Definición y aplicación de metodología de diseño para un banco de pruebas de motor cohete de propulsión líquida con un máximo empuje de 10kN

Presentado por

Andrés Felipe Rodríguez Robayo

Daniel Esteban Villamil Escobar

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Bogotá D.C, Colombia

2021

2021

Definición y aplicación de metodología de diseño para un banco de pruebas de motor cohete de propulsión líquida con un máximo empuje de 10kN

Presentado por

Andrés Felipe Rodríguez

Daniel Esteban Villamil

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

título de

Ingeniero Aeronáutico

Dirigida por

Ph.D., M.Sc., Ing. Luisa Fernanda Mónico Muñoz

Codirector

Ph.D., M.Sc., Ing. Oscar Hernando Venegas Pereira

Presentada a

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Fundación Universitaria Los Libertadores Bogotá D.C, Colombia.

2021

2021

Notas de aceptación

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. 29 de noviembre de 2021.

2021

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

Dedicamos este grandioso trabajo a nuestros padres, hermanos y seres querido que desde el cielo y en lo profundo de nuestros corazones nos acompañaron, quienes con mucho amor estuvieron a nuestro lado en los momentos más difíciles, sin ellos esto no hubiese sido posible. También dedicamos este triunfo a Dios quien nos dio la vida, la fortaleza, la sabiduría, la paciencia y la posibilidad de culminar este maravilloso camino.

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Agradecimientos

Primero agradecer a nuestras familias y seres cercanos que con paciencia nos estuvieron acompañando y apoyando desde un comienzo en este gran sueño de llegar a ser Ingenieros Aeronáuticos. Seguidamente a todos los profesores y miembros de la comunidad libertadora que directa o indirectamente hicieron parte de nuestro proceso de formación como profesionales y como personas miembros de una sociedad, donde esperamos que desde nuestros conocimientos podamos contribuir a nuestro país y al mundo. Por último, agradecer a Dios por brindarnos las capacidades físicas e intelectuales para poder superar de manera correcta cada reto trazado durante este viaje, para así alcanzar con éxito todos los objetivos propuestos a lo largo de estos años

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Índice general

Índice de figuras 14
Índice de tablas 16
Resumen 18

Capítulo 1 19
1.1 Antecedentes 19
1.2 Justificación 26
1.3 Objetivos 27
1.3.1 Objetivo General 27
1.3.2 Objetivos Específicos 27
1.4 Alcances y limitaciones 27
1.4.1 Alcances 27
1.4.2 Limitaciones 27

Capítulo 2 29
2.1 Introducción 29
2.2 Marco teórico 30

Capítulo 3 36
3.1 Metodología 36

Capítulo 4 38
4.1 Selección de la metodología 38
4.1.1 Parámetros iniciales 38
4.1.2 Organización de requerimientos iniciales 41
4.1.3 Clasificación de componentes 44
4.1.4 Selección de componentes 46
4.1.5 Comparación de propuestas de diseño 58

Capítulo 5 66
5.1 Conclusiones 66
5.2 Recomendaciones 66

Referencias 69

Anexos 74
Anexo A. Promedio de empuje 74
Anexo B. Encuesta 75

Índice de figuras

Figura 1. Banco de pruebas desarrollado en Bruselas, Bélgica (a) Características físicas y (b) Pantalla en LabVIEW 20

Figura 2. (a)Banco de pruebas en la Universidad Aeronáutica Embry-Riddle en Daytona Beach, Florida y (b)Visualización de datos 20

Figura 3. Banco de pruebas desarrollado en la Universidad Politécnica del Estado de California en Pomona, USA 21

Figura 4. Banco de pruebas desarrollado en el Instituto de Mecatrónica y Tecnología Automotriz de la Universidad de Heilbronn, Alemania 21

Figura 5. Banco de pruebas presentado en el VIII Congreso Europeo de ciencias Aeronáuticas y Aeroespaciales (EUCASS) 22

Figura 6. Rueda de Diseño 30

Figura 7. Tipos de sistemas de propulsión para motores cohete 31

Figura 8. Configuración general de un motor cohete de propulsión líquida 31

Figura 9. Distribución de presiones en tobera de salida de motor cohete 32

Figura 10. Impulso específico teórico en vacío 34

Figura 11. Tipos de cámara de combustión a partir de su forma: (a) Esférica, (b) Semiesférica y (c) Cilíndrica 35

Figura 12. Configuraciones para el banco de pruebas: (a) vertical con tobera de escape en la parte inferior, (b) vertical con tobera de escape en la parte superior y (c) horizontal. 35

Figura 13. Metodología utilizada 37

Figura 14. Modelo de matriz de especificaciones 40

Figura 15. Boceto opción 1 52

Figura 16. Boceto opción 2 53

Figura 17. Boceto opción 3 54

Figura 18. Boceto opción 4 55

Figura 19. Boceto opción 5 56

Figura 20. Requisitos del cliente y requerimientos funcionales del producto(Llorente, n.d.) 61

Figura 21. Relación entre los requerimientos del cliente y los requerimientos del producto (Llorente, n.d.) . 61

Figura 22. Correlación entre los “como” o requerimientos del producto (Llorente, n.d.) 62

Figura 23. Comparación de las alternativas propuestas (Llorente, n.d.).....63

Figura 24 . Resultado de la matriz “casa de la calidad” 65

Índice de tablas

Tabla 1. Línea base 23

Tabla 2. Combustibles y oxidantes más utilizados 33

Tabla 3. Parámetros técnicos. 39

Tabla 4. Sección de parámetros y requerimientos iniciales (Osborn, 1953) (Allen, 1959) (Altshuller, 1994) (Altshuller, 1988) 40

Tabla 5. Parámetro esencial 1 41

Tabla 6. Modelo de matriz de especificaciones 41

Tabla 7. Organización y categorización de requerimientos iniciales (Erdman & Sandor, 1998) (Suh, 1990). (Pugh, 1996). 42

Tabla 8. Matriz de especificaciones 43

Tabla 9. Parámetro esencial 2 43

Tabla 10. Clasificación de elementos seleccionados (Rodriguez, 1985)(Houseman et al., 2008)(Kazakçi & Tsoukias, 2005). 44

Tabla 11. Matriz de macroestructura y microestructura 45

Tabla 12. Parámetro esencial 3 45

Tabla 13. Función, objetivo y restricciones (Ashby M. F., 1999) 46

Tabla 14. Selección de componentes (Ashby, 1992)(Lopéz Beltrán & Torres Salcedo, 2011). 47

Tabla 15. Subproblemas generados en el problema clave “Parámetros que desea medir el banco de pruebas” 48

Tabla 16. Subproblemas generados en el problema clave “Materiales” 49

Tabla 17. Subproblemas generados en el problema clave “Operación” 50

Tabla 18. Subproblemas generados en el problema clave “Seguridad operacional” 50

Tabla 19. Opciones de diseño propuestas 57

Tabla 20. Parámetro esencial 4 58

Tabla 21. Matriz de calidad (Yepes Piqueras, 2014)(Martinez Guerra et al., 2018)(Paz & Gómez, 2013) 59

Tabla 22. Parámetro esencial 5 60

Tabla 23. Promedio de cada opción 63

Tabla 24. Requerimientos de la casa de la calidad 64

Resumen

Para la realización de cualquier producto tecnológico es necesario plantear un proceso de diseño, en donde su metodología varía dependiendo el enfoque y el resultado al que se desea llegar. Por esta razón, en el presente documento se realizó la definición de una metodología propia. Este proceso estuvo compuesto como primera estancia con la definición de parámetros esenciales, los cuales fueron 5 teniendo como guía la base de la técnica japonesa de gestión 5S, que está enfocada a organizar de mejor manera las tareas que se vayan a desarrollar en un proceso metodológico. Seguidamente se realizó una búsqueda de metodologías ya utilizadas en la industria de la ingeniería, donde se hizo una comparación de las características propias de cada una. Al mismo tiempo se reconocieron unas necesidades permitiendo definir ciertos requisitos. Posteriormente se conformó una metodología a utilizar que fue aplicada para un banco de pruebas de motor cohete de propulsión líquida con un máximo empuje de 10kN, siendo está característica la limitante establecida a partir de una línea base. El siguiente paso fue proponer 5 diferentes opciones de diseño que mejor se adaptarán a las necesidades del cliente, donde a través de la técnica conocida como casa de la calidad, fue calificada cada una de ellas ofreciendo la mejor elección.

Palabras claves: Definición de metodología, banco de prueba, combustible líquido, parámetros de operación, opciones de diseño, parámetros esenciales.

Capítulo 1

1.1 Antecedentes

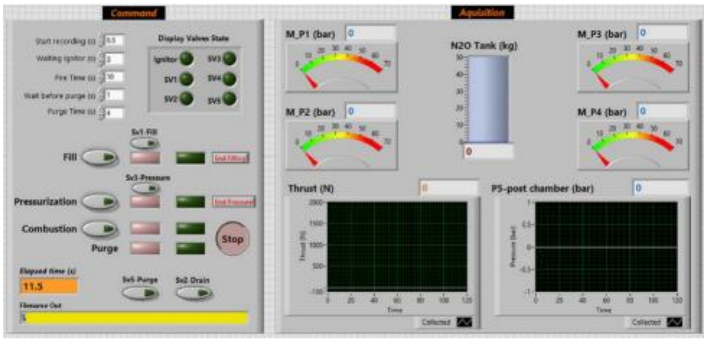
Desde el año 2010 ha venido en aumento el interés sobre la investigación y desarrollo de temas relacionados con cohetería experimental en Latinoamérica y especialmente en Colombia, y un mejoramiento de los sistemas de propulsión ya existentes por parte de países que conforman la Unión Europea y Estados Unidos (Espacio, 2021). Desde la construcción de distintos tipos de vehículos que alcanzan los límites inferiores de la troposfera, hasta el análisis y simulación de sus motores en bancos de prueba. Estos bancos de prueba para motor cohete se pueden clasificar a partir de las prestaciones brindadas por el motor, lo cual va muy ligado con el tipo de combustible. Según Gill (2018) expone en el BBC New's que los motores de combustible sólido son los más seguro pero los que ofrecen menores prestaciones y comúnmente utilizados en la pirotecnia, así como motores propulsados por combustible líquido los cuales han sido protagonistas de grandes acontecimientos históricos aeroespaciales, como el motor F-1 del módulo lunar Saturno V que permitió la llegada a la Luna durante el programa Apolo e impulsado por propelente de oxígeno líquido y keroseno, y por último, según lo evidenciado en el texto de Casado (2009), relata el evolución de la cohetería desde la segunda guerra mundial donde se crearon los motores de propulsión híbrida, los cuales ofrecen la seguridad de los motores propulsado por combustible sólido y el alcance de los motores propulsados por combustible líquido, pero su desarrollo ingenieril es mayor al momento de integrar estos dos sistemas.

Para poner en funcionamiento y operación un cohete sin importar el sistema de propulsión y/o combustible anteriormente mencionado, es necesario antes que nada realizar una caracterización de las prestaciones instalándolo en un banco de prueba, y de esta manera conocer sus parámetros operativos específicos y rendimientos alcanzables. El enfoque por construir más bancos de pruebas y poder caracterizar las variables propias de los cohetes según lo publicado en la revista Semana (2021) va en el mismo contexto en los países de mayor desarrollo del antiguo continente y Norte América como los son Estados Unidos, China y Rusia. No solamente está en común el mismo interés, sino que también las investigaciones se asemejan en sus objetivos; crear sistemas que puedan tomar la mayor cantidad de datos y que el banco de pruebas en sí; tenga una configuración compacta y sencilla de operar.

Esto se puede evidenciar a partir de los artículos e investigaciones publicados en la Unión Europea y Estados Unidos desde el año 2016, siendo los países de mayor contribución en el campo aeroespacial (Neff et al., 2016). A la fecha en la que se realiza esta investigación, los motores cohetes más utilizados son propulsado por combustible líquido e híbridos, en estos últimos siendo el propelente líquido el principal componente (Bouziane et al., 2018). Los rangos de operación de los motores para los cuales fueron construidos estos bancos de pruebas se encuentran entre 6kN y 22kN, donde en algunos casos este valor puede ser superado después de pasar por etapas de simulación y construcción, de tal manera que se comprueba que el banco de pruebas puede soportar mayores prestaciones (Betady et al., 2018). Otro aspecto en común, son los parámetros de medición, donde resalta el empuje, consumo de combustible, variables relacionadas con la ignición del motor (temperatura de distintos elementos) y presurización del combustible (presiones en diferentes lugares) (Mickels et al., 2019). En las Figura 1 se puede visualizar un ejemplo de los datos obtenidos en el software de programación conocido como LabVIEW siendo un común denominador en la estos proyectos.

Figura 1. Banco de pruebas desarrollado en Bruselas, Bélgica (a) Características físicas y (b) Pantalla en LabVIEW

(a)



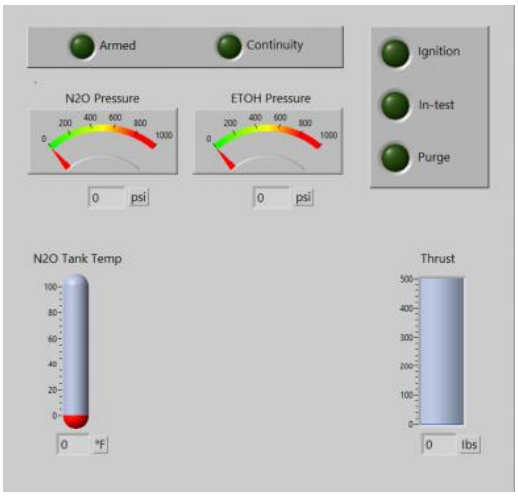
(b)

Nota. Adaptado de Aerospace Research Central [Fotografia](https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2018-2722)

Como se mencionaba anteriormente la operación y ergonomía del banco de pruebas es de importancia porque cada máquina debe adaptarse a las condiciones propias del lugar donde se instalará. Por ejemplo, el banco mostrado en la Figura 2(a) fue adaptado para las instalaciones de la Universidad Aeronáutica Embry-Riddle en Daytona Beach, Florida, donde fue necesaria la construcción de un banco de pruebas móvil que pudiera soportar una configuración universal debido a la incapacidad de realizar pruebas de incendios frecuentes en el campus, porque allí se encuentra un espacio aéreo clase 3 donde la disponibilidad de la zona está sujeta a las operaciones de tráfico aéreo (Mickels et al., 2019).

Figura 2. (a)Banco de pruebas en la Universidad Aeronáutica Embry-Riddle en Daytona Beach, Florida y (b)Visualización de datos

(a)



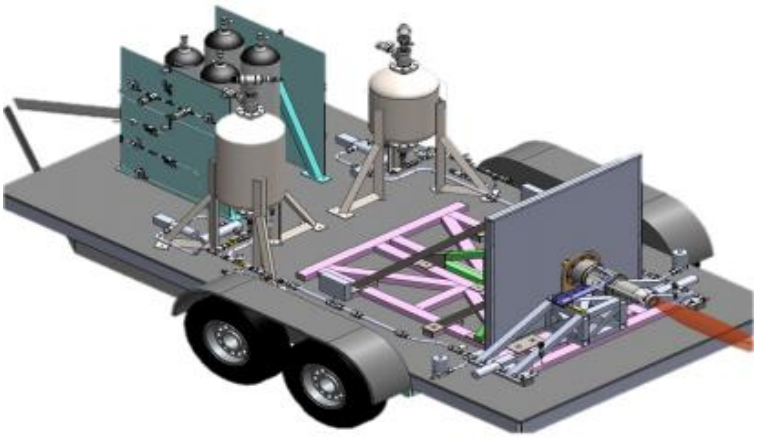
(b)

Nota. Adaptado de Aerospace Research Central [Fotografia](https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2019-1938)

Lo mismo ocurre con el banco de pruebas mostrado en la Figura 3, diseñado y pensando en las condiciones del laboratorio de cohetes líquidos de Cal Poly de la Universidad Politécnica en Pomona, California (Betady et al., 2018). El cual fue diseñado y construido por distintos grupos de estudiantes

de ramas multidisciplinarias, con el objetivo de convertirse en la primera universidad en enviar una carga útil al espacio por medio del desarrollo del banco de pruebas de cohetes móviles.

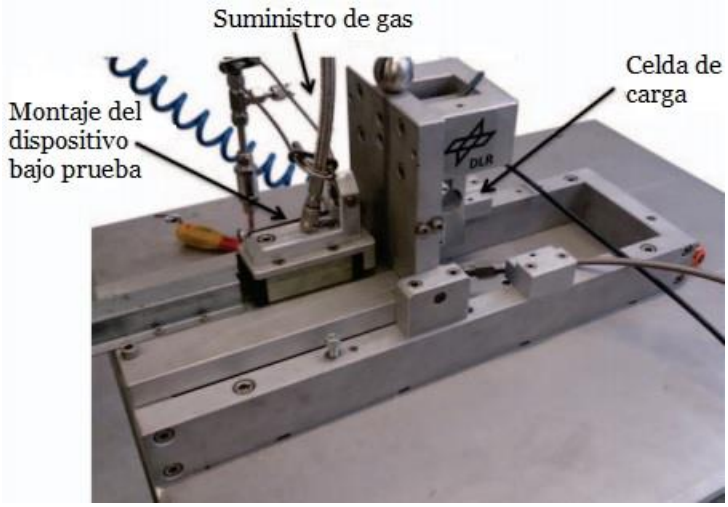
Figura 3. Banco de pruebas desarrollado en la Universidad Politécnica del Estado de California en Pomona, USA



Nota. Adaptado de Aerospace Research Central [Fotografia](https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2018-4600)

Aunque la operación y ergonomía no necesariamente quiere decir que el banco de pruebas debe ser móvil, también existen bancos de pruebas similares al desarrollado en el departamento de Aero-Termo-Mecánica (ATM) de la Universidad Libre de Bruselas, Bélgica (ULB) en colaboración con la Real Academia Militar de Bélgica (RMA), y al desarrollado en el Instituto de Mecatrónica y Tecnología Automotriz de la Universidad de Heilbronn, Alemania mostrado en la Figura 1(a) y Figura 4 respectivamente (Bouziane et al., 2018) (Neff et al., 2016). Estos bancos de pruebas tienen una configuración fija con un sistema de automatización similar y pensado para la realización de pruebas de corta duración

Figura 4. Banco de pruebas desarrollado en el Instituto de Mecatrónica y Tecnología Automotriz de la Universidad de Heilbronn, Alemania



Nota. Adaptado de IEEE Xplore [Fotografia](https://ieeexplore.ieee.org/document/7547130)

Otro aspecto importante al momento de diseñar, construir y operar un banco de pruebas para motores cohete, es el aspecto normativo y la seguridad del operario. Los motores cohete se caracterizan por la gran flama generada al momento de la combustión como se muestra en la Figura

5 (Schmierer et al., 2019), en donde se está realizando un ensayo en un banco de pruebas para un motor cohete híbrido propulsado por hidrógeno líquido (LOX) y parafina, con un empuje de 10kN donde el operario para su utilización debe contar con distintos elementos de protección y debe conservar cierta distancia mientras el motor está encendido. En otros bancos de pruebas como el que se muestra en la Figura 4, los controles están instalado en una estación de control portátil, mientras que el banco de prueba está ubicado afuera del lugar(Neff et al., 2016).

