



Ciencia y Poder Aéreo

ISSN: 1909-7050

ISSN: 2389-9468

ESCUELA DE POSTGRADOS DE LA FUERZA AÉREA  
COLOMBIANA

Mónico Muñoz, Luisa Fernanda; Orduy Rodríguez, Jaime Enrique;  
Rodríguez Ramírez, Andrés Felipe; Higuera Hernández, Robinson  
Diseño conceptual de un banco de pruebas estático para motores de cohetería tipo G y K  
Ciencia y Poder Aéreo, vol. 17, núm. 2, 2022, Julio-Diciembre, pp. 120-133  
ESCUELA DE POSTGRADOS DE LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA

DOI: <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.737>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=673573283008>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc  
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso  
abierto

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

| Fecha de recibido: 08 de noviembre 2021 | Fecha de aprobación: 30 de junio 2022 |

**Luisa Fernanda  
Mónico Muñoz**

Doctor en Sistemas Propulsivos  
en Medios de Transporte

Docente. Fundación Universitaria Los Libertadores  
Colombia

Rol del investigador: teórico

Grupo de investigación en diseño, análisis y  
desarrollo de sistemas de ingeniería - GIDAD

<https://orcid.org/0000-0002-3597-6332>

✉ [luisitamónico@gmail.com](mailto:luisitamónico@gmail.com)

**Jaime Enrique  
Orduy Rodríguez**

Magíster en Ingeniería Aeroespacial

Docente. Fundación Universitaria Los Libertadores  
Colombia

Rol del investigador: teórico

Grupo de investigación en diseño, análisis y  
desarrollo de sistemas de ingeniería - GIDAD

<https://orcid.org/0000-0003-1818-0639>

✉ [jeorduyr@libertadores.edu.co](mailto:jeorduyr@libertadores.edu.co)

**Andrés Felipe  
Rodríguez Ramírez**

Ingeniero Aeronáutico

Fundación Universitaria Los Libertadores  
Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

<https://orcid.org/0000-0002-1134-5317>

✉ [afrodriguezr04@libertadores.edu.co](mailto:afrodriguezr04@libertadores.edu.co)

**Robinson  
Higuera Hernández**

Ingeniero Aeronáutico

Fundación Universitaria Los Libertadores  
Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

<https://orcid.org/0000-0001-6007-9943>

✉ [rhiguerah@libertadores.edu.co](mailto:rhiguerah@libertadores.edu.co)

**Cómo citar este artículo:** Adriano Falcão, V., Assunção da Silva, F. A., Ferreira da Silva, F. G., Rosa Negri, N. A., Oliveira de Andrade, M., & Queiroz Júnior, H. S. (2022). Contribution of international air transport at the entrance of COVID-19 in Brazil. *Ciencia y Poder Aéreo*, 17(2), 120-133. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.737>



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

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

## Projeto conceitual de um banco de teste estático para motores tipo G e K rohetery

**Resumen:** El presente documento expone el proceso metodológico seguido para el diseño de un banco de pruebas estático para motores de cohetería tipo G y K. Como punto de partida se realizó un estudio detallado de los bancos existentes para este tipo de motores, los componentes que lo conforman y las variables que pueden controlar durante su funcionamiento. Por medio de una lluvia de ideas y aplicando la casa de la calidad se plantearon 6 diferentes conceptos de bancos. De lo anterior, fue posible establecer que el acero inoxidable, gracias a sus propiedades físicas y mecánicas, es el material aconsejable para la construcción del BEMCO, ya que soporta los esfuerzos generados por este. Bajo los conceptos globales fue posible identificar las cargas estáticas a las cuales estará sometido el motor, y las cargas dinámicas cuando este se encuentre en operación, adicionalmente, fue posible realizar la selección de los componentes básicos con los que deberá contar el banco. Finalmente, se estableció que la mejor opción es el concepto número 1, ya que cumple con los requerimientos solicitados por el cliente.

**Palabras clave:** banco de pruebas; motor cohete; parámetros operacionales; combustible sólido.

**Abstract:** This document exposes the methodological process followed for the design of a static test bench for rocket motors type G and K. As a starting point, a detailed study of the existing benches for this type of motors, the components that make it up, was carried out. and the variables they can control during their operation. Through brainstorming and applying the house of quality, 6 different bank concepts were proposed. From the above, it was possible to establish that stainless steel, thanks to its physical and mechanical properties, is the recommended material for the construction of the BEMCO since it supports the efforts generated by it. Under the global concepts it was possible to identify the static loads to which the motor will be subjected, and the dynamic loads when it is in operation, additionally, it was possible to select the basic components that the bench should have. Finally, it was established that the best option is concept number 1, since it meets the requirements requested by the client.

