandes vibraciones del motor. El acero estructural tiene como ventaja poder hacer uniones o conexiones mediante soldadura (ACERO, 2016).

### **Concepto 5**

Se considero el caudal compacto ya que es un sensor que logra realizar mediciones directas de la velocidad del flujo de aire y gases con dirección simultánea a la del flujo. El montaje de este sensor de caudal compacto resulta sencillo gracias a su compacta construcción en forma de tubo, pero también por el sencillo montaje con un sólido orificio (PCE, 2011). Estos sensores de flujo ofrecen durabilidad, fácil mantenimiento y monitorización de forma segura. En este concepto el interruptor de palanca reemplaza los pulsadores y perrillas, ya que este se utiliza en operación que requieren alta velocidad y puede ser de dos o tres posiciones, siendo más opcional en el diseño del BEMCO (Giovanny, 2015).

### **Concepto 6**

Se considero el sensor digital de presión en este concepto, ya que se puede utilizar en diferentes profundidades y grandes alturas. Dispone de un circuito integrado que permite mantener un modo bajo de consumo de energía eléctrica, con lo que puede ser utilizado en productos que deban operar durante largos periodos de tiempo (Alsina, 2019). Lo que lo hace útil para el BEMCO, si se considera que puede estar encendido extensos periodos de tiempo. El uso de interruptores de palanca combinado con botones pulsadores manuales se da ya que el botón puede complementar las funciones de la palanca y/o viceversa.

Se plantea del uso de una geometría del BEMCO tipo vertical, ya que, al no poseer deflector de llama, es más sencilla su construcción considerando menos uniones de soldadura, pero si se debe tener en cuenta una base (mesa) adicional.

### **5.3 Despliegue función de calidad y evaluación final**

Es el método que permite, facilita y organiza los procesos de adquisición y análisis de la información necesaria para el desarrollo creativo de un producto. La QFD es la herramienta para desarrollar dicho método, está compuesta por varias regiones de trabajo por matrices de evaluación. En la matriz principal se evalúa el tipo de relación que se establece entre los requerimientos del cliente y las especificaciones de ingeniería, la cual puede ser fuerte, media o débil (Peña, 2011).

#### **Relación funcional**

Las relaciones funcionales se utilizan para conocer la relación que tiene cada concepto con los requerimientos indicados por el cliente (Cogollo, 2012).

Las relaciones se identifican de la siguiente manera:

⊕ Relación fuerte con los requerimientos del cliente, su valor numérico es 5.

○ Relación moderada con los requerimientos del cliente, su valor numérico es 3.

△ Relación débil con los requerimientos del cliente, se valor numérico es 1.

Estas relaciones también se utilizaron en el techo de la casa de la calidad, con el fin de evaluar y diferenciar las fortalezas y debilidades de cada concepto generado.

#### **Evaluación**

Se divide en tres secciones:

- Importancia absoluta, se obtiene multiplicando cada valor de la columna de importancia por cada relación funcional evaluada para los diferentes conceptos, luego de las multiplicaciones, se suman y de esta manera se obtiene la importancia absoluta de cada concepto respecto a los requerimientos iniciales (Mantilla, 2020).

- Relación relativa, se obtiene de la división de cada valor absoluto (relación absoluta) por el valor total de la suma de todos los valores absolutos, y esto multiplicado por cien (Mantilla, 2020).
- La evaluación de ingeniería es la más importante, es la que define cual concepto global tiene mayor importancia o el que mayor cumple con los requerimientos del cliente, se realiza, evaluando cada concepto global generado teniendo en cuenta los valores numéricos de importancia relativa, se enumeran de mayor importancia (1) a menor importancia (5) (Mantilla, 2020).

En la Tabla. 13 se observa la QFD realizada para la evaluación de cada concepto. El concepto 1 tiene la importancia relativa más alta, su evaluación de ingeniería se enumeró con el número 1 dado que es el concepto global más importante en comparación con los demás conceptos, el segundo concepto que recibió la segunda calificación más alta fue el concepto 4, teniendo en cuenta su importancia relativa. Los conceptos 3 y 5, aunque tienen una evaluación distinta en las relaciones funcionales, obtuvieron un puntaje absoluto y relativo, similar, es por eso que los dos conceptos se evaluaron con el número 3 en importancia de ingeniería, y los dos conceptos con la evaluación de ingeniería más baja fueron los conceptos 2 y 6 con una respectiva importancia de ingeniería de 4 y 5 según los valores obtenidos en importancia absoluta y relativa. En el techo se observa la evaluación diferencial de cada concepto, encontrando así que concepto puede o no complementar la idea del otro concepto; se observa que el concepto 1 tiene una relación fuerte con el concepto 4, el 2 y el 6 tienen una relación fuerte entre ellos, aunque tiene una relación débil con los demás conceptos globales generados.



Tabla. 13 QFD del BEMCO

Diseños Concepeutales		Importancia	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3	Concepto 4	Concepto 5	Concepto 6
Requisitos del cliente								
1	Flujo másico de aire	5	⊗	⊗	⊗	⊗	○	○
2	Presión en la tobera de escape	5	⊗	○	○	⊗	⊗	Δ
3	Potencia del motor	4	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
4	T. en la cámara de combustión	4	○	Δ	○	Δ	○	Δ
5	Forma	4	⊗	Δ	⊗	⊗	⊗	Δ
6	Capaz de soportar cargas	4	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
7	Ergonómico	4	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
8	Durabilidad	3	⊗	⊗	⊗	○	○	⊗
9	Económico	3	⊗	Δ	Δ	○	○	Δ
Evaluación	Importancia absoluta		172,0	126	150,0	152,0	150,0	106
	Importancia relativa %		25,1	18,4	21,9	22,5	21,9	15,5
	Evaluación de ingeniería		1	4	3	2	3	5