Figura 5. Banco de pruebas presentado en el VIII Congreso Europeo de ciencias Aeronáuticas y Aeroespaciales (EUCASS)

Nota. Adaptado de EUCASS [Fotografia](https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2019-0682.pdf)

Por otro lado, existen investigaciones que se dedican a la optimización de bancos de pruebas ya existentes. Sin embargo, estos análisis están enfocados a bancos de pruebas que soporten motores cohete de bajo empuje, los cuales tienen la misma importancia que los motores cohete de gran empuje, porque en algunos casos cumplen con labores de control de movimiento, orientación y estabilización de la aeronave o simplemente entran en operación después de la terminación de combustible en el sistema principal (Nazarov et al., 2021).Independientemente del empuje soportado, los bancos de pruebas están compuestos por subsistemas eléctricos, electrónicos, hidráulicos y mecánicos en donde cada uno de sus componentes están siendo actualizados por las empresas proveedoras permitiendo una simplificación y mejoramiento de los elementos (celdas de carga, procesador, circuitos integrados, etc.) (Reyes & Millán, 2015).

Hasta el momento se ha hecho énfasis en las investigaciones realizadas por los países que cuentan con una industria aeroespacial fortalecida e instaurada desde décadas atrás a lo largo de la historia aeroespacial de la humanidad, en Latinoamérica y puntualmente en Colombia los avances han sido más limitados. Mientras que en USA, Europa y Asia se está empezando a realizar bancos de pruebas para motores cohete capaces de cumplir pequeñas misiones, como, por ejemplo; el banco de pruebas expuesto en el VIII Congreso Europeo de ciencias Aeronáuticas y Aeroespaciales (EUCASS) a través del artículo titulado como *Avance en la tecnología de motores híbridos de cohetes de Europa con Parafina y LOX* (EUCASS) (Schmierer et al., 2019) que puede ser utilizado para ensayar cohetes destinados al lanzamiento de pequeños satélites o cohetes sonda. En esta parte del mundo hasta ahora se está realizando el desarrollo de cohetes experimentales y sus respectivos bancos de pruebas de menor capacidad de empuje o como lo son los bancos para cohetes de propulsión de combustible sólido.

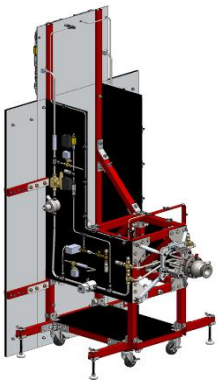
La cohetería experimental ha sido el protagonista desde el año 2010 en Latinoamérica teniendo como parámetro en común que los bancos de pruebas para motor cohete desarrollados no soportan más de 1kN de empuje (Álvarez Rojas et al., 2015). El diseño y desarrollo de estos bancos de pruebas se han centrado en la adquisición de datos de diseño que sean útiles para la posterior construcción.

En algunos casos como lo ocurrido en el proyecto por parte de la Fuerza Aérea Colombiana titulado *Diseño, construcción y prueba estática experimental de un motor-cohete de combustible sólido* cuyo objetivo del proyecto era la construcción y descripción funcional del cohete pero para conocer sus limitantes operacionales y funcionales, fue necesaria la creación y construcción de un banco de pruebas (Martiarena et al., 2010).

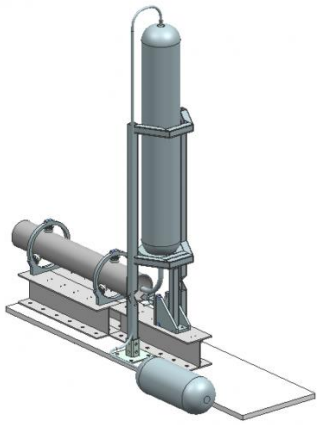
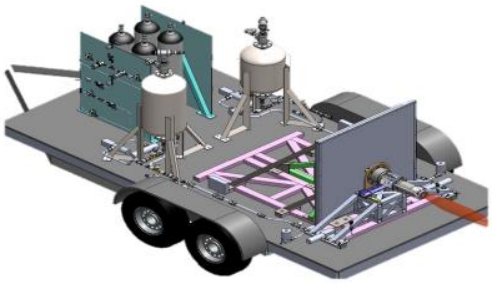
El otro enfoque que se ha tenido en Latinoamérica ha sido la simulación del comportamiento que pudiera tener el motor montado en el banco de pruebas antes de ser fabricado. El software ANSYS para dicha simulación es utilizado en universidades tales como Universidad Pontificia Bolivariana (Aremas Andrade, 2019), Universidad de San Buena Aventura (De la Hoz Gonzale, 2011) y Universidad politécnica de Cataluña (Moreno Roig, 2012), el cual es aplicado para realizar análisis estructurales por el método de elementos finitos, así como en algunos casos se opta por análisis de fluidos en caso de ser necesario. Esta simulación, así como la fabricación y la fase de diseño son de gran importancia para la caracterización funcional del banco de pruebas según lo que desee el explotador o cliente al cual está destinado el banco.

Por último, para definir el empuje limitante que soporte el banco de pruebas de este proyecto, se realizó una línea base (base line por su traducción en inglés) que incluyera los que se han construido hasta el momento y que tengan como requisito la utilización de motores cohetes de combustible líquido. Como resultado se encontraron ocho bancos de pruebas como se muestra en la Tabla 1, se calculó el promedio del empuje cuya operación se muestra en los Anexos de este documento y el resultado obtenido fue 10,5kN, por esta razón se decidió aproximar a 10 kN.

Tabla 1. Línea base

Nombre del proyecto	Imagen	Empuje [N]
Citadel - Rocket Engine Test Stand	 *Nota*. Adaptado de Citadel - Rocket Engine Test Stand [Fotografia] (Fiaschetti, s.f.)	6672

Horizontal/Vertical Test Stand to 1500 LB-f Thrust	 *Nota*. Adaptado de Aerocon Systems [Fotografia] (Horizontal/Vertical Test Stand to 1500 LB-f Thrust, 2021)	6672
Liquid Rocket Engine and Test System	 *Nota*. Adaptado de Liquid Rocket Engine and Test System [Fotografia] (Wallingford , Phillips , Bowser , & Dalton, 2021)	8896
10 kN regenerative cooled engine SLR10k-I (as used in the X-Bow I Project)	 *Nota*. Adaptado de SPL Products & Services [Fotografia] (SPL Products & Services, 2021)	10000

P18102: RIT Launch Initiative Hybrid Rocket	 *Nota*. Adaptado de RIT Multisiciplinary Engineering [Fotografia] (RIT Launch Initiative Hybrid Rocket, s.f.)	8896
Danish Space Challenge	 *Nota*. Adaptado de Aerocon Systems [Fotografia] (Danish Space Challenge, s.f.)	14000
Development of a Mobile Rocket Engine Test Stand (MRETS)	 *Nota*. Adaptado de Aerospace Research Central [Fotografia] (Betady, y otros, 2018)	22241

American Space and Propulsion - SORAC	 *Nota*. Adaptado de Aerocon Systems [Fotografia] (American Space and Propulsion - SORAC , s.f.)	6672

Con lo anterior se llega a la pregunta de investigación ¿Qué factores debe tener en cuenta una metodología aplicada para el diseño preliminar de un banco de pruebas de un motor cohete de propulsión líquida con un máximo empuje de 10kN?

1.2 Justificación

A nivel mundial, el país que más invierte en la industria aeroespacial es Estados Unidos con el 72% de la aplicación, seguido por la Unión Europea (11,7%), Rusia (4,2%), Japón (4,4%), e India (1,3%) mientras que el 6,4% corresponde a otros países. Colombia está posicionada por ser uno de los países Latinoamericanos con menor desarrollo en el campo de investigación y avances tecnológicos en el campo aeroespacial y es necesario fomentar la investigación en estas áreas. En referencia al producto interno bruto (PIB) los recursos que destinaron en investigación y desarrollo en países líderes de este sector como Estados Unidos fue del 2,79%, Alemania de 2,92%, Francia de 2,26% y China de 1,98% en el 2012, lo cual contrasta con la baja inversión en Colombia de 0.17% del PIB. Por consiguiente, se evidencia la necesidad de realizar una mayor contribución tanto económica como intelectual en la investigación de la industria aeroespacial para un país que hasta ahora arranca la carrera hacia la innovación, ciencia y tecnología (Publicaciones Semana S.A, 2021).

En la Fundación Universitaria Los Libertadores se han diseñado procesos de calibración de banco de pruebas de motores cohetees de propulsión solida desarrollado por el Grupo de Investigación en Ciencias Aeroespaciales (GICA), también se realizó una investigación sobre cohetes de propulsión sólida, denominada misión *Aristarco I*, y otro proyecto fue el diseño de un motor de cohete líquido para transportar un satélite pequeño. Dando continuidad a este tipo de investigaciones sobre cohetería experimental, se plantea al diseño preliminar de un banco de pruebas en el cual se puedan aplicar conocimientos previos, iniciando desde la creación de una metodología propia compuesta por técnicas, métodos y herramientas utilizados en el diseño de ingeniería de otras metodologías. Para cumplir con la fase de diseño mencionada se tomó como guía la definición propuesta por el ingeniero Chaur (2004), que establece el diseño preliminar como la etapa donde se determinan posibles soluciones y donde se seleccionan los materiales y componentes que harán parte del producto final. Esta fase de diseño se desarrolla posteriormente de la fase de diseño conceptual, la cual busca conceptos o principio para dar solución al problema, identificando las necesidades y planteando las restricciones generales.

Por esta razón, incursionar en temas aeroespaciales compete a los ingenieros aeronáuticos. Adicionalmente, en la industria los cohetes con mayor empuje utilizan combustible líquido o combustible hibrido (una porción en estado sólido y otra en estado líquido), proporcionando mejores presentaciones y mayor capacidad de operación. Para poder conocer su funcionamiento y dar paso a nuevas tecnologías es necesario realizar un estudio en un banco de prueba como en este caso de iniciar futuras investigaciones relacionadas con la temática.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Definir y aplicar una metodología de diseño para un banco de pruebas de motor cohete con propulsión líquida con un máximo empuje de 10kN.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir los principales requisitos que debe cumplir el banco de pruebas a partir de las necesidades del cliente.
- Determinar parámetros técnicos fundamentales que debe tener el banco de pruebas para su funcionamiento.
- Comparar distintos métodos de diseño de ingeniería para establecer una metodología de diseño preliminar.
- Aplicar la metodología de diseño propuesta para un banco de pruebas de motor cohete con propulsión líquida de hasta 10kN de empuje.

1.4 Alcances y limitaciones

1.4.1 Alcances

- Durante el diseño se realizó una revisión conceptual, teniendo en cuenta diferentes metodologías, técnicas, métodos y estrategias utilizadas en el diseño de ingeniería.
- Se realizó una guía de diseño preliminar con base a técnicas y estrategias de distintas metodologías de diseño de ingeniería.
- Al final de este proyecto se entregó una evaluación de las opciones planteadas, con el fin de brindarle la mejor alternativa al cliente con base a las necesidades.

1.4.2 Limitaciones

- Este proyecto solo abarcó la fase de diseño preliminar, y las especificaciones pueden ser modificadas posteriormente en su fase detallada si se continúa en posteriores investigaciones.
- Se tuvieron en cuenta conceptos fundamentales sin la realización de un análisis estático detallado sino con base a bancos de pruebas existentes.
- No se realizó una simulación rigurosa, y por esta razón, no se llevó a ningún software de análisis

computacional.

- No se realizó una construcción del banco de pruebas y por tal motivo, tampoco ensayos experimentales.
- No se tuvieron en cuenta factores que puedan influir en los costos de diseño del banco de pruebas.

Capítulo 2

2.1 Introducción

Lo que inició como un avión-cohete o avión torpedo y después de años de investigación, a finales del siglo XIX el sabio multidisciplinario peruano Pedro Paulet logró ser él pionero en cohetería experimental de motores propulsados por combustible líquido (Yupanqui & Mejía, 2016). Fue un cambio radical para la industria del momento que empleaba la utilización de motores cohete propulsados por pólvora y para ese entonces no habían pasado más de 30 años de ver a la primera máquina transportar a una persona por los aires en un vuelo controlado y propulsados por un motor. Esta tecnología se mantuvo vigente décadas más tarde y fue lo que permitió al hombre la llegada a la luna (BBC, 2016) (Salvatierra, 2017).

No se puede hablar de exploración espacial y avance tecnológico en el campo de la cohetería sin nombrar al científico alemán Wernher von Braun interestelar, que a pesar de su papel controversial durante la Segunda Guerra Mundial y la Guerra Fría, es un hito importante de la carrera espacial quién se ganó el reconocimiento de los Estados Unidos al ser líder del programa Apolo que permitió a los astronautas de la NASA Neil Armstrong y Edwin Aldrin, pisar por primera vez en la historia de la humanidad la superficie de un astro diferente al Planeta Tierra (Sánchez, 2020). Hoy en día los cohetes se emplean para enviar naves espaciales más lejos de nuestro sistema solar, llegando a decenas de lunas y planetas (Casado, 2009). Por esta razón, los astrónomos tienen imágenes de todos los planetas y de numerosas lunas, cometas y asteroides. Además, gracias a los cohetes avanzados la nave espacial Voyager pudo abandonar nuestro sistema solar y llegar hasta el espacio (Gill, 2018).

Luego de mencionar y/o hacer un breve viaje por la historia acerca de dónde y quienes fueron los pioneros de los motores cohete de propulsión líquida, evidenciar la importancia y el impacto que estos sistemas tienen en la actualidad, se sabe que para poner en marcha los sistemas de propulsión, en este caso motores cohete, es necesario realizar diferentes estudios y análisis de variables que interactúan cuando el sistema está en funcionamiento. Para hacer realidad lo anteriormente mencionado, poner en marcha estos sistemas y lograr un exitoso análisis en diversas ocasiones es altamente complejo, debido al tipo de materiales que estos emplean para su desarrollo que en la mayoría de los casos son: aluminio, acero, níquel, aleaciones de cobre y sistemas de refrigeración que impiden que el material se caliente demasiado (Aremas Andrade, 2019). Esto junto con otros factores tales como fabricación de piezas dimensionadas, diseñadas en Softwares especiales hacen que aumenten su valor, por esto es importante el diseño de un banco de pruebas para motores cohete de propulsión líquida.

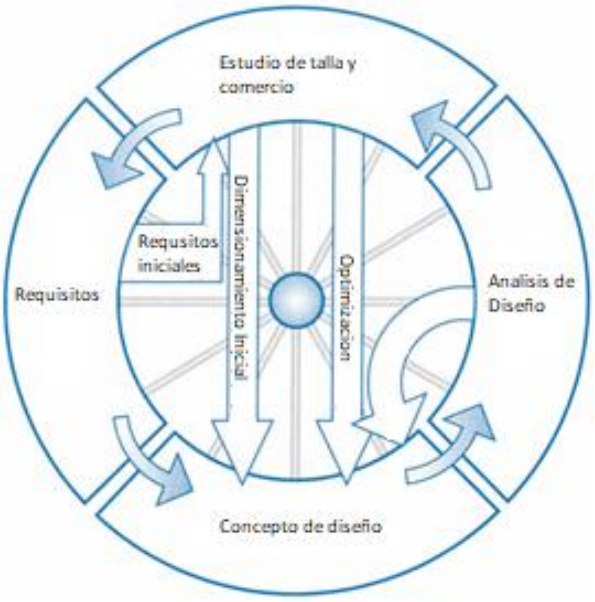
El diseño de un banco de pruebas para cohetería de propulsión líquida permite en distintas formas adquirir un acercamiento claro al momento de analizar el conjunto de componentes, sistemas y sus configuraciones, partiendo de un análisis matemático como base fundamental. Adicionalmente otras estrategias permitirán saber los requerimientos operacionales de interés por parte del cliente, lo cual brindará la oportunidad de apropiar criterios cuantitativos creando medidas de desarrollo basados en la investigación y análisis matemáticos, de tal manera que, se apropie distintas alternativas del funcionamiento de distintos tipos de sistemas. A lo largo de este proyecto se realizó un proceso de exploración para proponer configuraciones y materiales apropiados con el fin de brindar una solución a las necesidades planteados por el cliente, teniendo una posición crítica y creativa de los participantes.

2.2 Marco teórico

La novela de ciencia ficción de Julio Verne "De la Tierra a la Luna" cuenta la historia de la llegada del hombre a la luna a través de un proyectil lanzado desde la tierra en un cañón gigante. Esta obra fue lanzada en el año 1865 y para la época era una locura pensar en viajes espaciales, pero era claro ese sentimiento de la humanidad por explorar y conocer más allá de los límites atmosféricos terrestres. El hombre siempre ha observado el cielo y a partir de ese momento, ha intentado comprender de una manera más; cómo llegar hasta allí, por eso, empezó a construir máquinas que le facilitaran este objetivo. Aproximadamente un siglo más tarde, al finalizar la Segunda Guerra Mundial e inicios de la Guerra Fría, el dominio del cielo y del espacio fue una prioridad. El 4 de octubre de 1957 tras una espera de 98 minutos, Sputnik 1 fue lanzado y puesto en órbita por la Unión Soviética siendo así el primer satélite construido en la historia de la humanidad. Con un tamaño de apenas 58 centímetros de diámetro y un peso de 80 kilogramos su misión fue obtener información sobre las capas más altas de la atmósfera terrestre y el campo magnético de la tierra. (BBC, 2016)

A partir de este momento, se han realizado diferentes procedimientos, inventos e investigaciones relacionados con la exploración espacial, así como el entendimiento más allá de la frontera atmosférica. A la fecha en que se realiza esta investigación, la industria aeroespacial tiene el objetivo de desarrollar una aeronave especializada en el transporte de pasajeros, que sea capaz de llegar al planeta Marte. Para cumplir este propósito se requiere de un proceso denominado "diseño"; en ingeniería la creación de un concepto gráfico con ciertos parámetros geométricos va más allá de la labor del diseñador. Es necesario la recolección de conocimientos previos, establecer los parámetros y necesidades para resolver un problema, analizar el rendimiento fundamentado en fenómenos físicos y si es necesario, volver a diseñar. El diseño es un proceso iterativo el cual cuenta con una constante retroalimentación hasta cumplir el objetivo como se puede plasmar en la Figura 6 (Raymer, 1989).