**Keywords:** test bench; rocket engine; operational parameters; fuel solid.

**Resumo:** Este documento expõe o processo metodológico seguido para o projeto de uma bancada de testes estática para motores foguete tipo G e K. Como ponto de partida, foi realizado um estudo detalhado das bancadas existentes para este tipo de motores, os componentes que a compõem, e as variáveis que podem controlar durante sua operação. Através de brainstorming e aplicação da casa da qualidade, foram propostos 6 conceitos bancários diferentes. Do exposto, foi possível estabelecer que o aço inoxidável, graças às suas propriedades físicas e mecânicas, é o material recomendado para a construção do BEMCO, pois suporta os esforços gerados por ele. Sob os conceitos globais foi possível identificar as cargas estáticas às quais o motor será submetido, e as cargas dinâmicas quando estiver em operação, além disso, foi possível selecionar os componentes básicos que a bancada deverá ter. Por fim, foi estabelecido que a melhor opção é o conceito número 1, pois atende aos requisitos solicitados pelo cliente.

**Palavras-chave:** bancada de testes; motor de foguete; parâmetros operacionais; combustível sólido.

## Introducción

Un banco de pruebas sirve para medir las prestaciones y emisiones contaminantes de los diferentes sistemas de propulsión que transforman algún tipo de energía en trabajo, bajo ciertas situaciones 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; y así mismo las pruebas por realizar como ensayos de potencia, control de temperaturas, flujos máscicos, emisiones contaminantes, entre otros (Pamplona, 2007).

Universidades y empresas enfocadas en el campo aeroespacial cuentan con vehículos autopropulsados con ascenso vertical. Para potencializar sus procesos de investigación, en ocasiones, tienen la necesidad de diseñar y construir su propio banco de pruebas para motores cohete, con el objetivo de analizar el comportamiento del sistema antes de su posible lanzamiento.

En Colombia, los diseños de cohetaría actualmente se encuentran en sus etapas iniciales de estudio y desarrollo, un claro ejemplo son las investigaciones en planteles del sector educativo y gubernamental, como la Universidad Nacional de Colombia, la cual ha trabajado en un diseño de banco de pruebas estático para motores cohete que proporcionen un empuje de 1000 N (Rojas, 2015). Por su parte, 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 para generar 800 N de empuje. La construcción y el lanzamiento del cohete 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).

Adicionalmente, se diseñó y construyó un banco de ensayo estático para los motores cohete, que permitía variar variables como la presión y el empuje para

modificar las condiciones operativas (González, 2011). El banco de pruebas se diseñó con una celda de carga y un transductor de presión cuya función principal era 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. 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 empleó 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 Séneca VI. En el que ponen a prueba el motor cohete PUA I1-6S 2000n. Para el ensayo mediante banco de pruebas, se utilizó el UCAND-1, capaz de soportar una carga de 10000kN y determinar variables de empuje, presión y temperatura, visualizando 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, 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.

## Bancos de pruebas

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 figura 1 se observa la ubicación del motor cohete en posición horizontal, y en la figura 2 el motor cohete en posición vertical, con la tobera hacia abajo, en esta configuración es necesario prever un deflector de la llama para que esta no impacte en el suelo, siendo esta forma de diseño la más utilizada en CEA (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, como se observa en la figura 3 (Parczewski's, 2016).

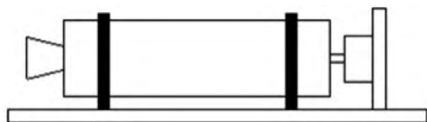


Figura 1. Banco estático tipo horizontal  
Fuente: Gonzáles (2011).

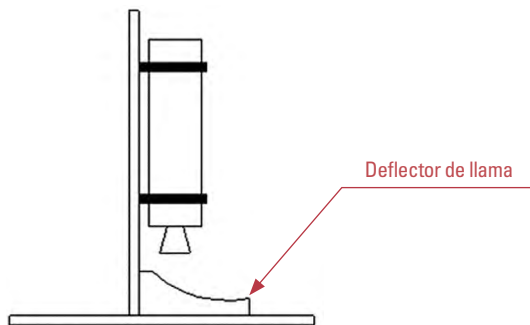


Figura 2. Banco estático tipo vertical con la tobera hacia abajo  
Fuente: Gonzáles (2011).