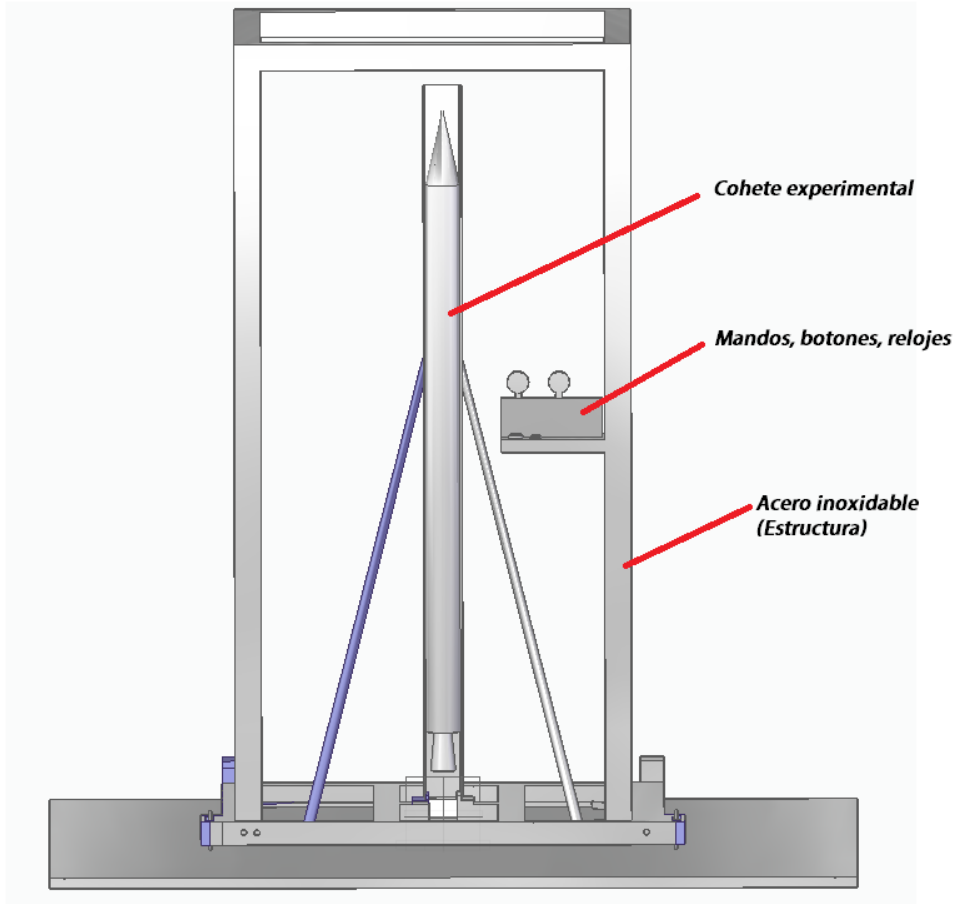
A continuación, se explica cada concepto y su respectiva evaluación. Se diseñaron 3 bocetos respectivamente de los conceptos 1, 2 y 6 con el fin de poder visualizar la diferencia geométrica que tiene cada concepto, ya que en estos conceptos se generó una idea distinta de la forma característica del BEMCO.

### Concepto 1

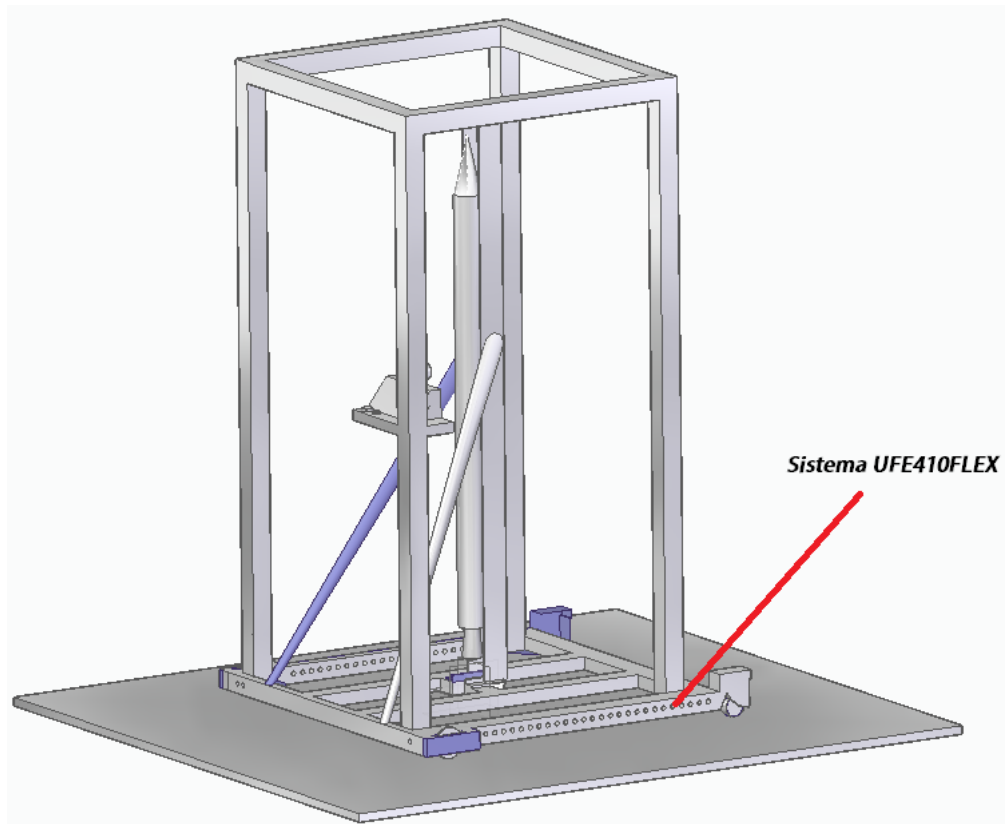
Este concepto tiene relaciones funcionales fuertes (5) en la mayoría de los requisitos, el uso de perillas y botones manuales, lo hacen un diseño demasiado ergonómico, cumpliendo en cabalidad con el requerimiento “Ergonómico”. Su estructura compacta en acero inoxidable hace que el BEMCO pueda resistir la corrosión, oxidación y altas temperaturas de operación, lo que lo hace tener una relación fuerte con los requerimientos “capaz de