Figura 6. Rueda de Diseño



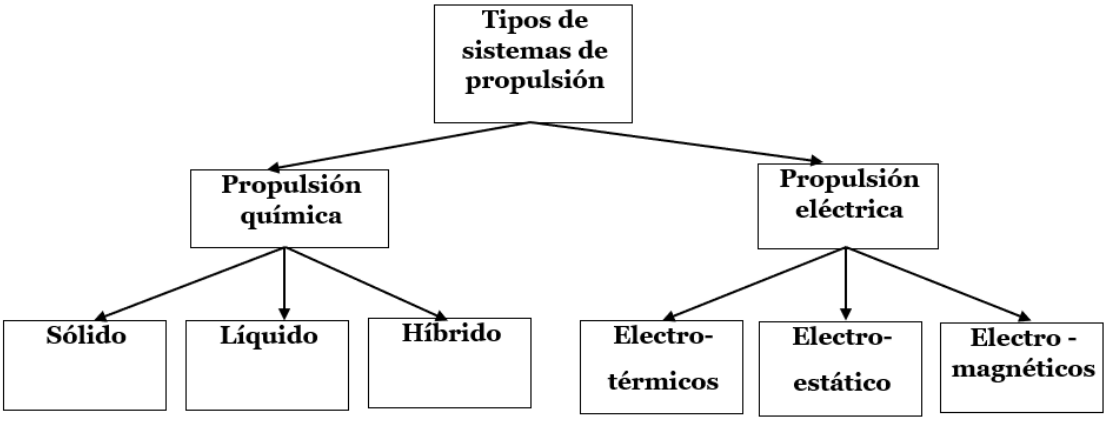
Nota. Adaptado de Aircraft Design: A Conceptual Approach, [Fotografia](Raymer, 1989, pág. 23)

Este procedimiento ha sido tomado del ingeniero de diseño aeroespacial Daniel P. Raymer, como una referencia de esta investigación por su experiencia en el diseño conceptual de aeronaves,

ingeniería de diseño y es uno de los máximos exponentes del diseño en la industria aeroespacial. De manera general para establecer una metodología de diseño es necesario establecer requisitos iniciales, identificar parámetros físicos a analizar y describir la manera en que se pueden medir; y para este caso en particular identificar las configuraciones geométricas y estructurales, para finalmente mostrar un boceto que plasme los conceptos. Posteriormente se realiza el proceso detallado de cada etapa para el desarrollo del diseño preliminar (Raymer, 1989).

El sistema de propulsión de una aeronave determina los alcances y limitaciones operacionales, lo que conlleva una clasificación de estos. En el caso de las plantas motrices para cohetes, se pueden clasificar según el tipo de fuente de energía (química, nuclear o solar) tipo de vehículo (aeronave, misil, vehículo espacial, despegue asistido) o la forma y cantidad de empuje proporcionado (Sutton, 2001). Según Jiménez (2020) dentro de los tipos de motor cohete comúnmente utilizados se destacan los de reacción química por esta razón, se tomará la clasificación a partir de las fuentes de energía. En el primer grupo se encuentran motores impulsados por combustibles sólido, líquido y/o híbrido, por otro lado, en el segundo grupo se encuentran motores electrotérmicos, electroestático o de iones y electromagnéticos como se muestra en la Figura 7.

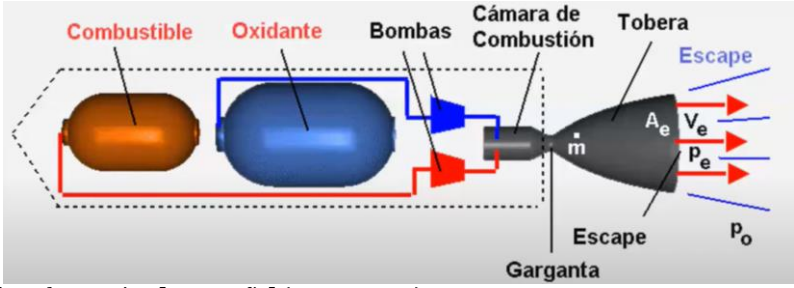
Figura 7. Tipos de sistemas de propulsión para motores cohete



Nota. Adaptado de TECSpace CR [Fotografía] (Jiménez, 2020)

La configuración general de un motor cohete de propulsión líquida está conformada como se muestra en laFigura 8. Existen un tanque de combustible y un tanque de oxidante que en ocasiones puede estar combinado dependiendo del combustible y el cohete, sus líquidos son impulsados por bombas hacía la cámara de combustión. Posteriormente los gases resultantes de dicha combustión son acelerados gracias a una garganta en una tobera convergente-divergente, y el resultado es la obtención de gases a alta velocidad, pero baja presión en el escape (Jiménez, 2020).

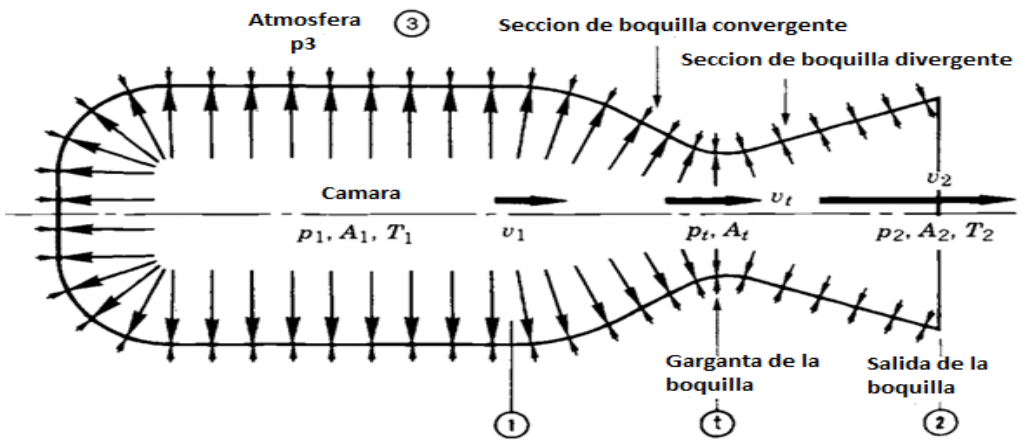
Figura 8. Configuración general de un motor cohete de propulsión líquida



Nota. Adaptado de Liquid Rocket Engine [Fotografía] (NASA , 2021)

El empuje es la fuerza producida por el sistema de propulsión que actúa sobre el vehículo producto de la combustión. Esta reacción química es soportada directamente por la estructura que, a diferencia de una aeronave o el empuje producido por las hélices de un barco, la masas son muy pequeñas en comparación a las altas velocidades de aceleración. Para comprender el funcionamiento de un motor cohete se puede comparar con el impulso de una bala hacia adelante, a causa del retroceso o impulso hacia atrás por la explosión en el cañón, físicamente se describe como el producto entre la masa por la velocidad y se le conoce como momento vectorial. Otra variable que interviene en el funcionamiento de un motor cohete es la relación entre la presión en el ambiente (p3) y la presión interna durante la combustión. El empuje es considerado total cuando la presión a la salida de la tobera es igual a la presión ambiente. En el esquema mostrado en la Figura 9 se evidencia la distribución uniforme de la presión en el ambiente (p3) sobre el cohete. La geometría de la tobera de salida determina el funcionamiento del motor cohete y al igual que en el exterior la presión se distribuye de manera uniforme en el interior; pero solo la presión axial es la que contribuye al empuje del motor.

Figura 9. Distribución de presiones en tobera de salida de motor cohete



Nota. Adaptado de Rocket Propultion Elements [Fotografía] (Sutton, 2001, pág. 33)

En condiciones ideales no existen cambios en la presión ambiente (p3) y se considera homogénea, mientras que, en condiciones reales el cambio de altitud puede producir un desequilibrio entre la presión ambiente (p3) y la presión del chorro de gases, donde se debe tener en cuenta dicha diferencia. Se debe considerar la diferencia de presiones, generalmente las toberas son diseñadas de tal manera que la presión de escape sea igual o mayor en una pequeña proporción de la presión en el ambiente. El perfil de velocidades en la tobera de salida en un motor cohete no se da de manera uniforme en condiciones reales, habrá pérdidas por fricción, por transferencia de calor, por condiciones atmosféricas entre otros parámetros que no se tuvieron en cuenta. Por esta razón, se tomó una velocidad axial sobre la sección transversal de la tobera. Estas condiciones se deben tener en cuenta y se denomina velocidad de escape efectiva (c) dada en metros por segundo o pies por segundo. (Sutton, 2001).

A partir de este parámetro la selección de materiales es un punto importante debido a la reacción química que se lleva a cabo dentro del motor cohete. Es importante tanto para el motor en si como para el banco de pruebas, muchos propelentes líquidos son compatibles con un número limitado de materiales tanto metales como no metales. En la práctica a la hora de montar una planta motriz en juntas, uniones o plataformas de medición como bancos de pruebas, se ha evidenciado problemas de corrosión, fallas a la fractura o fugas que han provocado incendios. Ciertos materiales catalizan una auto descomposición del peróxido de hidrógeno almacenado en agua y oxígeno, lo que dificulta el almacenamiento a largo plazo y, si está confinado, hace que su recipiente explote (Sutton, 2001).

El proceso de combustión es una sucesión de descomposición química, que se da simultáneamente y genera productos químicos en diferentes etapas. Los reactivos químicos pueden estar inicialmente en estado sólido, líquido o en algunas ocasiones gaseoso. Por ejemplo, en algunos casos particulares se puede dar la combinación de los tres estados en la misma reacción química; los propulsores que contienen óxido aluminizado se encuentran en estado sólido, la cámara de combustión contiene óxido de aluminio líquido y como consecuencia en los gases de escape contendrán pequeñas partículas condensadas de aluminio. Generalmente las partículas sólidas en el gas son demasiado pequeñas y despreciables, pero es importante conocer la composición química, la cantidad de componentes y el tiempo de duración de la reacción, para establecer parámetros de "performance" propio de la aeronave que vaya a utilizar el motor cohete (Sutton, 2001).

La mezcla entre el combustible y el oxidante se le conoce como propelente. En la Tabla 2 se muestran los combustibles y oxidantes más utilizados que se pueden mezclar entre sí para la obtención del respectivo propelente. La manera de selección entre ellos depende del grado de rendimiento que cada uno puede brindar respectivamente, y dicho rendimiento está en función del impulso específico (Jiménez, 2020). El impulso específico medido en segundos es definido como la eficiencia del combustible referente al peso del combustible, entre menor sea el peso del sistema en conjunto, mayor será la eficiencia y mayor será la carga paga que se pueda transportar durante la misión de la aeronave.

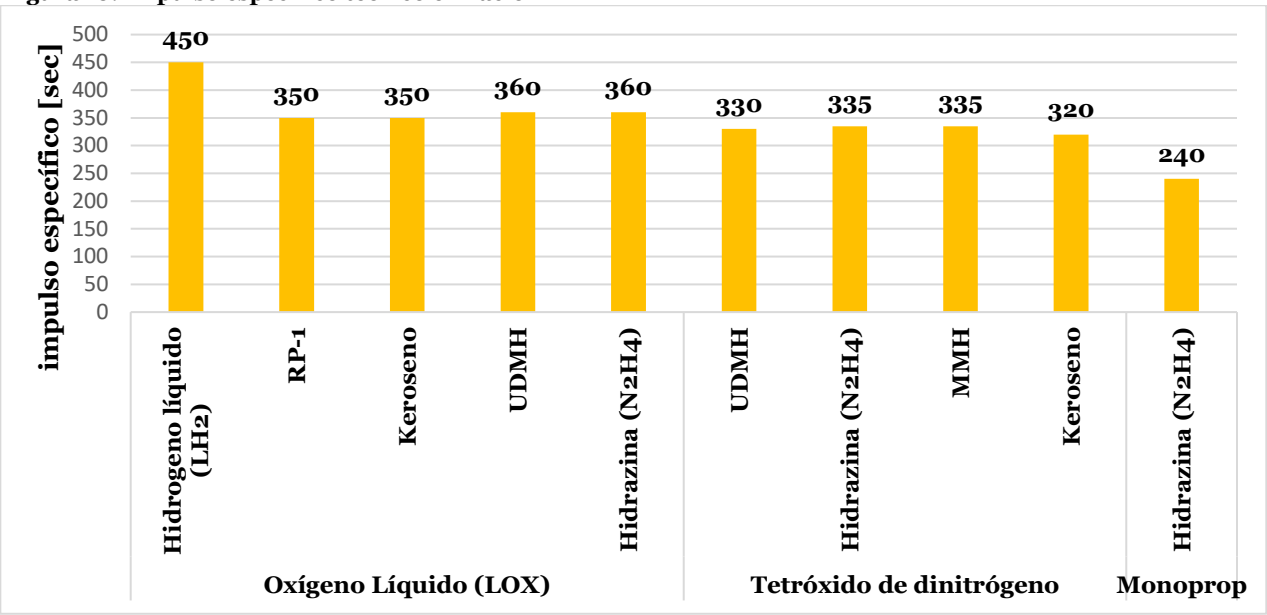
Tabla 2. Combustibles y oxidantes más utilizados

Combustibles	Oxidantes
Hidrogeno Líquido [LH2]	Oxígeno Líquido [LOX]
Rocket Propellant 1 [RP-1]	Óxido Nitroso [N_2O]
Metano [CH_4]	Peróxido de Hidrogeno [H_2O_2]
Hidracina	Tetróxido de Nitrógeno [N_2O_4]

Nota. Adaptado de Introducción a la cohetería - Propulsión Líquida [Fotografía] (Jiménez, 2020)

En la Figura 10 se puede evidenciar el impulso específico de cada combustible con diferentes oxidantes, los cuales se encuentran en un rango de entre 270-350 segundos y resaltando considerablemente la mezcla entre hidrógeno líquido con oxígeno líquido como la de mejor rendimiento. Las combinaciones más comunes en el mundo son Hydrolox (LH2 - LOX), Kerolox (RP-1 -LOX), Hidracina (UDMH - N2O4) y Methalox (LCH4 - LOX) (Jiménez, 2020).

Figura 10. Impulso específico teórico en vacío

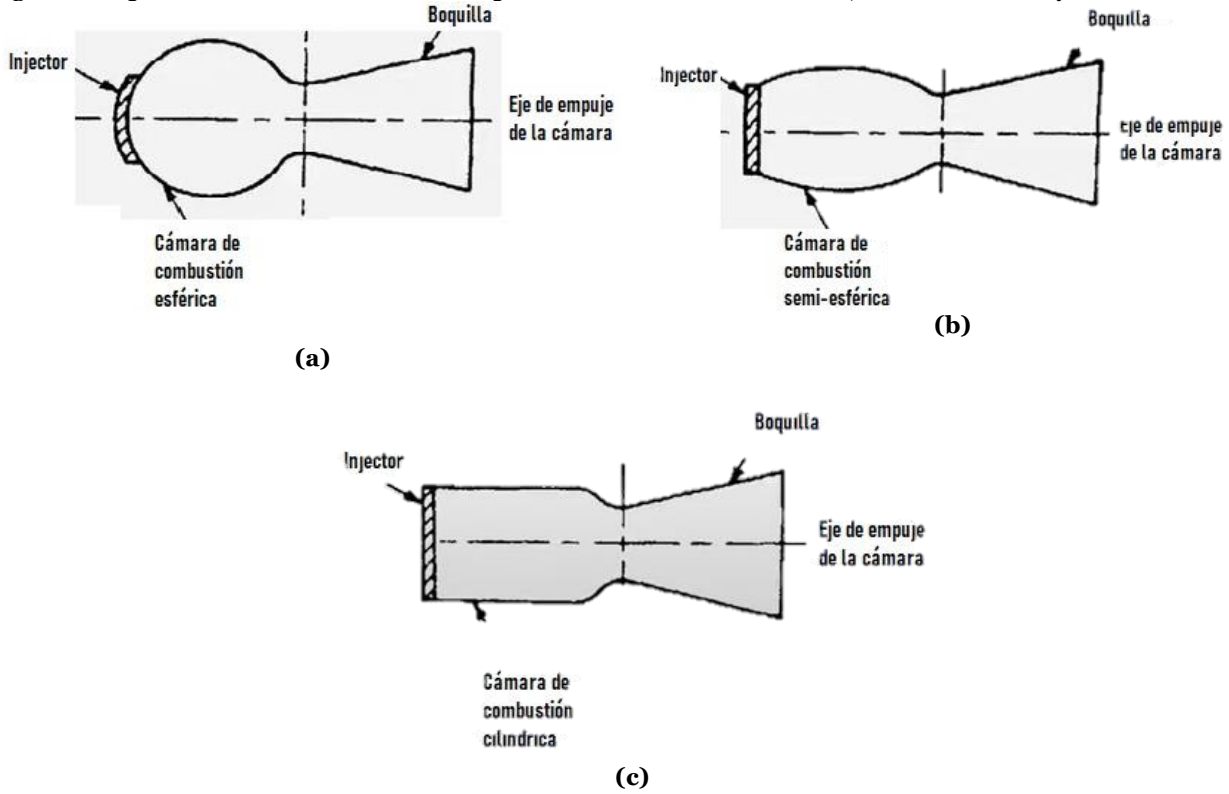


Nota. Adaptado de Introducción a la cohetería - Propulsión Líquida [Fotografía] (Jiménez, 2020)

Esta reacción química ocurre en el espacio denominado cámara de combustión, en esta sección debe predominar la mayor parte de la reacción para aprovechar lo máximo posible la energía del propelente. De igual manera, existen diferentes formas y tamaños en los cuales se puede clasificar las cámaras de combustiones como se muestra en la Figura 11, cada una de ellas tienen sus ventajas y desventajas. La cámara de combustión esférica es la más eficiente en términos de calor porque soporta en mayor medida las presiones de combustión y minimiza el área de contacto, pero a su vez su manufactura es muy compleja y difícil de realizar. Las cámaras de combustión cilíndricas son las más utilizadas desde algunos años atrás por su fácil producción, fácil mantenimiento y porque logra una eficiencia térmica aceptable. Sin embargo, hoy en día se está intentado construir cámaras de combustión cercanamente esférica para tratar de aprovechar en mayor medida las características de una cámara de combustión completamente esférica o por lo menos acercarse a ello, pero con la facilidad de construcción de una cámara de combustión cilíndrica (Jiménez, 2020).