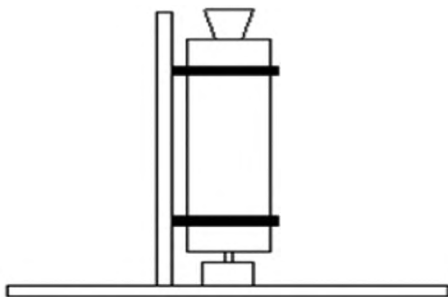


Figura 3. Banco estático tipo vertical con la tobera hacia arriba  
Fuente: Gonzáles (2011).

## 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 se 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 determinado por la naturaleza y la forma geométrica del propelente, y la continuidad del quemado. 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 figura 4 se observan las partes del motor cohete, este tipo de motores son utilizados en misiles (Sutton, 2001).

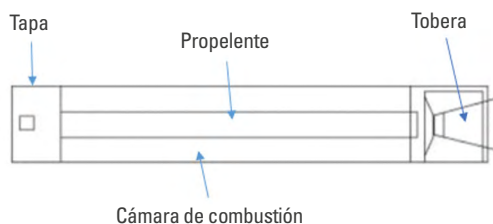


Figura 4. Motor cohete  
Fuente: Sutton (2001).

Existen diferentes tipos de motores cohete experimental, se pueden clasificar según sus características principales, como el empuje y la presión. Los motores cohete también se pueden clasificar según sus dimensiones, como la longitud de la tobera y la longitud del cuerpo del cohete. Los motores de combustible sólido son los más usados en cohetería experimental por su económica fabricación.

## Metodología

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

Este proyecto incluye una primera fase donde se realiza la búsqueda de información sobre motores de coherencia experimental y el diseño detallado del banco de pruebas para estos. 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. Evaluación y selección del concepto global dominante, una vez generados los diferentes conceptos, se evalúan y se comparan. Se aplica la casa de calidad para evaluar los procesos. Finalmente se realiza un control de calidad por medio de la misma herramienta, para garantizar la calidad del BEMCO.

## Diseño conceptual del BEMCO

El primer paso es identificar los “requerimientos iniciales de diseño” o “requerimientos del cliente”. Después de establecer las necesidades, 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 trabajo.

## Requisitos del banco

Como punto de partida, se realizó una encuesta para definir y establecer las necesidades y/o aspectos para tener en cuenta en el desarrollo del BEMCO, el resultado de la encuesta se observa en la figura 5. Por otro lado, en la figura 5a se muestran las características que se consideran debe tener el banco. Las respuestas presentadas son las que tuvieron mayor calificación por parte de los encuestados, siendo estas: forma, ergonomía y la capacidad de soportar cargas, sumando más del 50 % de la calificación total de la encuesta. En la figura 5b, 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 que debe ser capaz de medir el BEMCO.

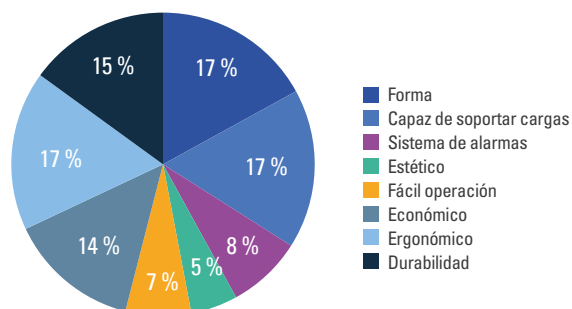


Figura 5a. Características físicas

Fuente: elaboración propia.

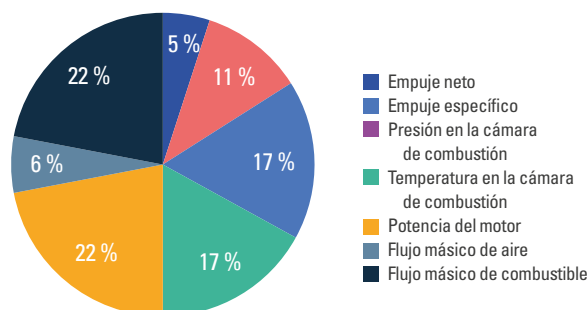


Figura 5b. Parámetros operativos

Fuente: elaboración propia.