soportar cargas” y “durabilidad”. Su geometría tipo vertical con la tobera hacia abajo, brinda la forma más practica para estudiar el comportamiento del cohete y los parámetros del motor, ya que proporciona la posición exacta en la que son lanzados los cohetes aeroespaciales. Es por esto que recibió una calificación de relación fuerte con el requerimiento “forma” (se debe tener en cuenta que para este tipo de geometría se debe construir un deflector de llama).

Los requerimientos “flujo másico de aire”, “presión en la tobera de escape” y “potencia del motor” tienen una relación fuerte con este concepto, ya que el uso del caudalímetro permite medir de una manera sencilla y precisa toda la masa de aire que entra al cohete, su uso comercial lo hace un elemento económico y de fácil mantenimiento, se destaca también en este concepto el uso del tubo Pitot como instrumento de medición, es bastante económico, fácil de implementar y adecuados para una gran variedad de condiciones ambientales, incluyendo temperaturas extremadamente altas y una amplia gama de presiones, permitiendo cumplir el segundo alcance de este proyecto. Para el requerimiento “temperatura en la cámara de combustión” se consideró una relación media (3) aunque el uso de termistores es bastante económico y comparados a los termopares son mucho más precisos, pero siguen siendo un elemento bastante sensible lo que proporcionaría mediciones no tan claras, siendo esto una desventaja. Este diseño conceptual consta de piezas, sensores y materiales muy económicos y asequibles en el mercado, teniendo en cuenta que los costos en manteamiento serían muy bajos, es por esto que tiene una relación funcional fuerte con el requerimiento “que sea económico”.



*Fig. 19 vista frontal del boceto concepto 1*



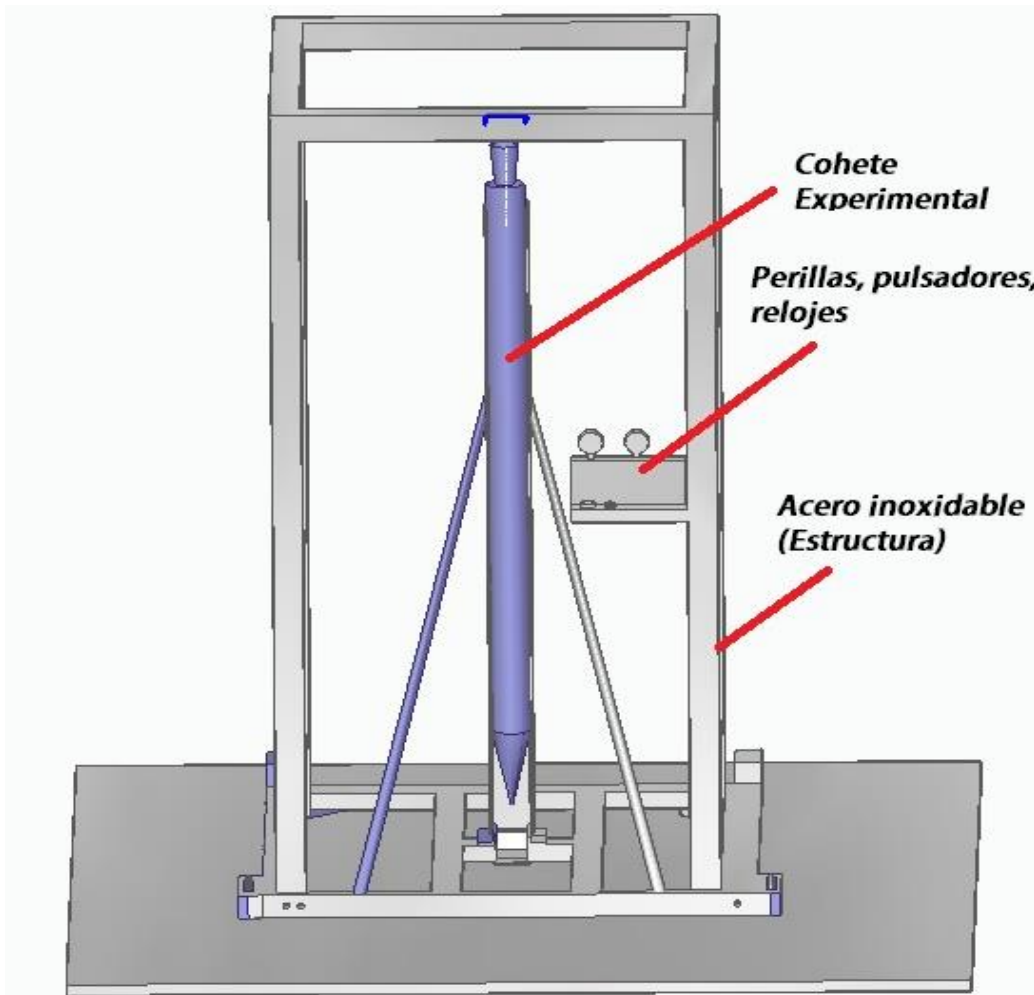
*Fig. 20 vista general del boceto concepto 1*