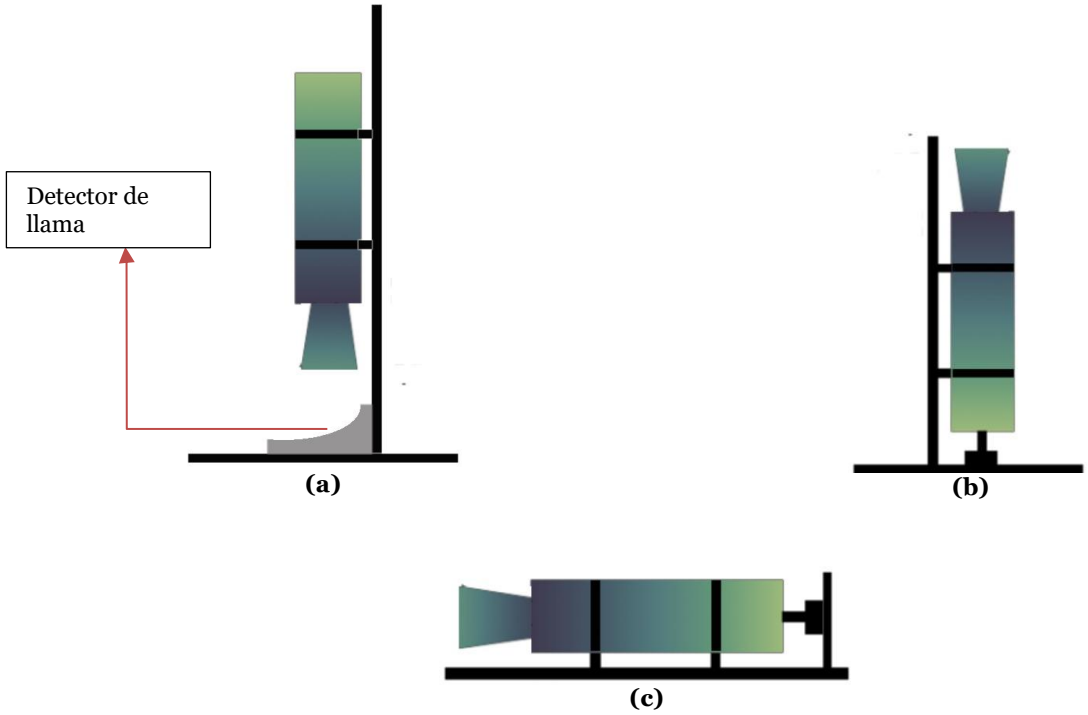
Después de una caracterización general sobre el funcionamiento de un motor cohete, es importante describir los distintos tipos bancos de prueba porque será el lugar que soportará las mayores cargas y esfuerzos generados por el motor cohete. Como se muestra en la Figura 12 existen principalmente tres configuraciones las cuales cada una de ellas tiene sus ventajas y desventajas. A partir de los elementos de medición, del tamaño del vehículo y de la construcción misma, por este motivo, cada una de ellas se adoptará mejor dependiente de la misión del vehículo y las características de las aeronaves a ensayar. En el presente proyecto solo se realizó un diseño preliminar, por tal motivo, no se tuvo en cuenta este tipo de limitación. Sin embargo, es importante conocer las especificaciones y requerimientos que se desean obtener por parte del cliente, en este caso es la Fundación Universitaria Los Libertadores.

Figura 11. Tipos de cámara de combustión a partir de su forma: (a) Esférica, (b) Semiesférica y (c) Cilíndrica



Nota. Adaptado de Introducción a la cohetería - Propulsión Líquida [Fotografía] (Jiménez, 2020)

Figura 12. Configuraciones para el banco de pruebas: (a) vertical con tobera de escape en la parte inferior, (b) vertical con tobera de escape en la parte superior y (c) horizontal.



Capítulo 3

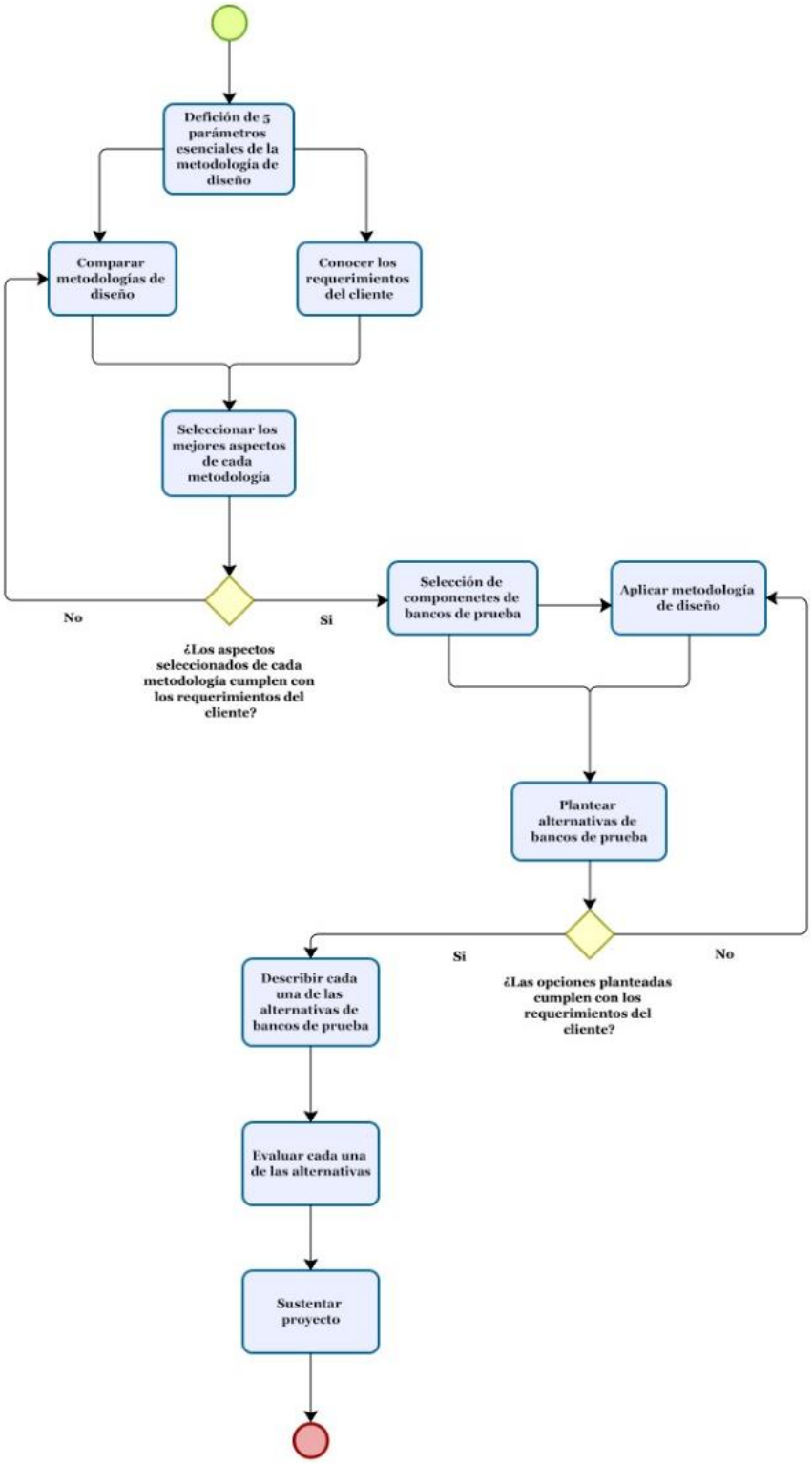
3.1 Metodología

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados, se utilizó una metodología descriptiva ya que este tipo de investigación se encarga de describir y evaluar una situación o fenómeno alrededor del cual se centra su estudio. Este método procura brindar información acerca del qué, cómo, cuándo y dónde, relativo al problema de investigación, sin darle prioridad a responder al ''por qué'' ocurre dicho problema. Como dice su propio nombre, esta forma de investigar ''describe'', no explica (Jervis, 2020).Por ende, con esta metodología se pretendió analizar técnicas de diseño fundamentadas en teorías, que permiten obtener conceptos metodológicos esenciales para diseñar un banco de prueba de un motor cohete de combustible líquido. De acuerdo con lo anterior, es relevante precisar las ideas de desarrollo de cada uno de ellos, por ende, es necesario partir de un proceso de orden lógico, coherente y preciso. Como primera estancia se definieron 5 parámetros esenciales que deben responder a la metodología de diseño propia tomando como guía las bases en las que está fundamentada la metodología desarrollada en los años 80 en Japón denominada como metodología 5S; la cual ha sido la base en los procesos de diseño y producción de productos, y su finalidad es organizar un proceso a partir de 5 postulados (SIG Consulting , 2018).

Posteriormente, es importante conocer los requerimientos de interés por parte del cliente, y al mismo tiempo comparar las metodologías utilizadas en los procesos de diseño actuales de productos tecnológicos. Durante el análisis de la información teórica se tuvo en cuenta los mejores aspectos de cada una, que contribuyan a todas las posibles variables que intervienen en el desempeño y diseño para un motor cohete experimental. Cualquier tipo de banco de prueba, sin importar el alcance y condiciones de operación, dependerá inicialmente del uso previsto, tipo de motor cohete o del mecanismo a probar. Si los aspectos seleccionados de cada metodología cumplen con las necesidades del cliente se seguirá con el paso siguiente, pero de lo contrario se volverá al punto de comparación de metodologías de diseño hasta dar respuesta a los requerimientos, y de esta manera dar continuidad con el proceso.

Al abordar progresivamente cada uno de los aspectos que involucran los objetivos y haber alcanzado los estándares trazados para estos, se procedió a seleccionar los componentes que harán parte del banco de pruebas, los cuales determinan los alcances y limitaciones operacionales del mismo por medio de los aspectos analíticos obtenidos. Al mismo tiempo, se aplicó la metodología de diseño, es decir; a medida en que se fue comparando y seleccionando cada herramienta de las técnicas metodológicas seleccionadas, se aplicó al banco de pruebas. Como consecuencia se plantearon distintas opciones en donde se cuestionó si cada una de ellas cumplían con las necesidades del cliente. En caso de haber obtenido una respuesta negativa se regresó al paso de aplicación de metodología de diseño para dar cumplimiento a los 5 parámetros esenciales planteados y en general al objetivo propuesto, de lo contrario se continuó con el siguiente paso. Por consiguiente, se describió los resultados obtenidos de cada opción propuesta, donde se resaltaron las ventajas y desventajas de cada uno de sus componentes de manera conjunta teniendo siempre como referencia buscar la mejor calidad y desempeño. Por último, se realizó una evaluación y comparación entre cada una de las alternativas para sustentar lo anteriormente mencionado, logrando como resultado final del proyecto cumplir con las expectativas del cliente con la mejor opción.

Figura 13. Metodología utilizada



Capítulo 4

4.1 Selección de la metodología

El desarrollo de la industria aeroespacial ha permito separar el proceso de diseño y el proceso de fabricación para lograr una optimización de recursos y poder prever problemas anticipándose con soluciones, evitando aplicar la metodología de prueba y error (Nigel Cross, 2002). Con el paso del tiempo diseñadores apasionados por el diseño de productos han creado diferentes rutas compuestas de técnicas, procedimientos y estrategias donde su objetivo en común es estructurar adecuadamente tareas que logren satisfacer una necesidad (Chaur Bernal, 2004). Adicionalmente, para estos diseñadores no es suficiente un solo punto de vista o inclusive solamente la experiencia de ellos mismos, sino que además es necesario incluir sugerencias o reunir algunos modelos de otros diseñadores (Ullman, 2013).Este punto de vista lo comparten los diseñadores Cross, Chaur y Ulman en cada uno de sus textos de procesos y metodologías de diseño respectivamente.

Como punto de partida y antes de desarrollar cualquier actividad relacionada con el diseño, es necesario tener claras las variables que afectan la selección de distintas técnicas y/o estrategias metodológicas ya indagadas, para adoptar una metodología propia. A continuación, se muestran 5 parámetros que sirvieron para agrupar y comparar las distintas metodologías de diseño y de esta manera, seleccionar los aspectos que fueron aplicables al diseño del banco de pruebas propuesto. Al finalizar, la metodología propia debió responder a los siguientes requerimientos:

1. Establecer unos requerimientos iniciales que respondan a los objetivos planteados.
2. Ofrecer una organización y clasificación de los requerimientos seleccionados en el punto anterior.
3. Clasificar y organizar los componentes que hacen parte del banco de pruebas para poder proponer diferentes alternativas.
4. Permitir escoger componentes con la mejor calidad posible y donde se cumplan los requerimientos ya seleccionados y organizados.
5. Comparar las distintas propuestas de diseño.

4.1.1 Parámetros iniciales

Para establecer los requerimientos iniciales indicados en el punto uno y haciendo un recuento histórico, donde antiguamente algunos inventores y/o ingenieros como Leonardo Da Vinci o Curator Aquarum empezaban con la realización de bocetos o dibujos donde se tuviera una idea visual y estética de lo que podría llegar a ser el producto final (donde en algunas ocasiones no era del todo funcional). Contrasta con los ingenieros diseñadores contemporáneos como Alex Osborn y Myrson Allen los cuales establecen en sus metodologías “Imaginación aplicada” ” (Osborn, 1953) y “Creatividad morfológica” (Allen, 1959) respectivamente, un proceso distinto con el fin de identificar sin proponer soluciones en particulares, el reconocimiento de factores que intervengan en la solución de una necesidad a través de un conjunto de puntos de vista de distintas personas. Sin embargo, estás carecen de carácter estructural en comparación con la metodología de Genrich Altshuller denominada “Teoría para resolver problemas de inventiva TRIZ (Altshuller, 1994) (Altshuller, 1988).

En ocasiones cuando se desea crear un producto algunas características pueden perjudicar las demás, esta es la base de la “Teoría para resolver problemas de inventiva” y se denominan contraindicaciones, por ejemplo; si se desea construir un motor de mayor potencia eventualmente

aumentará el peso. “Altshuller propuso la hipótesis en la cual establece que existen principios universales de invención que pueden servir de base para las innovaciones creativas y los avances tecnológicos” (Henrich Saavedra & Rojas Lazo, 2013, pág. 103). Altshuller siempre tuvo como referente la creación de patentes dando soluciones creativas a problemas desde lo más sencillo a lo más complejo. Después de años de investigación y análisis de patentes estableció 39 parámetros técnicos generales mostrados en la Tabla 3 y enfocados a productos tecnológicos.

Tabla 3. Parámetros técnicos.

1	Peso del objeto móvil
2	Peso del objeto inmóvil
3	Longitud del objeto móvil
4	Longitud del objeto inmóvil
5	Área del objeto móvil
6	Área del objeto inmóvil
7	Volumen del objeto móvil
8	Volumen del objeto inmóvil
9	Velocidad
10	Fuerza
11	Tensión o Presión
12	Forma
13	Estabilidad de composición del objeto
14	Fortaleza
15	Duración de la acción del objeto móvil
16	Duración de la acción del objeto inmóvil
17	Temperatura
18	Intensidad de iluminación
19	Uso de energía del objeto móvil
20	Uso de energía del objeto inmóvil
21	Potencia
22	Pérdida de energía
23	Pérdida de sustancia
24	Pérdida de información
25	Pérdida de tiempo
26	Cantidad de sustancia
27	Confiabilidad
28	Exactitud de la medida
29	Precisión de fabricación
30	El daño externo que afecta al objeto
31	Efectos perjudiciales provocados por el objeto
32	Facilidad de fabricación
33	Facilidad de uso
34	Facilidad de reparación
35	Adaptabilidad o flexibilidad
36	Complejidad del dispositivo
37	Complejidad de control
38	Grado de automatización
39	Productividad

Nota. Adaptado de Método de inventiva para solucionar problemas: aplicación bimetal [Fotografía] (Franco Caballero & Leal Iga, 2018)

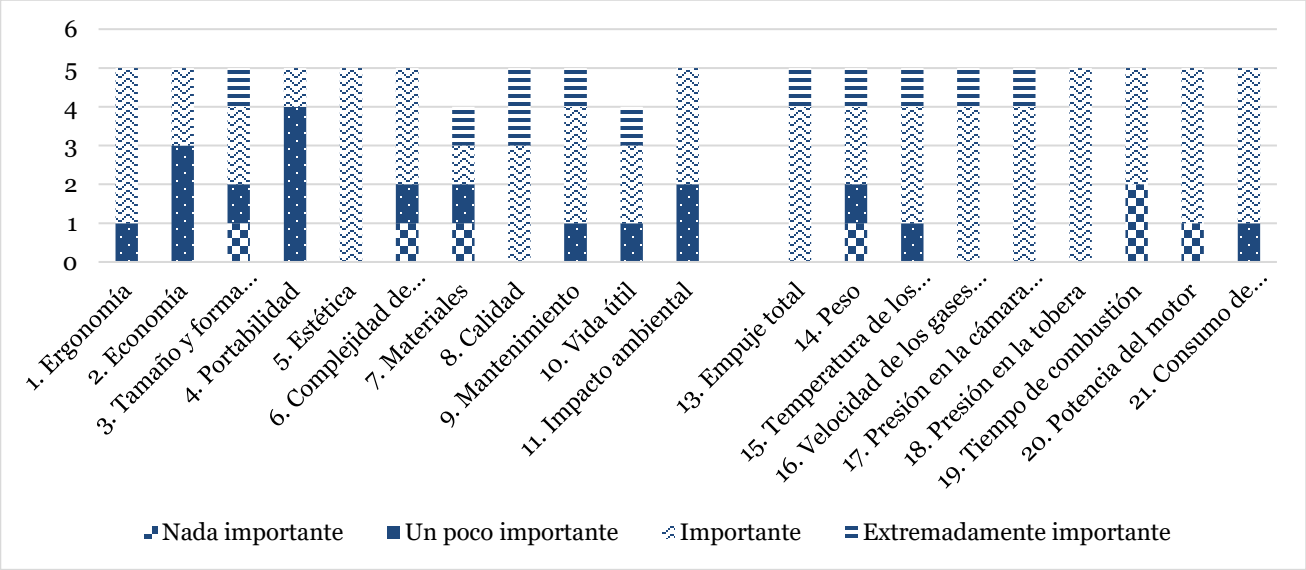
Esta herramienta fue escogida como punto de partida para plantear los requerimientos básicos que debía cumplir el banco de pruebas, y en la Tabla 4 se resaltan sus características. La manera de su aplicación fue a través de la ejecución de una encuesta a cuatro docentes de la facultad de ingeniería de la Fundación Universitaria Los Libertadores y un docente de la escuela de ingenieros en su representación como cliente.