Los requerimientos y parámetros tomados de la encuesta 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 el 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.

Posteriormente, en la tabla 1 se observa una lista de los parámetros y características que se escogieron como requerimientos del cliente, dado su nivel de importancia. 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 muy bajo.

**Tabla 1.**  
Calificación de los requerimientos

Requerimientos	Calificación
Flujo másico 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
Económico	3

Fuente: elaboración propia.

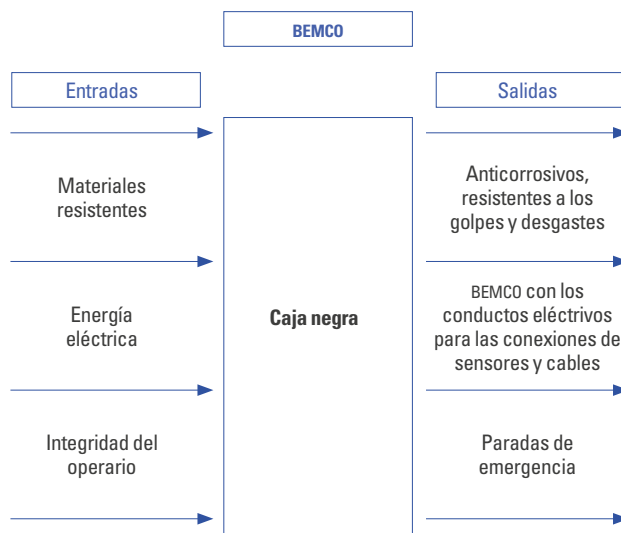
## Estudio conceptual

El diseño conceptual es la segunda fase del proceso de desarrollo de un producto, el cual 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).

## Análisis funcional

En la primera fase del diseño conceptual se desarrolla un análisis funcional, con el propósito de identificar las funciones y subfunciones que deberá ejecutar el producto por desarrollar. Para realizar el análisis funcional, se cuenta con dos herramientas básicas: el diagrama de caja negra y el árbol de descomposición funcional. El primero, ayuda a establecer las entradas y salidas de materiales, energías e información al producto que se diseñará. El segundo, comúnmente llamado diagrama funcional, es útil para organizar jerárquicamente y por categorías las distintas funciones y subfunciones a realizar por el producto (De La Peña, 2011). Esta descomposición funcional facilita la siguiente etapa del diseño conceptual, que es la generación de conceptos. A continuación, se observa en la figura 6 la caja negra desarrollada para el banco de pruebas.



**Figura 6.** Caja negra  
Fuente: elaboración propia.

Con el diagrama de caja negra, se estableció 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 qué interacciones son necesarias para el desarrollo conceptual del BEMCO, se realizó el diagrama funcional. En la figura 7 se presentan los requerimientos o requisitos iniciales del cliente, se evalúan y se obtienen las funciones y subfunciones que el BEMCO debe cumplir para satisfacer lo pactado inicialmente.

Para el despliegue funcional, se analizó cada requisito del cliente para poder encontrar una función clara, que cumpla con la solicitud de este.

- Medir parámetros del motor: esta función brindará soluciones para poder medir el 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: la idea es tener un producto ergonómico.

- Soportar peso, vibraciones del motor y resistir temperaturas de operación: es importante tener un producto que sea capaz de soportar cargas y que sus materiales sean duraderos.
- 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 operario del BEMCO.

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

## Generación de conceptos

La generación de conceptos corresponde a la segunda etapa del diseño conceptual, el cual está basado en aclarar el problema de diseño, desarticularlo en problemas más simples y luego buscar soluciones