### **Concepto 2**

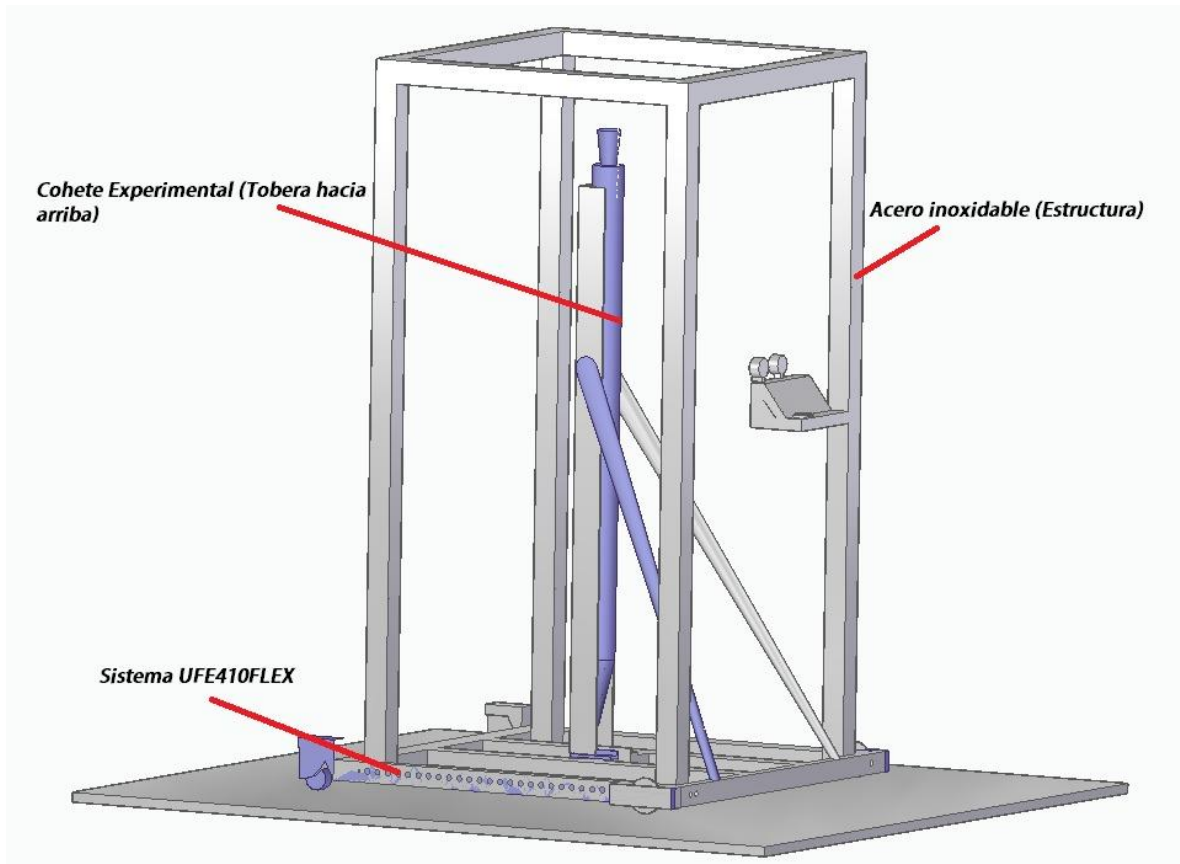
A diferencia del primer concepto, este cuenta con una geometría tipo vertical con la tobera hacia arriba, siendo esta la forma menos usada, primero por el riesgo que representa que la llama se desprenda hacia arriba a la altura del rostro ocasionando graves accidentes y segundo que el cohete apunte al suelo permite una simulación incorrecta comparándolo con el lanzamiento ideal de los cohetes aeroespaciales. Es por esto que el requerimiento “forma” en este concepto tiene una relación débil (1). El requerimiento “presión en la tobera de escape” tiene una relación funcional media, ya que este concepto propone el uso de sensores de presión piezorresistivo, aunque el sensor proporciona una tecnología madura de procesamiento, puede alcanzar diferentes niveles de presión, se pueden obtener diversas sensibilidades y se destaca su uso comercial, comparándolo con un tubo Pitot su precisión es regular. Para el requerimiento “temperatura en la cámara de combustión” su relación es débil,

teniendo en cuenta que este concepto se destaca por el uso de termopares, es un instrumento de gran tamaño, costoso, sensible e impreciso representando desventajas a la hora de calcular temperaturas.

Este concepto posee piezas y sensores muy costosos, de gran mantenimiento e imprecisos, lo que brinda una relación funcional débil en cuanto al requerimiento “que sea económico”.



*Fig. 21 vista frontal del boceto concepto 2*



*Fig. 22 vista general del boceto concepto 2*

### **Concepto 3**

Este concepto de cierta manera combina las características de los dos primeros conceptos, aunque utiliza piezas precisas y económicas como el tubo Pitot y los termistores, sigue con el uso de sensores muy costosos e imprecisos como el sensor piezorresistivo y los termopares. Obteniendo una relación funcional media en los requerimientos “presión en la tobera de escape” y “temperatura en la cámara de combustión”. Bien se puede caracterizar este concepto por la innovación que brinda al poder medir la presión y temperatura en diferentes puntos del cohete, la desventaja clara es que se congestionaría la parte eléctrica con tantos instrumentos. Además, la adquisición de todos estos elementos electrónicos es un costo demasiado elevado, por lo que recibe una relación funcional débil con el requerimiento “que sea económico”.