Tabla 4. Sección de parámetros y requerimientos iniciales (Osborn, 1953) (Allen, 1959) (Altshuller, 1994) (Altshuller, 1988)

Imaginación aplicada (Alex Osborn)	Creatividad morfológica (Myrson Allen)	Teoría para resolver problemas de inventiva TRIZ (Genrich Altshuller)
1. Solo identifica problemas sin proponer soluciones específicas.	1. Resuelve problemas a partir del análisis de cada componente.	1. La resolución de problemas se basa en el establecimiento de 39 parámetros técnicos universales.
2. Tiene en cuenta diferentes puntos de vista para proponer una solución (Lluvia de ideas).	2. Su análisis está basado en la combinación de variantes que puede llegar a tener cada componente.	2. Propone soluciones puntuales para cada parámetro después de haber realizado una selección de parámetros.
3. Carece de carácter estructural en la aplicación de diseño de productos tecnológicos.	3. Si el número de variantes y combinaciones es elevado puede llegar ser inadecuada la aplicación de este método.	3. Tiene un enfoque hacía la creación de patentes y productos tecnológicos innovadores.

Para la realización de la encuesta que imparte la matriz de especificaciones por parte del cliente, se estableció una calificación de valoración en grado de importancia en donde la escala de 1 a 3 es nada importante, de 4 a 6 es un poco importante, de 7 a 9 es importante y 10 es extremadamente importante. Se realizaron un total de 22 preguntas de las cuales 20 preguntas contenían respuesta cerrada donde se marcaba con una "x" la casilla correspondiente de 1 a 10 según el nivel de importancia considerado, y las 2 preguntas restantes eran de respuesta abierta donde se solicitaba algún comentario o sugerencia sobre algún otro parámetro que fuera importante y que no se hubiera tenido en cuenta. En la Figura 14 se muestran los resultados de las preguntas cerradas donde los cuadros en forma de tabla de ajedrez exponen el parámetro que tiene ninguna o nada de importancia, el relleno oscuro con puntos blanco considera un poco de importancia, las líneas en zig- zag es importante y las líneas horizontales es extremadamente importante.

Figura 14. Modelo de matriz de especificaciones



De acuerdo con los resultados obtenidos en la encuesta cabe resaltar que existe una relación de los parámetros operacionales con la forma de trabajo del banco de pruebas por parte del operario, también se consideró importante el aspecto físico del banco de pruebas en cuanto a la estética y calidad, así como la conservación de la propia máquina como lo es la vida útil y mantenimiento. Los parámetros de medición como lo son: el empuje, temperatura de los gases de escape, presión en la tobera y en la cámara de combustión, potencia y consumo de combustible, también fueron los parámetros relevantes por parte de los entrevistados. Por último, también se puede analizar que la centralización del cliente fue seleccionar parámetros generales, antes de seleccionar variables que puedan describir el banco a más detalle como, por ejemplo; el tamaño y forma estructural, materiales de construcción, complejidad de construcción, peso y facilidad de transporte o portabilidad. Antes de seguir con la adaptación de la metodología utilizada, en la Tabla 5 se muestra la metodología seleccionada para responder al parámetro esencial 1 que establece los requerimientos iniciales que responden a las necesidades del cliente.

Tabla 5. Parámetro esencial 1

Parámetros esenciales	Metodología utilizada
1	Teoría para resolver problemas de inventiva TRIZ (Genrich Altshuller)
2	
3	
4	
5	

4.1.2 Organización de requerimientos iniciales

Continuando con el segundo parámetro de comparación de metodologías enfocado a la organización y clasificación de parámetros iniciales se tiene como referencia la estrategia propuesta por parte de los diseñadores mecánicos Arthur, G Erdman y George, N Sandor mostrada en la Tabla 6 Sandor (1998). En donde se enumeran cada parámetro y se especifica su relación con el problema planteado, se valida por un agente externo, se restringe de acuerdo con las limitaciones del proyecto y por último se deja un espacio por si se tiene algún comentario o sugerencia. Existen otras metodologías para la organización de datos como “el método de diseño axiomático” (Suh, 1990) donde la matriz de diseño relaciona los requerimientos funcionales y parámetros propuestos de diseño expresada de manera matemática, en donde se encuentra la relación entre las necesidades del cliente, la funcionalidad del producto, los atributos físicos del producto y el proceso de diseño. Para este caso no se tuvo en cuenta los atributos físicos definidos y la funcionalidad se abordó de manera general con la propuesta de componentes, por tal motivo se consideró poco conveniente seguir esta matriz.

Tabla 6. Modelo de matriz de especificaciones

Requerimiento	Especificación	Validación	Restricciones	Comentarios
1	Especificación 1	Validación 1	Restricción 1	Comentario 1
2	Especificación 2	Validación 2	Restricción 2	Comentario 2
3	Especificación 3	Validación 3	Restricción 3	Comentario 3
n	Especificación n	Validación n	Restricción n	Comentario n

Otra matriz muy utilizada en el diseño de productos es la propuesta por el ingeniero de diseño británico Stuart Pugh (1996), la cual es una herramienta cuantitativa que permite comparar opciones en relación con los criterios de diseño propuestos. Esto permite una evaluación de criterio por criterio dándole un valor cuantitativo; sin embargo, su manera de aplicación está basada en la identificación de opciones ya definidas que cumplan los requerimientos del cliente. En este caso aún no se ha dado una solución puntual a cada criterio, por esta razón tampoco es una buena opción. En la Tabla 7 se muestra un resumen de cada aspecto a resaltar de la metodología seleccionada que contribuye a la organización de los requerimientos iniciales.

Tabla 7. Organización y categorización de requerimientos iniciales (Erdman & Sandor, 1998) (Suh, 1990). (Pugh, 1996).

Creando productos innovadores usando diseño total (Stuart Pugh)	Método de diseño axiomático (Nam P. Suh)	Diseño de mecanismos (Arthur, G Erdman y George, N Sandor)
1. Permite la evaluación de cada criterio en la creación de cada producto a partir de la cuantificación dada por el diseñador	1. Permite la comparación de criterios de diseño con base a la relación entre necesidades del cliente, funcionalidad del producto, atributos físicos y proceso de diseño	1. Permite el ordenamiento de cada especificación técnica del producto, teniendo en cuenta las restricciones, descripciones y validaciones por parte del cliente
2. En este método se tiene en cuenta el análisis del mercado, diseño detallado y todas a aquellas actividades relacionadas con la fabricación y venta del producto	2. Agrupa por medio de restricciones las características no funcionales dentro del proceso de diseño lo que permite una clasificación de cada requerimiento	2. Involucra la generación de conceptos básicos que pueden llegar a ser aplicados en la formulación de problemas de manera esquemática y ordenada
3. Es un método detallado que establece parámetros definidos que satisfagan el requerimiento del cliente	3. Es un método detallado basado en la implementación de matrices matemáticas que permitan la cuantificación de cada requerimiento funcional del producto	3. Es un método sistemático con una organización jerárquica a partir del análisis de una problemática, formulando hipótesis, generación de bocetos, análisis y optimización

En la Tabla 8 se muestra el resumen de los datos adquiridos en la encuesta, así como la asociación de algunos comentarios por parte de los encuestados donde se aplica la estrategia de organización y clasificación de parámetros iniciales de los diseñadores Arthur, G Erdman y George, N Sandor. Se tomaron los ítems que tuvieran una calificación de importancia entre amarillo y verde igual o superior al 75% del total de entrevistados; y el formato completo de la encuesta se encontrará en los Anexos de este documento. En este paso no se tuvo en cuenta la columna de “Validación” porque en este punto de diseño no se realizó una evaluación por parte del cliente o algún agente externo que verificará las respuestas. Por otro lado, tampoco se tuvo en cuenta la columna de “Restricciones” en esta matriz, porque esto se tuvo en cuenta posteriormente en la proposición conceptual, cuando se realizó una complementación de los requerimientos por parte de los diseñadores de este proyecto. Adicionalmente, se realizó una asociación a los parámetros a los cuales es posible aplicar dichas sugerencias. Por ejemplo; es importante la seguridad del operario en cuanto a riesgos laborales respecto a la normativa colombiana vigente, para ello debe ser importante los elementos de seguridad, sistemas propios de seguridad del banco de pruebas, la propia estética, calidad y ergonomía. Por otro lado, para la conservación del banco de pruebas, su vida útil y el desarrollo de distintos sistemas de propulsión, es importante las actualizaciones tecnológicas de los componentes con el paso del tiempo, donde para todos aquellos parámetros de medición es importante tener en cuenta el ciclo de operación del banco de pruebas.

Tabla 8. Matriz de especificaciones

Requerimiento	Especificación	Comentarios
1	Ergonomía	Tener en cuenta la normativa
2	Estética	Tener en cuenta la normativa
3	Calidad	Tener en cuenta la normativa
4	Mantenimiento	Tener en cuenta la normativa
5	Vida útil	Tener en cuenta la actualización tecnológica
6	Empuje Total	Tener en cuenta el peso del motor y del banco de pruebas
7	Temperatura de los gases de escape	Tener en cuenta el tipo de combustión
8	Velocidad de los gases de escape	Tener en cuenta el tipo de combustión
9	Presión en la cámara de combustión	Tener en cuenta el tipo de combustión
10	Presión en la tobera	Tener en cuenta ciclo de operación del motor
11	Potencia del motor	Tener en cuenta ciclo de operación del motor
12	Consumo de combustible	Tener en cuenta la actualización tecnológica

Dando continuidad a la adaptación de la metodología utilizada, en la Tabla 9 se muestra la metodología seleccionada para responder al parámetro esencial 2 que ofrece una organización y clasificación de los requerimientos seleccionados.

Tabla 9. Parámetro esencial 2

Parámetros esenciales	Metodología utilizada
1	Teoría para resolver problemas de inventiva TRIZ (Genrich Altshuller)
2	Diseño de mecanismos (Arthur, G Erdman y George, N Sandor)
3	
4	
5	

4.1.3 Clasificación de componentes

En el siguiente parámetro de comparación para seguir con la ruta de adaptación de una metodología propia, es buscar la mejor herramienta que permita clasificar y organizar los componentes que hacen parte del banco de pruebas para poder proponer diferentes alternativas. Existe una teoría de diseño fundamental denominada como teoría C-K la cual establece dos espacios, el primero definido como el concepto y el segundo como el conocimiento (por sus siglas en inglés Concept-Knowledge). Desarrollada inicialmente por Armand Hatchuel y expandida por Benoit Weil (2017), siendo la base de muchos ingenieros diseñadores los cuales profundizaron aún más en el tema como; Houseman (2008), C C. Kazakci y Tosoukias (2005), y Rodriguez (1985). El postulado central busca realizar una descripción inicial de un objeto que aún no está desarrollado o es parcialmente desconocido, esto quiere decir; es la caracterización de algo a lo que se quiere llegar partiendo de conceptos previos. Esto es utilizado en las primeras fases de diseño y en el planteamiento de hipótesis en problemas de diseño, siendo una de las teorías de mayor enseñanza en el campo académico e industrial

Houseman (2017) orienta su profundización en el impacto económico que puede llegar a tener la toma de decisiones de los diseñadores en la fase preliminar. Establece una relación entre el entendimiento cognitivo y experiencia humana, como factor primordial en la capacidad de resolver problemas y estimación de costos. Por otro lado, C C. Kazakci y Tosoukias (2005) agregan un tercer espacio E relacionado con el entorno (por su significado en inglés Enviroment). Este tercer espacio está enfocado a las representaciones externas que no se tienen en cuenta en los otros dos espacios, lo cual en la mayoría de los procesos de diseño estos factores permiten una reinterpretación del problema y de esta manera realizar los cambios necesarios. Pero no solo se tiene en cuenta las características físicas, también el ambiente de aplicación del producto o proceso de diseño y su interacción con los demás agentes involucrados.

Mientras que Rodriguez (1985) en su texto "Manual de diseño industrial" establece el espacio de concepto como macroestructura y el espacio de conocimiento como microestructura. Donde la macroestructura es el postulado que los diseñadores quieren tratar y solucionar, y la microestructura son proposiciones precisas que permiten dar soluciones concretas a las necesidades planteadas. En este proyecto no se tuvo en cuenta el factor económico y tampoco los problemas físicos que puedan llegar a resultar del proceso de diseño. Por esta razón, se optó por esta última estrategia, donde se realiza una jerarquización a través de un diagrama con base a la observación y la recolección de datos tomados. Las características de cada metodología se encuentran en la Tabla 10 y en este caso a partir del paso a paso realizado, se organizan los parámetros principales a resolver siguiendo un orden lógico, donde se establecen las acciones objetivas determinantes para la metodología del diseño preliminar del banco de pruebas.

Tabla 10. Clasificación de elementos seleccionados (Rodriguez, 1985)(Houseman et al., 2008)(Kazakçi & Tsoukias, 2005).

Teoría C-K (Armand Hatcuel)	Comparar las acciones cognitivas de los ingenieros de diseño y los estimadores de costo (Oliver Houseman)	Ampliación de la teoría del diseño C-K: una base teórica para asistentes de diseño personales (Kazakci y Tosoukias)	Manual de diseño industrial (Gerardo Rodríguez)
1. Busca caracterizar de un objeto no desarrollado partiendo de conceptos previos	1. Busca reducir el impacto económico que conlleva el diseño de productos	1. Buscar relacionar el diseño del producto con el ambiente de aplicación	1. Buscar dar soluciones jerarquizando los problemas iniciando desde lo general hasta lo más puntual

2. La toma de decisiones y el cumplimiento de objetivos debe estar respaldado por proposiciones teóricas suficientes	2. La toma de decisiones y el factor humano es un factor primordial en esta metodología	2. La toma de decisiones está en función de las características físicas y el entorno	2. El cumplimiento de cada objetivo está en función del cumplimiento del "quehacer" puntual, es decir de las funciones específicas plateadas
3. Es una teoría de diseño fundamental aplicable a distintas metodologías de diseño	3. Es una extensión al proceso de diseño Armand Hatcuel involucrando actividades económicas dentro del proceso de diseño	3. Se denomina proceso de "proyectar" al generar distintas alternativas partiendo de un postulado	3. Es una metodología de diseño de ingeniería detallado que permite entrelazar objetivos generales con actividades puntuales

En la Tabla 11 se muestra la organización de los requerimientos funcionales siguiendo la propuesta de Rodríguez (1985). En la parte izquierda de esta tabla se definen como problemas claves, 4 grandes grupos que enmarcan todos los requerimientos indicados en la encuesta realizada, y en la parte derecha como subproblemas se enuncian distintas frases o preguntas que darán respuesta de manera puntual a la forma en que se clasificarán los componentes, como lo enuncia el parámetro esencial número 3. Esto fue punto de partida para el siguiente parámetro en el desarrollo de la metodología, el cual está enfocado en la selección de materiales

Tabla 11. Matriz de macroestructura y microestructura

Problema Clave	Subproblemas
Parámetros que desea medir el banco de pruebas	¿De qué manera se puede determinar la fuerza y empuje el cohete?
	¿Cuáles elementos son necesarios para la medición de la temperatura?
	¿Cómo se puede medir la diferencia de presiones del cohete?
	Medición de velocidad de los gases en la tobera de escape
Materiales	Materiales dependiendo su condición y composición
	Maleabilidad dependiendo del material
Operación	Fácil operación y ergonomía del banco de pruebas
	Procedimiento de utilización del banco de pruebas
	Número de conceptos que se pueda determinar en el banco de pruebas
Seguridad operacional	¿Cuál es la carga máxima que soportará el banco de pruebas?
	¿Cuáles elementos debe emplear el operario para la utilización de ensayos en el banco de pruebas?
	¿Cuáles sistemas de emergencia serán previstos?

En la Tabla 12 se muestra la metodología utilizada establecida hasta el momento, donde se añade la respuesta al parámetro esencial 3, que permite clasificar y organizar los componentes que hacen parte del banco de pruebas.

Tabla 12. Parámetro esencial 3

Parámetros esenciales	Metodología utilizada
1	Teoría para resolver problemas de inventiva TRIZ (Genrich Altshuller)

2	Diseño de mecanismos (Arthur, G Erdman y George, N Sandor)
3	Manual de diseño industrial (Gerardo Rodríguez)
4	
5	

4.1.4 Selección de componentes

De acuerdo con el proceso que se vino desarrollando y siguiendo con el cuarto parámetro de comparación se encuentra que existe una estrategia adoptada por la metodología de Ashby (1999) mostrada en la Tabla 13 denominada "función, objeto y restricciones". Es importante tener en cuenta algunos grupos de materiales adecuados, sabiendo que será un factor de rendimiento que puede llegar a brindar una mejor opción para el cliente. Existen otras metodologías de diseño que también realizan un énfasis en la calidad del producto durante sus primeras etapas de diseño. Entre las opciones se encuentra el Método de Taguchi al ser pionero y brindar una mayor influencia en la ingeniería de calidad. Posteriormente otros ingenieros como Kris Downey (2003) y Grima Cintas (2018) se enfocaron en algunos puntos propuestos por Taguchi y realizaron sus propias propuestas de metodologías de diseños para productos tecnológicos

Tabla 13. Función, objetivo y restricciones (Ashby M. F., 1999)

Función	¿Qué hace el componente?
Objetivo	¿Qué se debe maximizar o minimizar?
Restricciones	¿Qué condiciones no negociables deben cumplirse? ¿Qué condiciones negociables pero deseables?