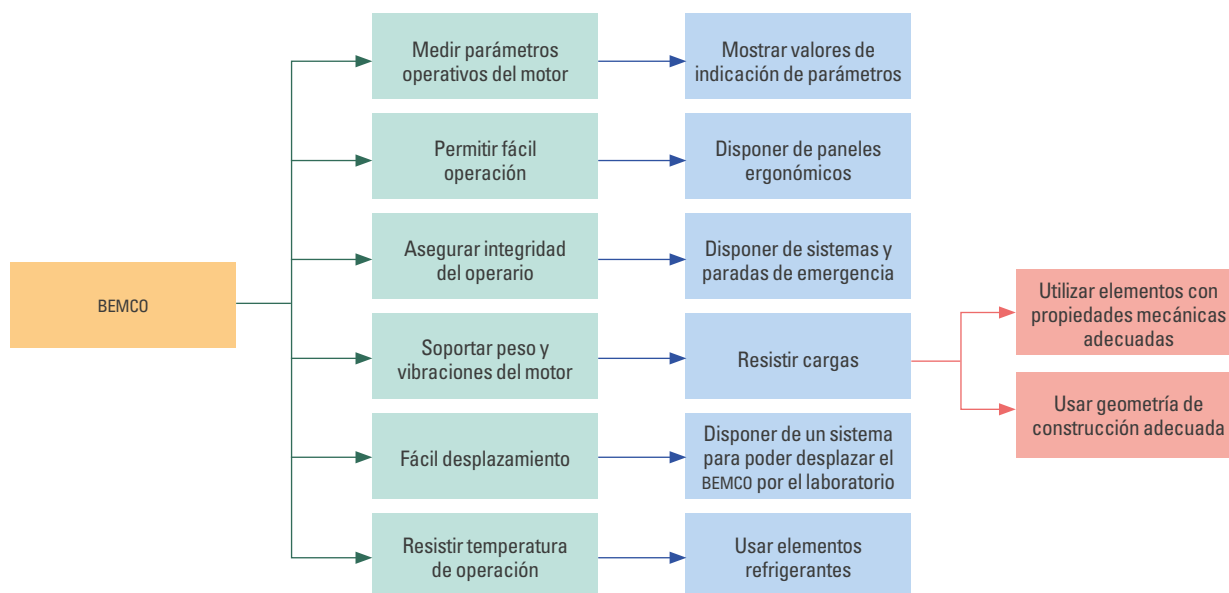


Figura 7. Diagrama o despliegue funcional del BEMCO

Fuente: elaboración propia.



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 (De La 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. La segunda basada en la generación de conceptos endógenos del equipo de proyecto (búsqueda interna).

De la búsqueda externa, se escogieron ciertos materiales óptimos para el desarrollo del BEMCO, como también las posibles geometrías estructurales para la construcción de este. Para llevar a cabo la segunda estrategia de búsqueda es útil apoyarse en procesos o técnicas creativas relacionadas a la generación de conceptos (De La Peña, 2011).

Como técnica estratégica se utilizó la lluvia de ideas. Mediante esta técnica de creatividad se generaron los conceptos globales del BEMCO. Se desarrollaron seis ideas distintas, teniendo en cuenta los conceptos, definiciones, la experiencia obtenida durante la realización de este trabajo y consejos de personas que han tenido la posibilidad de trabajar en este tipo de proyectos. En la tabla 2 se listan los diversos conceptos que salieron de 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. También el uso de un ventilador, como sistema de refrigeración, se consideró en todos los conceptos globales, ya que su instalación y mantenimiento es más sencillo y económico 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 de los operarios al presentar un sistema de emergencia para todos los conceptos, garantizando 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 2.**  
**Lluvia de ideas**

Lluvia de ideas						
Generación de conceptos	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3	Concepto 4	Concepto 5	Concepto 6
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

Fuente: elaboración propia.

## Concepto 1

El uso de caudalímetros es el más común para mediciones de flujo másico, 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, 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.

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 y en la no operativa, para que las personas que no están capacitadas para su operación guarden una distancia, para evitar accidentes. Se dispondrá de 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 interruptor para apagar y/o finalizar la operación 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, 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 CEA. Se debe tener en cuenta que en este tipo de BEMCO se debe diseñar un deflector de llama, ya que esta 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, 2001). En este caso será utilizado para medir el empuje que generan 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, entre otros. Es un sensor de bajo costo con tecnología avanzada en procesamiento, su instalación es sencilla y no requiere de costosos mantenimientos (Técnicos, 2004), lo que lo hace un dispositivo 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 consideró en este concepto el banco estático tipo vertical con la tobera hacia arriba, ya que se encuentran escasos diseños de este tipo de BEMCO, y sería una oportunidad para diseñar un producto que satisfaga las necesidades del cliente por ser 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 y presentar un producto que tenga más funciones. Por ejemplo, que mida 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 qué sensor es el más óptimo, 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; 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 consideró 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, y por ende fácil instalación (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 operaciones que requieren alta velocidad y puede ser de dos o tres posiciones, siendo una buena opción para el diseño del BEMCO (Giovanny, 2015).