#### **Concepto 4**

El concepto 4 tiene una relación fuerte con el requerimiento “ergonómico” ya que no solo tiene pulsadores manuales, si no pulsadores de pie, optimo cuando el operario tiene las manos ocupadas y le urge realizar una operación en el BEMCO. En este diseño se propone una estructura formada por acero estructural, aunque este tipo de material hace que el BEMCO sea resistente a vibraciones, peso, tensión, compresión, brinda una gran rigidez y elasticidad, pero el material no es resistente a corrosiones y/o oxidación, lo que brinda que tenga una relación fuerte con el requerimiento “capaz de soportar cargas” y una relación media con el requerimiento “durabilidad”.

Al utilizar acero estructural representa una gran desventaja en cuestión de costos, mantenimiento e instalación, ya que este material debe pasar por un proceso químico (aplicando pinturas anticorrosivas) para que su vida útil no se vea afectada, entonces esto implica que tenga una relación media con el requerimiento “que sea económico”. El uso de termopares como se ha mencionado representa una desventaja para el requerimiento “temperatura en la cámara de combustión”.

#### **Concepto 5**

Al contar con un sistema de interruptor de palancas, hace que este concepto cuente con una relación fuerte con el requerimiento “ergonómico”. Este concepto cuenta con la similitud de usar acero estructural por lo que sus requerimientos “capaz de soportar cargas” y “durabilidad” tienen una relación media, en cuanto al requerimiento “flujo másico de aire” este concepto se destaca por el uso de caudal compacto, aunque es un elemento muy preciso, sencillo de instalar y fácil mantenimiento, resulta ser un instrumento bastante costoso, ya que su uso es más para el área industrial. El caudal compacto presenta una desventaja y es la necesidad de un mantenimiento prolongado para su continua operación en comparación con

el caudalímetro que no necesita de tantos procedimientos para mantener su vida útil, es por esto por lo que recibe una relación media.

### **Concepto 6**

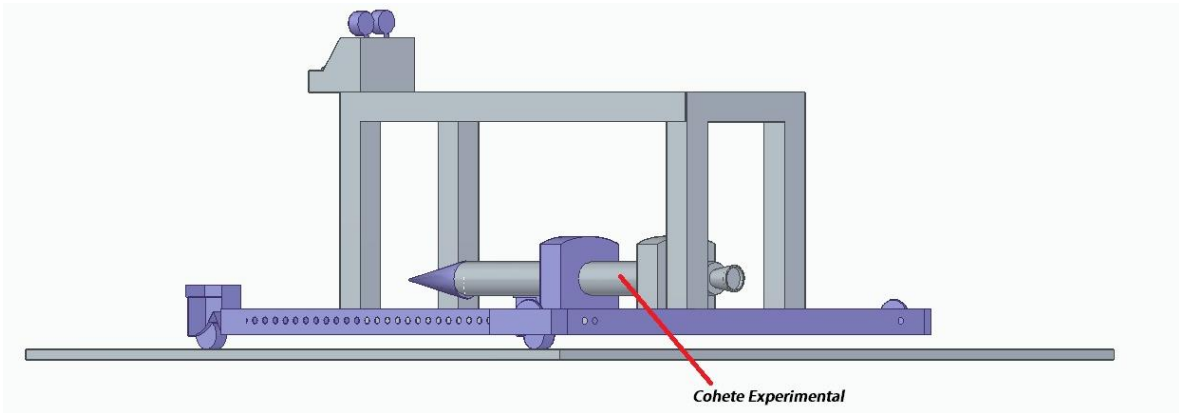
Este concepto combina los pulsadores manuales y el sistema de interruptor de palancas, lo que lo hace un diseño bastante ergonómico permitiendo al operario usar el BEMCO de manera sencilla, por eso su relación funcional es fuerte con el requerimiento “ergonómico”.

Al tener una estructura formada por acero inoxidable comparte con los otros conceptos las relaciones fuertes en cuanto a los requerimientos “capaz de soportar cargas” y “durabilidad”.

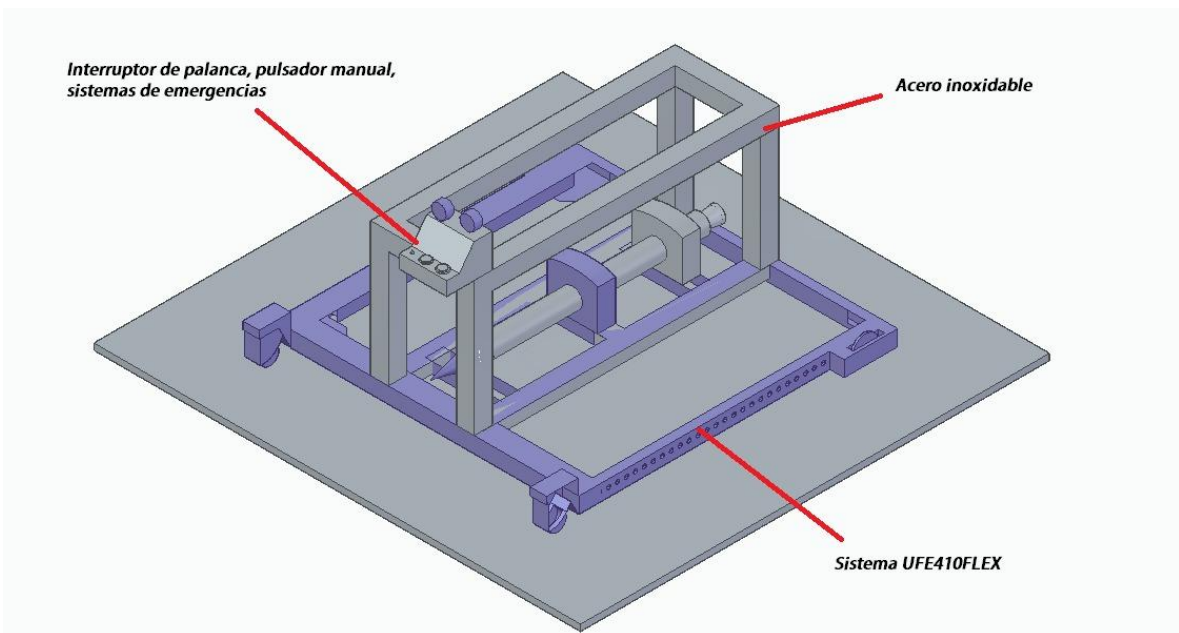
Su forma horizontal representa una desventaja en costos y en operación, ya que para este tipo de geometría es necesario construir una mesa especial que sostenga el BEMCO y se recomienda que este tipo de forma geométrica sea utilizada en espacios amplios, por lo que se puede soltar el cohete del banco de pruebas y ocasionar accidentes, por eso su relación con el requerimiento “forma” es débil. Igual que el concepto 5 maneja para el requerimiento “flujo masico” caudal compacto. En esta ocasión se plantea para el requerimiento “presión en la tobera de escape” un sensor de presión con salida digital, este sensor es muy sensible y representa una desventaja para el BEMCO, su instalación aumenta la cantidad de cables, placas e instrumentos electrónicos para la conexión de este elemento, representando de esta manera una relación débil con este requerimiento.