Taguchi (2012) plantea su método alrededor de la comparación entre factores controlados y agentes externos denominados factores ruido. Para realizar una comparación se emplea la aplicación de métodos estadísticos llamado diseño octogonal y donde se tiene en cuenta la manera en que se puede controlar las variables de condiciones externas. Al escoger variables de menor variabilidad de factores externos, el producto o proceso resultante mejora las características ofreciendo una mejor alternativa, esta técnica se le conoce como diseño robusto de parámetros y es ampliamente utilizada en las primeras etapas de diseño. Por otro lado, Downey (2003) tiene un enfoque denominado como "análisis de tolerancia a ensambles inteligentes para diseños robustos", donde el enfoque se centra en la correlación que existe entre las limitantes del sistema y la manera de minimizar la desviación de un valor objetivo o rendimiento deseado. A diferencia de Taguchi, la manera de conseguirlo es a través de una aceptación experimental. Generalmente se emplean analizando por computadora matrices para la predicción de la propagación de tolerancia como, por ejemplo, el método de toma de decisiones de Mann Whitney.

Los métodos anteriormente mencionados y en general los que provienen de Taguchi (2012) aplican métodos numéricos o estadísticos para tener un ambiente de diseño controlado. Es una buena herramienta y sería útil si el enfoque de este proyecto se centrara en el comportamiento de cada variable y de esta manera poder realizar iteraciones que se acerquen a un dato objetivo. Como no se tiene un dato definido para cada variable al cual se quiera llegar porque se realiza de manera más exploratoria. Es más conveniente aplicar la técnica de la metodología de Ashby (1999), que busca optimizar el índice de rendimiento en el proceso de diseño desde el punto de vista de la selección más adecuada para el material y según las restricciones dadas por la función que va a ejercer el componente y por la configuración geométrica del mismo. Para mejorar el índice de rendimiento se

busca minimizar la expresión que representa el índice del material, manteniendo los demás índices constantes. A pesar de que no se seguirá al pie de la letra esta metodología, se tomará como punto de partida para tener un enfoque por parte del material lógico y adecuado, donde sus características principales comparadas se evidencian en la Tabla 14 (Lopéz Beltrán & Torres Salcedo, 2011).

Tabla 14. Selección de componentes (Ashby, 1992)(Lopéz Beltrán & Torres Salcedo, 2011).

Metodología de Ashby	Método de Taguchi	Análisis de tolerancia a ensambles inteligentes para diseños robustos (Kris Downey)
1. Permite la selección de materiales y componentes que mejoren el rendimiento del producto.	1. Permite la comparación de criterios de diseño con base a la relación entre necesidades del cliente, funcionalidad del producto.	1. Permite un complemento a los procesos de diseño actuales a través de la restricción de parámetros disminuyendo efectos de variación.
2. La selección de elementos y materiales se realiza con base a las propiedades más relevantes de cada uno de manera individual y cuya combinación proporciona la mejor selección.	2. Emplea la comparación de factores que pueden ser controlados en el proceso de diseño, para acercarse a un valor objeto y de esta manera ir disminuyendo su variabilidad.	2. Se centra en la correlación que existe entre las limitantes del sistema y la manera de minimizar la desviación de un valor objetivo o rendimiento deseado.
3. Es un método detallado que permite comparar propiedades de los materiales dependiendo de las cargas soportadas y las formas.	3. Es un método detallado y su ejecución se realiza a través de la utilización de métodos estadísticos para comparar factores que pueden contribuir o perjudicar el producto.	3. Es una metodología detallada que utiliza los métodos numéricos para el análisis de matrices y realizar predicciones de tolerancia para valores objetivos.

Cualquier componente de ingeniería tiene una o más funciones: soportar una carga, contener una presión, transmitir calor, etc. Al diseñar el componente, el diseñador tiene un objetivo: hacerlo más económico posible, más ligero, más seguro, o quizás alguna combinación de estos. Además, debe lograrse a partir de las restricciones como, por ejemplo: dimensiones fijas, cargas o presiones que el componente debe soportar sin fallar, funcionamiento en un cierto rango de temperatura y ambiente dado, entre muchas más. La función, el objetivo y las restricciones definen las condiciones de contorno para seleccionar un material y, en el caso de componentes que soportan carga, una forma para su sección (Ashby, 1992). Es importante tener claro que se establecerá la ruta adecuada para determinar cómo seleccionar el material más apto en cada parte del banco de pruebas sin entrar en detalles. Por ejemplo, lugares donde sea necesario aislantes térmicos para los cerámicos, lugares donde sea necesario una resistencia a la corrosión para los compuestos, lugares donde sea necesario una impermeabilidad para los polímeros, entre otros.

Respondiendo a las aclaraciones de la metodología de Ashby de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y de acuerdo con el desarrollo de la investigación y de los requerimientos del cliente resumidos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se define la funcionalidad general del banco de pruebas y posteriormente se especificaron los diferentes componentes. La actividad de diseñar se ejerce de manera iterativa y en el transcurso del desarrollo de este proceso se puede ir optando en que se debe maximizar y/o minimizar partiendo de unos objetivos ya planteados. En cuanto a las restricciones se debe partir del conjunto de necesidades del cliente ya planteadas y las necesidades funcionales del banco de pruebas. Se debe recordar y tener claro que este proceso no detallará ni realizará una descripción puntual porque es una fase preliminar y su objetivo es realizar propuestas basadas en requerimientos técnicos que pueden ser acordados con el cliente de acuerdo con el nivel de importancia y posibles dificultades en posteriores fases de diseño. Hasta el momento ya se realizó un acotamiento de las restricciones optadas por el cliente en la encuesta realizada y las limitaciones propias del proyecto.

Partiendo del término metodología entendido como el conjunto de recomendaciones para actuar en un campo específico de la resolución de problemas. Se espera de una metodología que ayude al solucionador a determinar la secuencia de las acciones (¿Cuándo hacer qué?), el contenido de las acciones (¿Qué hacer?) y los procedimientos específicos, las técnicas (¿Cómo hacerlo?). Que, a diferencia de una receta, la cual constituye una rutina, es decir, un camino preestablecido para lograr un objetivo, la receta o rutina carece de carácter problemático (Rodriguez, 1985).

Para ello a continuación, se realizó un desglose de los subproblemas de la Tabla 11 por separado, donde se muestra la postulación de diferentes elementos que respondan a la necesidad. Esto se realizó para satisfacer la descripción conceptual y ofrecer distintas opciones al cliente y al mismo tiempo cumplir con la ejecución de la metodología de diseño. Como punto de partida, en la Tabla 15 se proponen diferentes elementos para solucionar el problema clave "Parámetros que desea medir el banco de pruebas".

Tabla 15. Subproblemas generados en el problema clave "Parámetros que desea medir el banco de pruebas"

Subproblema	Elemento
¿De qué manera se puede determinar la fuerza y empuje el cohete?	Dinamómetro
	Celda de carga
	Galgas extensiométricas
	Sensores piezoeléctricos
¿Cuáles elementos son necesarios para la medición de la temperatura?	Termómetro
	Termistor
	Termopar
	Pirómetro
¿Cómo se puede medir la diferencia de presiones del cohete?	Manómetro
	Vacuómetro
	Manómetro Bourdon
	Tubo de Torricelli
	Barómetro
Medición de velocidad de los gases en la tobera de escape	Anemómetros térmicos
	Tubo Venturi
	Placa orificio
	Rotámetros

Para seleccionar los elementos de la Tabla 15 fue importante tener en cuenta los instrumentos utilizados en el mercado en máquinas similares u otros bancos de prueba según el proveedor Omega Engineering, (2021). Por ejemplo, existen celdas de carga tipo hidráulicas, neumáticas y de cargas extensiométricas, las dos primeras basan su funcionamiento en el equilibrio de fuerza que mide el peso como un cambio en la presión de un fluido interno de un dispositivo tipo diafragma, esta fuerza actúa sobre un cabezal y es transmitida a un pistón. Estos sistemas son precisos y el fluido no se ve afectado por la temperatura ni agentes externos. Por otro lado, las celdas de cargas extensiométricas están sujetas a una viga o elemento estructural que se deforma cuando es aplicada una carga sobre él, y estas deformaciones son transformadas en señales eléctricas. Normalmente son utilizadas cuatro celdas al mismo tiempo para optimizar su sensibilidad porque su funcionamiento se ve afectado por la temperatura.

Por otro lado, los sensores piezoeléctricos y los dinamómetros son instrumentos de medición de fuerza muy diferentes a los sensores basados en galgas extensiométricas. Primeramente, los sensores piezoeléctricos están constituidos por varias secciones de un cristal monocristalino, que al

ser sometido por una fuerza de compresión genera corrientes eléctricas. Para censar la presión, tensión o fuerza de empuje, lo realiza bajo el principio transformación de lecturas en señales eléctricas y toda la estructura está alojada en una carcasa. El electrodo y la carcasa absorben la corriente eléctrica y la transmiten a un amplificador de carga a través de un cable de carga coaxial (HBM an HBK Company, s.f.). Los dinamómetros básicamente son un elemento elástico los cuales son sometidos a compresión o tensión, generalmente compuestos por un resorte o una palanca. Sin embargo, existen dinamómetros sencillos o compuestos con galgas extensiométrica para aumentar la precisión de medición detectando mejor la deformación producida a través de una alteración de su resistencia debido al cambio de su longitud, este cambio en su resistencia se puede medir a través de una configuración denominada puente de Wheatstone (Palacios Montero & Torres Villalba, 2019).

El siguiente problema clave está relacionado con los "materiales", en la Tabla 16 se evidencia el listado de elementos propuestos para la resolución de subproblemas. Cabe recalcar que en esta sección se encontraron el grupo de materiales estructurales más utilizados según lo evidenciado por el Instituto Técnico de Estructura en Acero (2013) sin precisar en referencia o marca alguna. En un principio las aleaciones de hierro y los metales nobles fueron los primeros metales en ser introducidos en aplicaciones estructurales en los años 1800 en construcciones de puentes y edificios, y la mayoría de estos se caracterizan por una buena conducción eléctrica y elevado punto de fusión, lo cual permitió posteriormente gracias a los avances de la metalurgia y la soldadura eléctrica un crecimiento del uso del acero. El acero estructural está compuesto por hierro puro y por elementos conocidos como metaloides, los cuales cuentan con propiedades de los metales y los no metales al mismo tiempo como el carbono. Según Stupenengo (2011) estos elementos son estables en cuanto a peso y fuerza, contando con una mejor maleabilidad y logrando que su construcción sea fácil de conseguir. En comparación con el aluminio, este se caracteriza por ser más ligero al acero, más resistente a la corrosión y su maleabilidad permite un mecanizado más fácil. Este material es producido con diferentes características en cuanto a dureza y resistencia.

Tabla 16. Subproblemas generados en el problema clave "Materiales"

Subproblema	Elemento
Materiales dependiendo su condición y composición	Metales Nobles
	Acero inoxidable
	Superaleación
Maleabilidad dependiendo del material	Aceros estructurales
	Aluminio estructural
	Materiales compuestos

Otro gran grupo son los materiales compuestos que permiten obtener propiedades deseadas que no se encuentren naturalmente en otros materiales, y pueden ser utilizados como refuerzos para mejorar las propiedades químicas y físicas del material base, lo que puede ser un buen complemento para los metales nobles e inclusive para maderas, polímeros o algunos materiales no soportan altas temperaturas (Stupenengo, 2011). Por último, se tienen en la selección de materiales las superaleaciones, las cuales son utilizados en aplicaciones mecánicas, además brindan resistencia a altas temperaturas, resistencia a la corrosión y a la oxidación (ITEA, 2013).

Otro aspecto clave es la "Operación" del banco de pruebas y este punto está enfocado hacía los elementos complementarios, pero de igual importancia que los demás. El banco de pruebas no solo debe encargarse de tomar datos, también debe existir mecanismos capaces de recolectar y mostrar la información tomada, así como mecanismos de unión y/o sujeción. En la Tabla 17 se muestran los elementos referentes a circuitos eléctricos y electrónicos destacados, adicionalmente se muestran

los elementos necesarios que debe utilizar el operario para su protección y seguridad.

Tabla 17. Subproblemas generados en el problema clave "Operación"

Subproblema	Elemento
Fácil operación y ergonomía del banco de pruebas	Servomecanismo
	Mecanismos eléctricos
	Sistemas mecánicos
Procedimiento de utilización del banco de pruebas	Manual de especificaciones
	Guía de equipamiento para construcción
Número de conceptos que se pueda determinar en el banco de pruebas	Monitor
	Circuito integrado
	Almacenamiento de disco duro

Los sistemas de seguridad son aplicados para toda máquina con el fin de garantizar la integridad del operario y del sistema. Cumpliendo la normativa colombiana establecida por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (1994) delegatorio de funciones presidenciales por el decreto 1295 de 1994, el cual determina la organización y administración del sistema general de riesgos profesionales, es importante tener en cuenta los riesgos que pueda llegar a estar expuesto el operario. Por esta razón, en la Tabla 18 se muestran los elementos relacionados con el problema clave "Seguridad operacional" y que son utilizados en otras máquinas de operación industrial. Todos los elementos, sistemas y subsistemas de la máquina contemplan una vida útil, así como un plan de mantenimiento, habrá fallas que pueden ser tratadas de manera preventiva o correctiva según la complejidad y el caso en particular; estas especificaciones pueden encontrarse en el manual técnico y/o en la carta de seguridad.

Tabla 18. Subproblemas generados en el problema clave "Seguridad operacional"

Subproblema	Elemento
¿Cuál es la carga máxima que soportará el banco de pruebas?	Carta de seguridad
	Sensor de alarma
	LED de advertencia
¿Cuáles elementos debe emplear el operario para la utilización de ensayos en el banco de pruebas?	Protección para la cabeza
	Protección auditiva
	Traje de protección industrial
	Protección ocular
¿Cuáles sistemas de emergencia serán previstos?	Dispositivo de corte de energía
	Sistema contra incendio

Otra manera de contemplar posibles fallas es a través de sensores o dispositivos visual-auditivos como, por ejemplo; alarmas o sensores LED (Light-Emitting Diode), que le notifiquen al operario cuando algo no está bien en la operación de la máquina, lo cual ayudará a evitar un riesgo y posible accidente. Como alternativa y/o complemento a estos sistemas, el banco de pruebas puede contar con dispositivos de disparo automático de corte de energía. Teniendo en cuenta que el dispositivo a ensayar es una máquina térmica que alcanza altas temperaturas, es posible proveer un sistema contra incendio. Terminando con la sección de "Seguridad operacional", es importante contemplar la protección que debe tener el operario del banco de pruebas, para la resolución de este subproblema o problema en particular, se propone indumentaria de protección corporal, protección auditiva, protección ocular y protección craneana.

Después de seleccionar cada grupo de elementos es necesario definir las propuestas optadas por

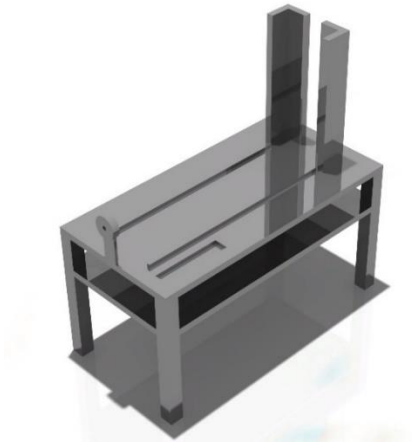
cada participante del proyecto. Con el paso del tiempo distintos autores han propuesto este sistema y lo han llamado de distintas maneras. Por ejemplo, Osborn (1953) lo denomina como "brainstorming" (reunión de ideas por su traducción al español), los académicos en ciencias sociales y humanidades Michael Diehl y Wolfgang Stroebe (1991) lo llama como "generación de ideas en grupo" y el diseñador en Nigel Cross (2002) lo llama "lluvia de ideas". Todas estas estrategias tienen la misma finalidad de obtención de diferentes puntos de vista de un grupo de personas expertas o incluso personas que conozcan del tema.

No existe una matriz propuesta por cada uno de los autores para la clasificación y ejecución de la técnica "lluvia de ideas" por esta razón se siguió una ampliación realizada por en el Instituto de gobierno y de gestión pública en conjunto con la Universidad San Martín de Porres de Lima, Perú, expuesta en la charla sobre identificación del problemas y alternativas de solución (Universidad de San Martín de Porres, 2015). Allí se propone que para cualquier problema se deben cumplir por lo mínimo 5 criterios: costo total, probabilidad de alcanzar los objetivos, horizonte de tiempo, coste – beneficio y riesgos sociales o algunos otros similares. Para este se adoptaron los criterios: utilidad para futuras fases de diseño, probabilidad de alcanzar los objetivos, requerimiento – función, calidad y riesgos laborales, teniendo en cuenta la fase de diseño preliminar, los requerimientos planteados por parte del cliente y los requerimientos propios de la máquina y que por lo menos cada opción responda a uno de estos criterios.

A continuación, se realizó una descripción de cada opción indicando las ventajas, desventajas y características propias. Teniendo en cuenta los componentes que hacen parte de la fase preliminar de diseño, es viable mencionar que en cada una de las opciones indicadas a continuación hicieron uso obligatorio de los siguientes componentes al poner como prioridad la salud de cualquier persona que manipule el banco de prueba: casco, protectores auditivos, traje de protección industrial y por último objetos para la protección ocular. Si en alguna ocasión el banco de prueba presenta comportamientos fuera de lo habitual, ya sea con gases fuertes por conflagración por algún circuito o en condiciones normales de uso, este contara con un sistema contra incendios y un dispositivo de corte de energía inmediato para prevenir cualquier posible incidente en las instalaciones en las que se encuentre ubicado.

Para la **primera** opción se encuentran componentes compactos como lo son las galgas extensiométricas para medir fuerzas aplicadas en algún área específica, contando con sensores sensibles a la fuerza ejercida y provocando así una alta precisión (Omega Engineering (b), 2021), y pirómetros los cuales son dispositivos capaces de censar la temperatura de un objeto y/o sustancia sin la necesidad de entrar en contacto con este, adicionalmente en un extremo está alojada una placa orificio para determinar la velocidad de los gases de escape. Estos elementos pueden ser adaptados fácilmente sobre cualquier estructura de forma horizontal como se muestra en el boceto de la Figura 15. Para este caso se seleccionó acero inoxidable porque es un material con una alta resistencia a la corrosión, alta resistencia mecánica y es un material reciclable. Además de esto es un material con propiedades que permiten un mecanizado, corte, plegado y doblado más sencillo. Sin embargo, según el Instituto Técnico de la Estructura en Acero (2013). el acero inoxidable es propenso a sufrir rayones y abolladuras difíciles de corregir, y al ser un excelente conductor de calor debe contar con un sistema de enfriamiento para que no se vean afectados otros sistemas montados en la estructura.