### Concepto 6

Se consideró el sensor digital de presión en este concepto, ya que se puede utilizar en diferentes profundidades y a grandes alturas. Dispone de un circuito integrado que permite mantener un modo de bajo 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 el 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 sí se debe tener en cuenta una base (mesa) adicional.

## 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 (De La Peña, 2011).

## 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.
- **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.
- **La evaluación de ingeniería:** es la más importante, ya que define cuál 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 3 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, por eso 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 qué concepto puede o no complementar la idea del otro; 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 3.  
Casa de la calidad

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

Fuente: elaboración propia.

## Análisis de resultados

Luego de desarrollar, analizar y evaluar cada idea en la casa de la calidad se logró comprender que el concepto número 1 tiene relaciones funcionales fuertes (5) en la

mayoría de los requerimientos, el uso de perillas y botones manuales lo hacen un diseño demasiado ergonómico, cumpliendo a cabalidad con el requerimiento “fácil operación”. Su estructura compacta en acero inoxidable hace que el BEMCO pueda resistir la corrosión, oxidación y altas temperaturas de operación, haciéndolo 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 práctica 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; por esto 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 mantenimiento serían muy bajos, por esto tiene una relación funcional fuerte con el requerimiento “que sea económico”. En la figura 8 se presenta un boceto del concepto escogido como global dominante, y en la tabla 4 se listan los materiales de dicho concepto.

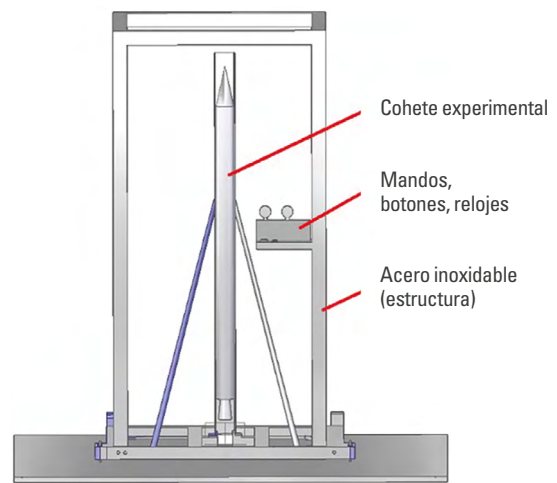


Figura 8. Boceto concepto 1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.  
Materiales concepto 1

Materiales concepto 1	
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

Fuente: elaboración propia.

Al generar distintos 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 unos requerimientos iniciales. 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 más baja.

## Conclusiones

- El desarrollo del diseño conceptual para un banco de pruebas para motores cohete tipo G y K, permitió comprender inicialmente las partes y funciones de los motores de cohería experimental, siendo la tobera y propelentes partes fundamentales en el funcionamiento de un cohete.
- El propelente sin importar su composición, se debe desarrollar con la misma geometría (cilíndrica) para facilitar su implementación en los motores cohete.
- Por medio del análisis funcional y las herramientas del diseño conceptual, se logró comprender la funcionalidad del banco y generar ideas de diseño, las cuales contribuyeron a investigar sobre diferentes dispositivos electrónicos y mecánicos. Este proceso creativo, también facilitó el análisis de los diferentes sensores de medición, permitiendo la selección adecuada de estos dispositivos y así lograr cumplir con los requerimientos iniciales.
- Por medio de la casa de calidad (HQ), se realizó una evaluación y comprensión de los 6 conceptos generados en la lluvia de ideas. En los conceptos diseñados con acero estructural se presenta una desventaja económica por el proceso anticorrosivo al que debe ser tratado, y es un material que tiene menos vida útil en comparación con el acero inoxidable, esto en función de la posible corrosión y/u oxidación del material. 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.

- El concepto 1 es el diseño conceptual dominante, ya que el uso de acero inoxidable permite que el concepto cumpla con el requerimiento “durabilidad” por ser un material con propiedades anticorrosivas. Su geometría es la indicada permitiendo no solo una fácil operación, sino también brinda seguridad operacional, ya que posee un deflector de llama para evitar quemaduras. El uso del tubo Pitot le garantiza a este concepto ser uno de los mejores en cuestión de medidas de presión por la precisión que brinda este dispositivo; 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, no necesitan de un mantenimiento periódico ni exhaustivo, y además poseen de una fácil instalación.
- El concepto uno se caracteriza por la combinación de perillas y botones pulsadores manuales, logrando ser un equipo bastante ergonómico. El sistema UFE410FLEX y su sistema de seguridad óptimo le brinda gran seguridad operacional al encargado de operar el BEMCO.
- Se logra concluir la importancia que tiene el desarrollo y estudio en los motores cohete tipo amateur con un BEMCO, ya que estos estudios brindan información de gran importancia teórica y experimental para la implementación de cohetes reales.