El uso de termopares, el aumento en conexiones electrónicas para el sensor digital y la instalación de un base o mesa especial para el BEMCO proporciona un aumento considerable en los costos de producción, por lo que el requerimiento “que sea económico” tiene una relación débil.





*Fig. 23 vista general del boceto concepto 6*



*Fig. 24 vista general del boceto concepto 6*

Como se mencionó en el desarrollo de la evaluación de conceptos, el concepto número uno obtuvo la mayor ponderación en cuanto a importancia absoluta y relativa, ya que la mayoría de sus componentes eléctricos, forma, estructura y geometría tienen una relación fuerte con los requerimientos iniciales del cliente, por lo que finalmente este diseño conceptual, se seleccionó como el diseño conceptual dominante del proyecto.

## Capítulo 6

### Análisis de resultados

El diseño conceptual global dominante es el concepto 1, se seleccionó el acero inoxidable como material dominante de este concepto, ya que este posea una mayor resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas, tiene un mayor índice de endurecimiento mecánico, siendo un material resistente a los golpes, dúctil y no requiere de un gran mantenimiento, el acero inoxidable permitió que el concepto 1 cumpla con el requerimiento “durabilidad”. Se selecciono el tubo Pitot por su forma característica y su gran precisión en cuestiones de medidas de presión. La forma geométrica de este concepto es la indicada permitiendo no solo una fácil operación, sino también brinda seguridad operacional, ya que posee un deflector de llama para evitar quemaduras, siendo el gran diferencial entre los conceptos 2 y 6, ya que estos poseen una forma geométrica distinta (tipo horizontal y tipo vertical con la tobera hacia arriba). La implementación de termistores, caudalímetro y la celda de carga no solo permiten cumplir con la medición de parámetros operativos que requiere el cliente, sino también logra cumplir con el requerimiento “que sea económico” ya que estos dispositivos son de fácil adquisición y no necesitan de un mantenimiento periódico ni exhaustivo, y además poseen de una fácil instalación. Este concepto se caracteriza por la combinación de perillas, y botones pulsadores manuales, logrando ser un equipo bastante ergonómico, su sistema UFE410FLEX y su sistema de seguridad optimo le brinda gran seguridad operacional al docente o al encargado de operar el BEMCO. En la Tabla 14 se observan los materiales del concepto 1

Tabla 14 materiales concepto 1

<b>Materiales concepto 1</b>	
1	Caudalímetro
2	Tubo Pitot
3	Celda de carga
4	Termistores
5	Botón pulsador manual
6	Perillas
7	Sistema de emergencia
8	Acero inoxidable
9	Sistema UFE410FLEX
10	Sistema de adquisición de datos
11	Ventilador

Al generar distintas ideas (conceptos) la casa de calidad (HQ), permitió realizar una evaluación y comprensión de los 6 conceptos generados en la lluvia de ideas, teniendo en cuenta los requerimientos del cliente (Fundación Universitaria Los Libertadores). Se comprendió que los conceptos diseñados con acero estructural representan una desventaja económica por el proceso anticorrosivo al que debe ser tratado, y es un material que representa menos vida útil en comparación con el acero inoxidable, esto en función de posible corrosión y/u oxidación del material. La geometría del BEMCO es clave y se logró analizar con la HQ, donde los diseños con una geometría distinta a la recomendada (tipo vertical con la tobera hacia abajo) obtuvieron desventaja, ya que los demás tipos, aunque son viables,

representan riesgos para el operario. Si bien los diferentes sensores electrónicos para medir la presión en la tobera de escape son buenos, el tubo Pitot se destaca por su uso en la industria aeronáutica (su gran precisión) representando una ventaja sobre los demás dispositivos, generando así que los conceptos que no cuentan con este dispositivo tuvieran una calificación menor en comparación con los que sí.