Figura 15. Boceto opción 1



Por esta razón, el banco de pruebas puede contar con un compartimiento donde haya un flujo de calor menor y donde puedan estar incluidos mecanismos eléctricos que irán conectados de manera específica en puntos definidos como se muestra en el boceto de la Figura 15. En esta zona también se puede encontrar el sistema de almacenamiento de disco duro donde se recolecten y guarden los datos obtenidos y donde se provee una compatibilidad con otras máquinas como computadores portátiles, microcontroladores, circuitos electrónicos, etc (Todo eléctrico, 2021). Pero algunos de estos dispositivos electrónicos pueden verse afectados por las condiciones del medio como humedad, polvo, humo y/o radiación térmica.

Otra desventaja es el sistema de Tubos Torricelli, los cuales son dispositivos capaces de censar la presión de los fluidos en diferentes puntos del banco, y el cambio que tiene a lo largo de una sección definida, pero la configuración, el tamaño y compatibilidad con los demás sistemas puede ser un problema en la instalación del banco (Jalloul, 2015). Otro aspecto de gran importancia a considerar son los esfuerzos máximos, cargas o pesos que pueda soportar el banco de pruebas para la seguridad e integridad funcional de todo el banco, y por esto para esta primera opción se decidió emplear sensores de alarma el cual se activen cuando detecten un peso o una carga máxima riesgosa.

Para la **segunda** opción los elementos seleccionados requieren de mayores sujeciones y de una estructura más versátil que pueda brindar seguridad, pero al mismo tiempo soportes de donde se puedan sujetar e instalar los componentes. Como por ejemplo el termómetro de infrarrojo con pantalla digital para determinar las temperaturas, el barómetro para determinar la diferencia de presiones y la utilización de rotámetros siendo dispositivos que miden el caudal volumétrico de fluido; estos dos últimos tiene una forma cilíndrica lo cual para su utilización se recomienda una posición paralela a la posición del banco motor cohete a probar. Para esta segunda opción se recomienda una configuración vertical con tobera de salida en la parte superior con forma de jaula donde se adapten todos los elementos como se propone en el boceto de la Figura 16.

Figura 16. Boceto opción 2

Así mismo se utilizaron sensores piezoeléctricos siendo mecanismos precisos, pero que necesitan la implementación de circuitos electrónicos que amplifiquen la señal medida porque por sí solos la señal de salida es muy débil, lo cual es importante a la hora de tener en cuenta los errores de la medición. Asimismo, se pueden utilizar más de un sensor piezoeléctrico de uso industrial, los cuales estén adaptado a una placa que soporte directamente el motor del cohete como se propone en el boceto de la Figura 16. En esta segunda opción los materiales seleccionados son las superaleaciones que ofrecen buenas propiedades, pero como factor importante los procesos de fabricación son complejos y específicos, donde la forma deseada es limitada y depende de cada superaleación en particular (Cárdenas Fernández, 2015). La forma también debe brindar la facilidad de montaje y desmontaje de ciertos mecanismos que deben ser calibrados periódicamente según el manual propio de cada elemento y por esta razón también se recomienda una estructura de concepto abierta como se muestra en el boceto o se puede optar por aceros estructurales como complemento a las superaleaciones. Cabe mencionar que el mantenimiento de las superaleaciones requiere de procesos complejos y el acero estructural es sensible a la corrosión por lo cual se debe pintar regularmente.

Para la parte operacional del banco de prueba de esta segunda opción de diseño es importante tener en cuenta la seguridad y comodidad tanto del banco de prueba como la del operario que manipule la máquina. Por esta razón, se decidió implementar los llamados servomecanismos utilizados normalmente en sistemas de automatización y en aplicaciones de mecanizado de control numérico por ordenador (CNC). Incluso se puede incluir en este sistema de servomecanismos para detectar fallas tanto técnicas como estructurales, un LED de advertencia adicional a los sistemas de emergencia fundamentales ya mencionados que detecte algún procedimiento erróneo y evite cualquier clase de accidente. Igualmente se sugiere leer la carta de seguridad que contenga en este caso el banco de prueba y cada componente, también incluida en las otras opciones.

Para la opción **tres** se tiene como elemento de medición de fuerza o empuje el dinamómetro. Las ventajas que tiene el dinamómetro en comparación a los otros instrumentos de medición de fuerza incluyen un mecanismo compacto y la diversidad de tamaños que permiten una fácil adaptación al banco de pruebas. Aunque es importante la capacidad de disipación de calor del instrumento al estar sometido a ensayos de larga duración, y precisamente las desventajas están relacionadas con el sistema de enfriamiento el cual es complejo y requiere de una gran cantidad de líquido refrigerante.

Como consecuencia, el desgaste es elevado, especialmente por fenómenos de cavitación y turbulencias para dinamómetros hidráulicos, provocando un mantenimiento más frecuente (Amarilla, 2021). Por esta razón, en esta opción se propone una estructura que cuenta con tuberías para transportar el líquido de enfriamiento, así como una plataforma principal donde se implementen todos los componentes de medición sin proporcionar una forma compleja como se muestra en el boceto de la Figura 17.

Figura 17. Boceto opción 3

Existen otros sistemas que requieren del uso de mangueras como los vacuómetros, utilizados para medir la presión producida por un gas y principalmente utilizado en aplicaciones de plantas motrices que a diferencia de los manómetros pueden medir presiones en vacío, y utilizados esencialmente en carburadores para coches (Briceño, 2019). Se propuso un conjunto de circuitos integrados programados y configurados para almacenar la información en un disco duro en conjunto de subsistemas como la tecnología infrarroja para detección de temperaturas ofreciendo un amplio rango operación desde temperaturas en grados negativos hasta llegar a los 4000°C para los más potentes. La estructura mecánica es una plataforma móvil compuesta por rodamientos que soportan el motor y acoplado al dinamómetro, la medición de este elemento es convertida en una señal eléctrica por medio de un transductor, el cuál almacenará la información en el disco duro. La ventaja de los discos duros de almacenamiento utilizados actualmente es que son compatibles con la mayoría de las computadoras del mercado sin necesidad de exigir un gran rendimiento, y en el mercado se encuentra una gran variedad de sistemas integrados como Arduino, BeagleBone, Nanode, Raspberry Pi, entre muchos otros.

Para este caso los materiales seleccionados hacen parte de los metales nobles que por sus características permiten al banco de pruebas soportar altas temperaturas, ofrecen propiedades relacionadas con resistencia mecánica y a la corrosión, como por ejemplo el platino (Ashby M. F., 1999). Pero las desventajas que se encuentran en este tipo de metales son sus escases como recurso natural en la tierra (Shigeru Mizuno, 1931).Debido a su alto punto de fusión, su maleabilidad y procesos de manufactura requieren procesos de producción específicos y en ocasiones limitado. Por tal razón, se optó por un refuerzo de material compuesto en algunas secciones. Teniendo en cuenta que para la medición de temperatura se utiliza un termómetro infrarrojo, el metal puede intervenir en la medición de este parámetro, mientras que la utilización de material compuesto puede llegar a ser más resistente que el acero u otro metal.

Por último, en la opción tres adicionalmente a los elementos de protección ya mencionados, se optó por una alarma ya sea en forma de luz y/o en forma de sonido que avise al operario que algo no anda bien en la operación de la máquina como complemento. Es importante que sea de fácil reconocimiento para el operario porque adicionalmente se vio la necesidad de protección auditiva

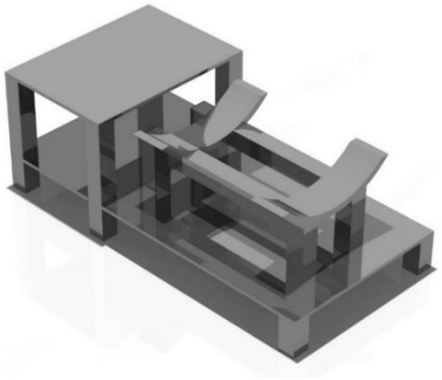
para el mismo. Para los motores cohetes de combustible líquido al igual que cualquier tipo de motor, ya sea recíproco o a reacción, se caracterizan por generar una gran contaminación auditiva. En el caso de los motores recíprocos cuentan con un sistema de escape que al mismo tiempo cumple la función de silenciador. Para los motores a reacción y motores cohete no existe un mecanismo tan eficiente que cumpla este objetivo, es por esto, que se adopta por un protector auditivo para el operario.

Para la opción **cuatro** se tomó como instrumento de medición de empuje una celda de carga. Cabe resaltar su precisión y exactitud debido a su sensibilidad en sus sensores, así como una fácil instalación. Sin embargo, la mayoría de las celdas de cargas no están aisladas totalmente, lo cual requiere una protección adecuada ya que puede verse afectada por factores externos y una de sus limitantes se relacionan con auto- calentamiento que debe ser controlado con un sistema de refrigeración adecuado (Omega Engineering (a), 2021) (Watlow Powered by Possibility, 2021). Como complemento para controlar y medir la temperatura producida por el banco de pruebas, en esta opción se utiliza un termistor. Son instrumentos económicos sensibles al cambio de temperatura y de rápida medición, siendo buen complemento con sistemas eléctricos y electrónicos.

El siguiente elemento es un manómetro de Bourdon, el cual se puede adaptar fácilmente para la medición del cambio de presión en un líquido o un gas. Pero, estos tipos de manómetros tienden a fallar por fatiga o por corrosión ya que están compuestos principalmente por metales con baja resistencia a esta característica (MetAs & Metrólogos Asociados , 2007). Actualmente el principio de funcionamiento es aplicado a válvulas o a otros mecanismos como lo son el tubo Venturi. Este dispositivo es utilizado para la medición de velocidad cuando existe un cambio de área transversal que en este caso es la tobera de escape. Este mecanismo tiene una operación muy estable, aunque su instalación es compleja. (Acosta, 2001).

Para esta opción se escogió un material conformado de aluminio estructural y como ventaja se resaltan sus procesos de manufactura que permiten una maleabilidad muy fácil, obteniendo piezas de gran complejidad como se muestra en la Figura 18. Para complementar las características propiciadas por el banco de la opción número 4, se determinó la utilización de mecanismos eléctricos para convertir las señales tomadas por los instrumentos, en pulsos eléctricos de tal manera que su resultado fuera mostrado en un monitor integrado e incluido en el banco de pruebas. Este sistema permitirá la visualización en tiempo real en vez de un almacenamiento de los datos obtenidos y la complejidad del circuito no será tenida en cuenta en esta fase de diseño preliminar. Por último, se tomarán las medidas de seguridad para el operario y para la maquina anteriormente mencionadas.

Figura 18. Boceto opción 4



Para la opción **cinco** nuevamente se escogió una celda de carga como elemento de medición para empuje y que, en conjunto con un termopar, forman un sistema compacto, de fácil reemplazo y práctico para la medición de fuerza y temperatura a la vez (Lopéz Beltrán & Torres Salcedo, 2011). Ambos elementos son robustos y pueden llegar a trabajar en un rango de operaciones alto en comparación con un dinamómetro y un termistor respectivamente. Aunque algunos termopares crean un fenómeno denominado "unión termoeléctrica" que consiste en la creación de voltaje dada por la unión del sistema en sí. Para compensar la medición de una temperatura adicional se utiliza un termistor o un circuito integrado como se utilizó en este caso (Pastor, 2013).

Para esta opción se propuso la utilización de un manómetro para la determinación de la diferencia de presiones creadas en el interior del banco de pruebas. Para este caso es posible la medición de la presión absoluta y la presión relativa con el mismo instrumento y los medidores de presión modernos se controlan a través de un microprocesador, por lo que tienen un rápido tiempo de respuesta (PCE Instruments Chile SA, 2008). Algunos permiten transferir los datos a un PC (equipos con interfaz). Además, la ventaja de los manómetros modernos es que pueden estar constituidos con otros accesorios como los anemómetros. Estos dispositivos son utilizados para la medición de velocidad de un fluido. Para este caso en particular es utilizado para la medición de velocidad de los gases de escape en la tobera de salida. Algunos instrumentos utilizan la relación que existe entre la transferencia de calor del fluido para determinar la velocidad, y son denominados "anemómetros térmicos" (Omega Engineering (c), 2021).

Continuando con la descripción de especificaciones seleccionada en la opción 5, se encuentra la elección de aluminio estructural y acero inoxidable para la composición del armazón del banco de pruebas. Es una excelente combinación ya que ambos materiales tienen una alta resistencia a la corrosión, pero el aluminio es más ligero que el acero inoxidable y más maleable. En conjunto permiten brindar un mayor soporte y resistencia a las cargas hechas por el motor del cohete y al mismo tiempo brindar una ligereza en zonas que no requieren de tanta resistencia, pero si la creación de formas más específicas como se muestra en la Figura 19. En este boceto se planteó un armazón cúbico que brinda resistencia y para la ubicación del motor se encuentran formas puntuales que requieren de un proceso de fabricación o maquinado especial. Adicionalmente, se complementa con un sistema de servomecanismos formados por partes electrónicas y mecánicas, que permiten la transformación de un movimiento en una señal electrónica de manera automatizada. Para complementar la toma de datos el sistema se adapta un monitor que sea capaz de mostrar los resultados obtenidos que sea fácil de utilización por parte del usuario.

Figura 19. Boceto opción 5

En la Figura 19 se muestra el resumen de cada opción con los elementos seleccionados y anteriormente descritos. Allí no se encuentran los elementos de seguridad que tienen en común todas las alternativas, sino que se hace énfasis a las características propias brindadas.

Tabla 19. Opciones de diseño propuestas

	Elemento	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5
Medición de fuerza y/o empuje	Dinamómetro					
	Celda de carga					
	Galgas extensiométricas					
	Sensores piezoeléctricos					
Medición de temperatura	Termómetro					
	Termistor					
	Termopar					
	Pirómetro					
Medición de presión	Manómetro					
	Vacuómetro					
	Manómetro Bourdon					
	Tubo de Torricelli					
	Barómetro					
Medición de velocidad	Anemómetros térmicos					
	Tubo Venturi					
	Placa orificio					
	Rotámetros					
Materiales	Metales Nobles					
	Acero inoxidable					
	Superaleación					
	Aceros estructurales					
	Aluminio estructural					
	Materiales compuestos					
Subsistemas	Servomecanismo					
	Mecanismos eléctricos					

	Sistemas mecánicos					
Operación	Manual de especificaciones					
	Guía de equipamiento para construcción					
Toma de datos	Monitor					
	Circuito integrado					
	Almacenamiento de disco duro					
Seguridad del banco	Carta de seguridad					
	Sensor de alarma					
	LED de advertencia					
Seguridad del operario	Protección para la cabeza					
	Protección auditiva					
	Traje de protección industrial					
	Protección ocular					
Sistemas de emergencia	Dispositivo de corte de energía					
	Sistema contra incendio					

Teniendo claro los elementos seleccionados y antes de seguir con el siguiente parámetro esencial que debe cumplir la metodología utilizada, en la Tabla 20 se muestra el resumen de la manera en que se le ha dado respuesta a cada parámetro hasta el momento.

Tabla 20. Parámetro esencial 4

Parámetros esenciales	Metodología utilizada
1	Teoría para resolver problemas de inventiva TRIZ (Genrich Altshuller)
2	Diseño de mecanismos (Arthur, G Erdman y George, N Sandor)
3	Manual de diseño industrial (Gerardo Rodríguez)
4	Metodología de Ashby
5	

4.1.5 Comparación de propuestas de diseño

Es muy importante tener en cuenta que pueden existir máquinas similares que cumplan los requerimientos del cliente. Por eso, es relevante aplicar una técnica que realice un balance entre los

requerimientos del cliente y las funciones técnicas del producto (Martinez Muñiz, Gonzalez Morales, & Ayvar Suarez, 2017). De esta manera será mucho más fácil para el cliente poder elegir entre una variedad de productos. Para finalizar este capítulo, referente al último parámetro de comparación es la selección de una técnica que permita comparar las distintas alternativas de diseño propuestas y seleccionar la mejor. Shigeru Mizuno (1931). es considerado como el padre de control de calidad por sus aportes en el campo industrial, pionero en este campo y su trabajo insignia es el libro "The Economic Control of Quality of Manufactured Product". Allí se proponen 7 diagramas que abarcan distintos tipos de herramientas para la evaluación de productos en el proceso de diseño.

Según Martinez Guerra et al (2018).el primer diagrama es denominado como "diagrama de relaciones" el cual es utilizado de manera intuitiva ya que no tiene una estructuración lineal. Su forma es muy similar a una telaraña donde simplemente se busca conectar las variables que estén interrelacionadas, y su utilización está enfocada en el análisis de problemas causa -efecto, en donde no es aplicable para este caso ya que no permite una evaluación individual de cada propuesta. El segundo diagrama es conocido como "afinidad", el cual está definido por etapas cuyo objetivo es reunir ideas y poder definir sus similitudes. Esto permite realizar una comparación, así como el afianzamiento de ideas, pero su organización y estructuración no permite dividir las características de manera individual, por tal motivo tampoco es conveniente su aplicación,

Continuando con lo expuesto por Martinez Guerra et al (2018) el siguiente esquema es el "diagrama de árbol" el cual parte de un dato general y en cada fase es subdividida en especie de ramas. Donde su objetivo es expandir de forma más detallada un concepto general y de esta manera dar rutas y/o segmentación del problema, lo cual tampoco es compatible con este proyecto. El cuarto método es el "diagrama de flechas" el cual es muy similar al "diagrama de relaciones" con la diferencia que tiene un evento inicial y uno final, de tal manera que sigue un paso a paso organizado y su aplicación es ejercida a planes de control, planificación de eventos y técnicas de seguimiento o evolución de un proceso y/o producto. El quinto método se llama PDPC ("Cuadro de análisis del proceso de decisiones" por sus siglas en inglés Process Decision Program Charts), el cual es un proceso dinámico utilizado en problemas de intervención humana relacionada con el medio de trabajo. Su objetivo es el planteamiento de toma de decisiones para anticiparse a consecuencias indeseables. Los dos últimos métodos se denominan "diagramas matriciales" y "carta matricial de análisis de datos", en donde ambos permiten evaluar factores o elementos que solucionen un mismo problema. Su principal diferencia recae en la existencia de una dependencia entre variables, donde los resultados dependen de los distintos eventos evaluados. Mientras que, el otro permite una comparación de conceptos múltiples que a pesar de existir una correlación los resultados de comparación son totalmente independientes (Paz & Gómez, 2013).