## Referencias

- Acero, M. (2016). *Aceros maxi sitio web*. <https://www.maxiace-ro.com/aceros-estructurales.php#:~:text=El%20acero%20estructural%20se%20produce,concretas%20adaptadas%20a%20este%20prop%C3%B3sito>



- Alsina, G. (2019). *Diario electrónico*. <https://www.diarioelectronicohoy.com/sensor-digital-para-presion-de-aire-y-agua/>
- Cogollo, J. A. (2012). *Desarrollo de metodología para diseño conceptual*. Universidad del Norte .
- Correa, M. (2009). *Diseño Motor tipo G*. Universidad de San Buenaventura.
- De La Peña, N. A. (2011). *Metodología de Diseño para Ingeniería*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Eppingers, K. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. McGraw-Hill.
- Ertiza. (2019). *Ertiza sistemas de pesaje*. <https://www.ertiza.com/celda.php?id=4>
- González, J. J. (2011). *Banco de pruebas para motores cohete tipo K*. Universidad de San Buenaventura.
- Giovanny, I. (2015). *Proceso de comunicación en los sistemas hombres-máquina: controles ergonómicos*. <https://es.sli deshare.net/IrwingioO/controles-finalfinal1>
- Jalloul, C. (2014). *Blog Instrumentación sitio web*. <https://www.bloginstrumentacion.com/productos/temperatura/cmo-funciona-termopar/>
- Longas, L. C. (2013). *Lanzamiento de la misión colombiana de cohetería experimental*. Universidad de los Andes.
- Lozano, C. (2021). *Generación de conceptos para diseño conceptual de BEMCO. Entrevista selección de materiales para un BEMCO*. Fundación Universitaria Los Libertadores.
- Mantilla, L. (2020). *Elaboración de una matriz QFD*.
- Mayori, A. (2017). *Resistencia de materiales*.
- Mecafenix, I. (2018). *Ingmeafenix sitio web*. <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/termistor-sensor-temperatura/>
- Melo, P. F. (2021). *Generación de conceptos para diseño conceptual de BEMCO. Entrevista selección de materiales electrónicos para un BEMCO*. Fundación Universitaria Los Libertadores.
- Nakka, R. (2015). *Teoría Sobre Motores Cohete De Propelente Solido*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2019, de [http://www.nakka-rocketry.net/th\\_nozz.html](http://www.nakka-rocketry.net/th_nozz.html)
- Pamplona, J. (2007). *Diseño de una sala de pruebas para motores alternativos de combustión interna*.
- Parczewski's, J. (2016). *Cohetería experimental amateur de Juan Parczewski's*. Obtenido de Juan Parczewski's amateur experimental rocketry WEB site: <http://www.jpcoheteria.com.ar/BancoEnsMot1.htm>
- PCE. (2011). *PCE-Ibérica sitio web*. <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/sistemas/sensor-caudalss-20-400.htm>
- Rago. (2018). *Aceros rago sitio web*. <https://www.acerosrago.com/el-acero-inoxidable/>
- Reina, E. A. (2010). *Diseño y construcción de un motor cohete*. Universidad de San Buenaventura.
- Rodríguez, J. (2010). *¿Cómo funciona el tubo de Pitot?* <https://como-funciona.co/el-tubo-de-pitot/>
- Rodríguez, M. (2001). *Medición de peso con celdas de carga*. <https://dewesoft.com/es/daq/medicion-de-peso-con-celdas-de-carga>
- Rojas, F. A. (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.
- Sutton, G. P. (2001). *Rocket Propulsion Elements*. John Wiley & Sons, INC.
- Técnicos, O. (2004). *Electricidad, instrumentación industrial*. [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*. Higher education.
- Urrego, J. A. (2012). *Investigaciones en cohetería experimental*. Universidad de los Andes.
- Villajulca, J. C. (2010). *Ventajas, desventajas y principales aplicaciones de los caudalímetros de turbina*. <https://instrumentacionycontrol.net/ventajas-desventajas-y-principales-aplicaciones-de-los-caudalimetros-de-turbina/>