# Capítulo 7

## Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

- Se realizó el diseño conceptual de un banco de pruebas para motores de cohetes tipo G y K, el cual servirá de base para el desarrollo de un diseño detallado y final para la Fundación Universitaria Los Libertadores.
- A partir de un estudio conceptual, el cual tiene en cuenta un análisis funcional, la generación de conceptos y el despliegue de la casa de la calidad fue posible establecer que el acero inoxidable gracias a sus propiedades físicas y mecánicas es el material ideal para la construcción del BEMCO ya que soporta los esfuerzos generados por este. El detalle de esta selección fue presentado en el Capítulo 5.
- Gracias al análisis funcional y las demás herramientas del diseño conceptual, se logró comprender la funcionalidad del banco, y los diferentes procesos del diseño conceptual lograron facilitar la generación de ideas, como lo fue la lluvia de ideas, proceso que permitió la investigación de diferentes dispositivos electrónicos y mecánicos, pero este proceso creativo (lluvia de ideas) también facilitó el análisis de los distintos sensores de medición, permitiendo la selección adecuada de estos dispositivos y de esta manera lograr cumplir con los requerimientos iniciales.
- A través de una encuesta realizada a los profesores del programa de Ingeniería Aeronáutica fue posible definir las características, identificar las necesidades y

parámetros de operación requeridos para el funcionamiento del BEMCO. El detalle de esta selección fue presentado en la sección 5.2.2

- De acuerdo con el estudio realizado en la selección de los materiales, bajo los conceptos globales fue posible identificar las cargas estáticas a las cuales estará sometido el motor, y las cargas dinámicas cuando éste se encuentre en operación. Así como también están las cargas radiales y axiales que son generadas por las vibraciones del motor, y las cargas tangenciales que son producidas por el torque que genera el motor. El detalle de esta selección fue presentado en el Capítulo 5. 2.4.

## **7.2 Recomendaciones**

- Se recomienda como siguiente fase, la realización del diseño preliminar del BEMCO estático para motores cohete tipo G y K en cual se requiere de la realización de los respectivos cálculos del cuerpo estructural, fuerzas que son sometidas y realizar simulaciones por (CFD) para la corroboración de los datos teóricos.
- Se recomienda realizar un estudio de costos y presupuestos de los materiales que se seleccionaron en el concepto 1. No se tuvo en cuenta este proceso por limitantes de tiempo.
- Se recomienda por tema de costos el desarrollo de un tubo Pitot en la Universidad, para poder implementarlo en el BEMCO y así aprovechar el túnel de viento que posee la Fundación Universitaria Los Libertadores.

# Bibliografía

- Abarka, J. (2019). *Montaje de un sistema de inyección controlado por electroválvulas*. Bogotá.
- ACERO, M. (12 de febrero de 2016). *Aceros Maxi sitio web*. Obtenido de <https://www.maxiacero.com/aceros-estructurales.php#:~:text=El%20acero%20estructural%20se%20produce,concretas%20adap%20a%20este%20prop%C3%B3sito>.
- Acevedo, E. (2019). *Adquisición y procesamiento de señales eléctricas para un banco de pruebas*. Bogotá.
- Alsina, G. (24 de septiembre de 2019). *Diario electrónico*. Obtenido de <https://www.diarioelectronicohoy.com/sensor-digital-para-presion-de-aire-y-agua/>
- Cogollo, J. A. (2012). *Desarrollo De Metodología Para Diseño Conceptual*. Barranquilla : Universidad del Norte .
- Correa, M. (2009). Diseño Motor tipo G. *Universidad de San Buenaventura*.
- Eppingers, K. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. México D.F.: McGraw Hill.
- ERTIZA. (25 de julio de 2019). *ertiza sistemas de pesaje*. Obtenido de <https://www.ertiza.com/celda.php?id=4>
- Giovanny, I. (26 de Septiembre de 2015). *slideshare*. Obtenido de Proceso de comunicación en los sistemas hombre-máquina: controles ergonómicos : <https://es.slideshare.net/IrwingioO/controles-finalfinal1>
- Gonzales, C. (2020). *IONOS*. Obtenido de IONOS España S.L.U.: <https://www.ionos.es/digitalguide/online-marketing/analisis-web/house-of-quality/>
- Gonzales, J. J. (2011). *BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES COHETE TIPO K*. Bogotá: Universidad San Buenaventura.
- Herría, E. (2017). *EHAerospace*. Obtenido de EHAerospace Web site: [http://ehaerospace.space/?page\\_id=408](http://ehaerospace.space/?page_id=408)
- Jalloul, C. (26 de agosto de 2014). *Bloginstrumentación sitio web*. Obtenido de <https://www.bloginstrumentacion.com/productos/temperatura/cmo-funciona-termopar/>
- Longas, L. C. (2013). *lanzamiento de la misión colombiana de coherencia experimental*. Bogotá: Universidad De Los Andes .
- Lozano Tafur, C. (2021). *Generación de conceptos para diseño conceptual de BEMCO / Entrevista selección de materiales para un BEMCO*. Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá.
- Mantilla, L. (25 de septiembre de 2020). Elaboración de una matriz QFD. Lima, Perú.
- Martínez, R. J. (2004). *Comisión de Estudios Históricos Aeroespaciales*. Buenos Aires : Instituto Nacional NewBeriano .
- Mayori, A. (2017). *Resistencia de materiales*. La Paz : Yucatán .
- Mecafenix, I. (30 de abril de 2018). *Ingmecafenix sitio web*. Obtenido de <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/termistor-sensor-temperatura/>
- Melo Daza, P. F. (2021). *Generación de conceptos para diseño conceptual de BEMCO / Entrevista selección de materiales electrónicos para un BEMCO*. Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá.
- Muller, D. (18 de junio de 2013). Obtenido de <https://blogs.infobae.com/modelismo-espacial/2013/06/18/partes-componentes-de-un-cohete-modelo/index.html>
- Muller, D. (5 de Julio de 2013). *Modelismo Espacial*. Obtenido de Modelismo Espacial-Coheteria: <https://blogs.infobae.com/modelismo-espacial/2013/07/05/como-funciona-un-motor-cohete-para-modelismo-espacial/index.html>
- Nakka, R. (1997).

- Nakka, R. (2015).
- PACHÓN, L. F. (2016). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MISIÓN DE COHETERÍA EXPERIMENTAL*. Bogotá: Universidad De SanBuenaventura .
- Pamplona, J. (2007). *Diseño de una sala de pruebas para motores alternativos de combustión interna*. Barcelona .
- Parczewski´s, J. (25 de Mayo de 2016). *Coheteria experimental amateur de Juan Parczewski´s*. Obtenido de Juan Parczewski´s amateur experimental rocketry WEB site: <http://www.jpcoheteria.com.ar/BancoEnsMot1.htm>
- Parsch, A. (Octubre de 2007). *Directory of U.S Military Rockets and Missiles*. Obtenido de Designation-systems Web site : <http://www.designation-systems.info/dusrm/m-27.html>
- PCE. (2011). *PCE-IBERICA SITIO WEB*. Obtenido de <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/sistemas/sensor-caudal-ss-20-400.htm>
- Peña, N. A. (2011). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Peña, N. A. (2011). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Press, E. (17 de Julio de 2007). *Europapress Cienciaplus* . Obtenido de Cienciaplus Web site: <https://www.europapress.es/ciencia/misiones-espaciales/noticia-45-anos-encuentro-orbital-apollo-soyuz-plena-guerra-fria-20200717174645.html>
- Rago. (4 de Febrero de 2018). *Aceros Rago sitio web*. Obtenido de <https://www.acerosrago.com/el-acero-inoxidable/>
- Reina, E. A. (2010). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR COHETE* . Bogotá: Universidad SanBuenaventura.
- Riveros, F. (2010). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COHETE AFICIONADO* . Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada .
- Rodríguez Pantano, H. E. (2021). *Conceptos Globales en diseño Conceptual de BEMCO / Entrevista Selección de materiales para un BEMCO. Fundación Universitaria Los Libertadores*. Bogotá.
- Rodríguez, J. (2 de Enero de 2010). *Como funciona.co* . Obtenido de <https://como funciona.co/el-tubo-de-pitot/>
- Rodríguez, M. (20 de febrero de 2001). *dewesoft*. Obtenido de <https://dewesoft.com/es/daq/medicion-de-peso-con-celdas-de-carga>
- Rojas, F. A. (12 de Junio de 2012). *Proyecto uniandino*. Obtenido de Misión Séneca VI: <https://pua.uniandes.edu.co/doku.php?id=misiones:mision13>
- Rojas, N. Á. (2015). *DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS ESTÁTICO* . Bogotá: Universidad Nacional de Colombia .
- Salazar. (11 de Abril de 2011). *Alternativas de diseño* . Obtenido de Alternativas de diseño Web site: <https://sites.google.com/site/grupo10ich110422011/disenol1/disenotmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>
- Salazar, O. (2016). *Diseño conceptual, preliminar y detallado del cohete sonda recuperable ARISTARCO 1*. Bogotá : Fundación Universitaria Los Libertadores .
- Sutton, G. P. (2001). *Rocket Propulsion Elements* . Canada : JOHN WILEY & SONS, INC. .
- técnicos, O. (12 de Marzo de 2004). *sapiensman.com/tecnoficio*. Obtenido de [http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/instrumentacion\\_industrial12.php](http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/instrumentacion_industrial12.php)
- Ullman, D. G. (2008). *The mechanical design process*. Oregon: Higher education.
- Urrego, J. A. (2012). *INVESTIGACIONES EN COHETERÍA EXPERIMENTAL*. Bogotá: Universidad De Los Andes .
- Villajulca, J. C. (3 de Octubre de 2010). *Instrumentacionycontrol.net*. Obtenido de <https://instrumentacionycontrol.net/ventajas-desventajas-y-principales-aplicaciones-de-los-caudalimetros-de-turbina/>
- Walter, U. (2008). *ASTRONAUTICS The Physics of Space Flight*. Wiley-VCH.



## APÉNDICE

### Apéndice A: Encuesta

En este anexo se observan las preguntas realizadas al cliente, de igual manera se realiza el anexo del enlace de ingreso a la encuesta correspondiente.

¿Qué características físicas y mecánicas considera viables al momento de diseñar un banco de pruebas para motores de cohetaría tipo G y K? evalúe de 1 a 5, siendo 5 la mayor calificación y 1 la menor \*

	1	2	3	4	5
Forma	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Peso	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Capaz de sopor...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sistema de aler...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Estética	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Fig. 25 pregunta 1 encuesta

Califique de 1 a 5 los siguientes requerimientos para la construcción del BEMCO, siendo 5 la mayor calificación y 1 la menor \*

	1	2	3	4	5
Fácil operación	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Económico	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ergonómico	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durabilidad	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Fig. 26 pregunta 2 encuesta

¿Qué parámetros de medición considera que serían favorables para un BEMCO? Seleccione \*  
máximo tres parámetros

- Empuje neto
- Empuje específico
- Presión en la cámara de combustión
- Temperatura en la cámara de combustión
- Potencial del motor
- Flujo másico de aire
- Flujo másico de combustible
- Velocidad
- Presión en la tobera de escape

*Fig. 27 pregunta 3 encuesta*

¿Qué opinión, sugerencia, aporte o característica cree que haga falta para el desarrollo del banco de pruebas?

Texto de respuesta larga  
.....

*Fig. 28 pregunta 4 encuesta*

Se anexa enlace de ingreso a la encuesta:

[https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdWe7qCKty7G8p0C5kJyWWZqOeBxCdE4P4TUPi7MkT\\_BTGowg/viewform?usp=pp\\_url](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdWe7qCKty7G8p0C5kJyWWZqOeBxCdE4P4TUPi7MkT_BTGowg/viewform?usp=pp_url)