En lo expuesto por Yepes (2014) este último fue el más conveniente a utilizar por la adaptación a las necesidades del proyecto. Adicionalmente ha sido adoptadas por grandes empresas como Toyota, Ford, Bridgestone y Hewlett-Packard, en la creación de productos nuevos y poderlos comparar con otras alternativas ya sea de la misma compañía o de la competencia. Esta herramienta permite de forma estructurada recolectar información de tal manera que la prioridad sea los requerimientos del cliente y también es conocida como "casa de la calidad. (Paz & Gómez, 2013)." Esta técnica se realiza a través del planteamiento de una matriz de función de calidad que se asemeja a la forma de una casa y por eso su nombre, en donde se interrelacionan las demandas y exigencias de los clientes con las características técnicas del producto. De igual manera en la Tabla 21 se resaltan todas las características propias de la casa de la calidad que se adaptan mejor a este proyecto.

Tabla 21. Matriz de calidad (Yepes Piqueras, 2014)(Martinez Guerra et al., 2018)(Paz & Gómez, 2013)

Diagrama de relaciones	Diagrama afinidad	Diagrama de árbol	Diagrama de flechas	Cuadro de análisis del	Diagramas matriciales	Casa de la calidad

				proceso de decisiones		
1. No tiene una estructura lineal y se parece a una telaraña	1. Su estructura se basa en la organización ideas de acuerdo con grupos establecidos para relacionar variables	1. Su estructuración es sistemática de manera que ramificada partiendo de un concepto hasta generar distas rutas de solución	1. Tiene una estructura organizada paso a paso donde se requiere un evento inicial y uno final	1. Es una técnica estructurada y detallada que conlleva acciones de decisión	1. Es un método dinámico y estructurado que permite una comparación de conceptos siempre y cuando exista una correlación entre ellos	1. Es un método riguroso y detallado que permite una de comparación de conceptos con resultados diferentes
2. Busca conectar las variables que estén interrelacionadas, y su utilización está enfocada en el análisis de problemas causa - efecto	2. Permite una comparación afianzamiento de ideas, pero su organización y estructuración de manera general y no individual	2. Parte del objetivo a alcanzar y genera una expansión donde los conceptos están vinculados	2. Permite mejorar con el paso de cada etapa donde la planificación tiene un gran impacto	2. Es un proceso dinámico donde se relacionan la toma de decisiones humanas con el medio de trabajo	2. Permite obtener resultados deseados, evaluando el progreso y la variabilidad de los resultados	2. Permite segmentar un mercado analizando características que se relacionan
3. Se utiliza para resolver problemas con gran dificultad y con el principal objetivo de interrelacionar las variables	3. Se utiliza para problemas de mejora o ampliación de procesos	3. Es utilizado en problemas de decisión y probabilidad	3. Es utilizado en problemas de seguimiento y monitoreo que conlleven un progreso detallado en distintos cambios de situación	3. Es utilizado en problemas que evalúen eventos que involucren la acción humana	3. Es utilizado para establecer conclusiones a través de la correlación de factores o elementos de algún problema puntual	3. Es utilizado para comparar alternativas de algún producto en particular de un sector industrial o comercial puntual

Por lo anterior, se tiene que para dar respuesta al parámetro esencial 5, el cual indica una técnica que permita comparar las distintas propuestas de diseño fue por medio de la casa de la calidad. Antes de empezar a desarrollar la matriz de la casa de la calidad, en la Tabla 22 se muestra la metodología utilizada resultante. Donde se le da respuesta a cada uno de los 5 parámetros esenciales propuestos, que buscan solucionar las necesidades del cliente.

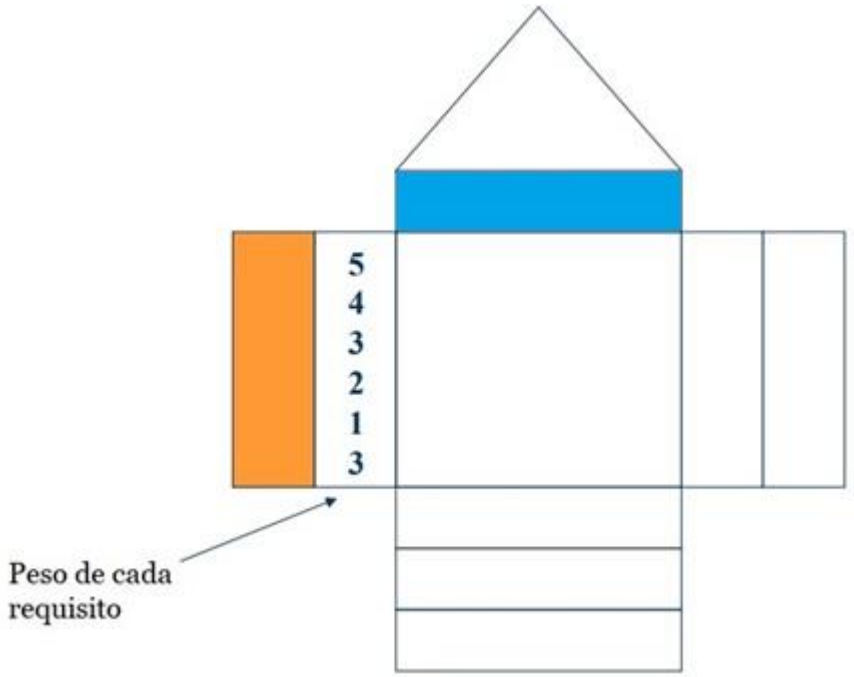
Tabla 22. Parámetro esencial 5

Parámetros esenciales	Metodología utilizada
1	Teoría para resolver problemas de inventiva TRIZ (Genrich Altshuller)
2	Diseño de mecanismos (Arthur, G Erdman y George, N Sandor)
3	Manual de diseño industrial (Gerardo Rodríguez)
4	Metodología de Ashby
5	Casa de la calidad

Siguiendo con la explicación de los componentes principales que conformar la matriz de la “casa de

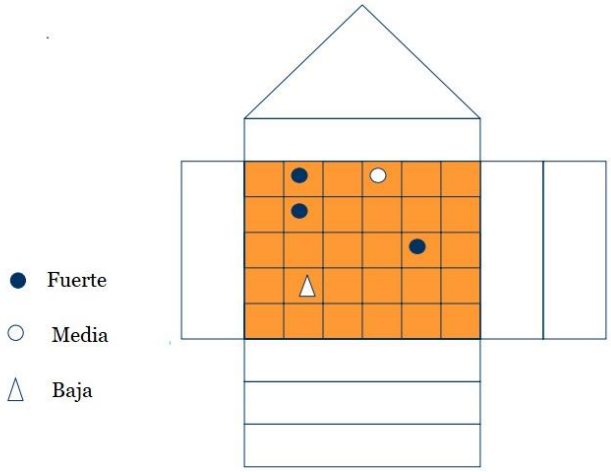
la calidad". Como punto de partida en la parte izquierda se encuentra las especificaciones del cliente en donde cada punto cuenta con un respectivo peso de acuerdo con la prioridad del cliente como se resalta en la Figura 20 en la zona naranja. Esta matriz al igual que en este proyecto, se prioriza las características del cliente y se le da un valor de acuerdo con los resultados obtenidos en la encuesta. Esta sección es llamada por algunas literaturas como los "Qué", es decir; a lo que debe apuntar el desarrollo del producto y los problemas a solucionar. En la Figura 20 en la zona azul se muestra de la parte superior de la matriz de la "casa de la calidad" corresponde a las especificaciones técnicas del producto, que en este caso está descrita en forma de subproblemas puntuales que aborda cada opción planteada y mencionada anteriormente, estos subproblemas fueron desglosados para el planteamiento de cada opción y será evaluada individualmente posteriormente. Esta sección se denomina los "Como", es decir; de que manera el provedor, la empresa o en este caso quienes suministran las altertivas de solución en su rol de diseñadores, deben cumplir o por lo menos tener una correlación referente a los requerimientos del cliente.

Figura 20. Requisitos del cliente y requerimientos funcionales del producto(Llorente, n.d.)



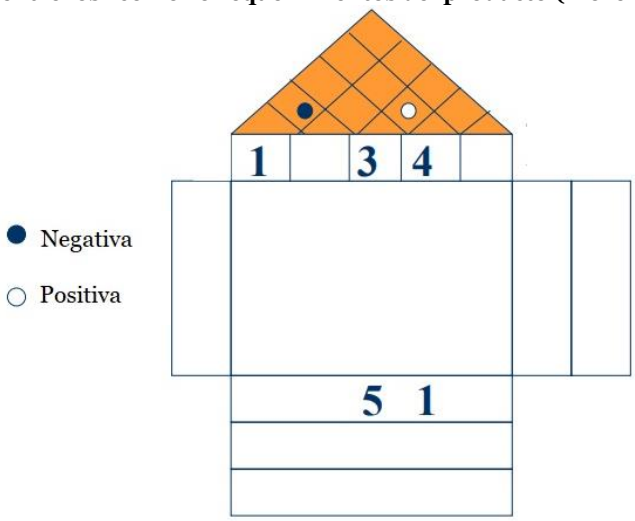
Luego de haber organizado los requiremientos del cliente y las soluciones que ofrece el producto, en la Figura 21, se muestra la simbología de calificación donde se relacionarán los dos tipos de requerimientos. Con un punto relleno indica que existe una relación alta (●), el círculo con el interior sin rellenar indica que existe una relación media (○) y el tríangulo (Δ o ∇) sin rellenar especifica que no existe ninún tipo de relación. A partir de esta clasifiación es posible medir las caracteristicas propias de cada opción planteadas en este proyecto y si su solución es coherente o no responde a los requerimientos del cliente.

Figura 21. Relación entre los requerimientos del cliente y los requerimientos del producto (Llorente, n.d.)



Adicionalmente, esta matriz permite relacionar cada solución del producto entre sí, es decir; de que manera puede incidir una característica sobre otra ya sea de manera positiva o negativa. Esto permite realizar una retraolimentación y mejoramiento constante, punto base para futuras etapas de diseño. Un punto coloreado en su interior o un signo menos (-) indica que existe una correlación negativa, mientras que un círculo vacio en su interior o un signo más (+) establece una correlación positiva. Por ejemplo, en la Figura 22 la característica número 3 y 4 indican que existe una correlación en donde ambas soluciones se complementan entre sí, es decir; es positiva.

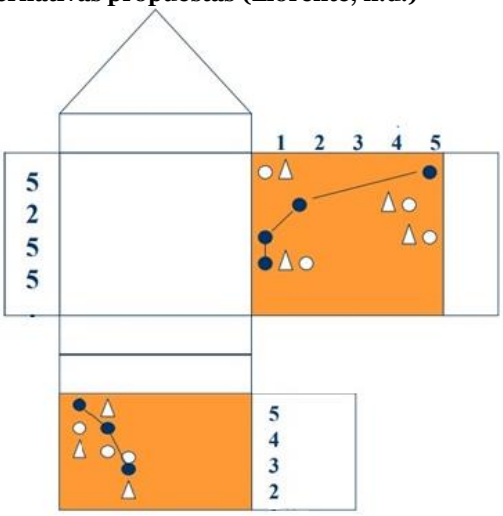
Figura 22. Correlación entre los "como" o requerimientos del producto (Llorente, n.d.)



Después de haber realizado la correlación de soluciones, en la parte derecha como se muestra en la Figura 23, se realiza la comparación de los diferentes alternativas expuestas donde se puede seguir cada opción con una línea a medida que se califica punto por punto. Generalmente se realiza la comparación entre productos u opciones de diferentes empresas que cumplar funcionalidades similares. Para este caso se realiza un comparación de diferentes alternativas de diseño preliminar propuestas y explicadas a lo largo de este documento. Por esta razón, se buscaron opciones que se acercaran lo máximo posible a la máxima calificación (para este caso la calificación es de 1-5, siendo esta última la mayor) en cada uno de los requerimientos. Por último, en la sección inferior mostrada

en la Figura 23 se realizó una calificación y revisión técnica de la solución dada a cada parámetro en particular. Esto sirve para la reevaluación del proveedor y punto de partida para mejoramiento de cada opción. Como consecuencia se realiza un cambio si es relevante de algún componente propio de cada opción en función de los requerimientos de producto, es decir; cada opción es una alternativa diferente que responde a la misma pregunta o a los mismos subproblemas, y como tal tiene sus ventajas y desventajas. Para la evaluación de cada opción se tuvo en cuenta el punto de vista de cada diseñador, así como la recomendación de docentes y diferentes puntos de vista de literaturas investigadas. Algunas opciones o alternativas planteadas cuentan con énfasis en algunos puntos más que otros y fue el criterio objetivo de evaluación por parte de cada participante.

Figura 23. Comparación de las alternativas propuestas (Llorente, n.d.)



Referente a los resultados de la calificación dada para cada opción donde los promedios se muestran en la Tabla 23. Como punto de partida, durante la calificación se evidencia que la opción 1 es la alternativa de menor puntuación, debido al sistema de medición de presión empleado; se seleccionó el instrumento conocido como "Tubos de Torricelli", el cual es un mecanismo muy antiguo inventado desde 1643 con muy pocas actualizaciones (Viñas, 2019); lo cual puede verse perjudicado con la adaptación con otros sistemas del banco. Como la medición de presión no se realiza con el instrumento que brinda menor rango de operación se verán afectados la medición de otros parámetros como los son: la potencia, el consumo de combustible y la velocidad de los gases. De igual manera, se tuvo en cuenta la calificación en vida útil de 1, debido a la implementación de galgas extensiométricas, las cuales son de única utilización y en comparación con las celdas de cargas, estás últimas pueden tener una vida útil de 10 años (Hope Technologic (Xiamen) Co., Ltd., 2021).

Tabla 23. Promedio de cada opción

Opción 1	**2,67**
Opción 2	**3,33**
Opción 3	**3,46**

Opción 4	**3,58**
Opción 5	**4,09**

Para la opción 2 los parámetros de menor calificación son la ergonomía y la estética, y la razón principal es por los materiales seleccionados para esta alternativa. Como se ha mencionado anteriormente, las superaleaciones son un tipo de materiales que ofrecen buenas propiedades, pero los métodos de fabricación son complejos, y por la misma razón; la calificación dada para la calidad se ve afectada, debido a que se le puede dar formas o moldes al material que pueden reducir la efectividad de sus propiedades. Continuando con la opción 3, su elemento de más falencia es el dinamómetro, porque su precisión es la más baja de todas las opciones. Adicionalmente, este elemento puede llegar a tener dificultad con la adaptación del sistema de enfriamiento. Cabe recordar que sus principales problemas se relacionan al sobre calentamiento y para su respectiva inspección debe ser desmontado en su totalidad.

Para la opción 4 el parámetro de menor calificación es el elemento encargado de la medición de temperatura para los gases de escape. En esta alternativa se emplea un termistor en donde la principal desventaja es su rango de operación, el cual se ve limitado hasta como máximo 450°C, siendo el de menor alcance en comparación con las otras opciones; los pirómetros pueden medir hasta 4000°C, los termopar hasta 2800°C (dependiendo del material de construcción) y el termómetro infrarrojo puede alcanzar como máximo 1000°C (Bausà et al., 2021). En general las necesidades propuestas por los cuatro docentes de la facultad de ingeniería de la Fundación Universitaria Los Libertadores y un docente de la escuela de ingenieros en su representación como cliente como mínimo en tres opciones todos los conceptos cumplen con las necesidades requeridas, pero la opción 5 tiene un equilibrio en sus componentes.

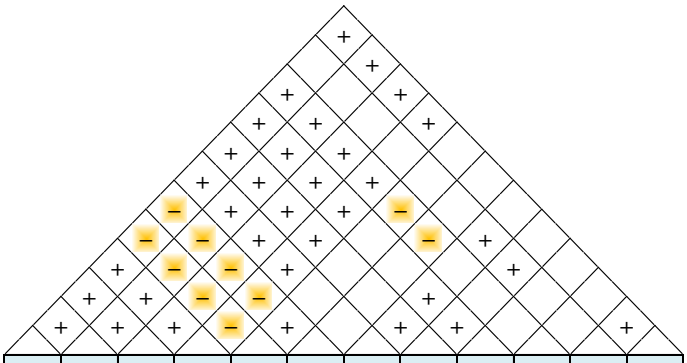
A continuación, en la Tabla 24 se muestran los requerimientos del cliente que se encuentra en la parte izquierda y superior respectivamente de la matriz de la casa calidad de la Figura 24**.** La columna izquierda hace referencia a los requerimientos de cliente y la columna derecha muestra los requerimientos funcionales del banco. En la parte superior de la matriz de la casa de la calidad en forma de techo, se evidencia la correlación que existente entre sí de cada una de las funcionalidades propuestas en este proyecto. Cabe aclarar que la matriz mostrada en la Figura 24 es el resultado del proyecto, donde no se tienen en cuenta las especificaciones detalladas de cada uno de los elementos propuestos, sino que se plantea como una guía de desarrollo de fase de diseño preliminar. Cada una de las calificaciones fue realizada con base a la investigación realizada teniendo en cuenta las principales ventajas y desventajas de cada uno.

Tabla 24. Requerimientos de la casa de la calidad

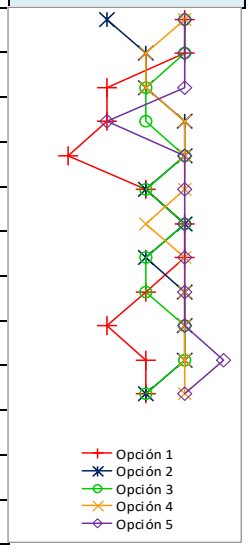
	Requerimientos del cliente	**Requerimientos funcionales**
1	Ergonomía	¿De qué manera se puede determinar la fuerza y empuje el cohete?
2	Estética	¿Cuáles elementos son necesarios para medir la temperatura?
3	Calidad	¿Cómo se puede medir la diferencia de presiones del cohete?
4	Mantenimiento	Medición de velocidad de los gases en la tobera de escape
5	Vida útil	Materiales dependiendo su condición y composición
6	Empuje Total	Maleabilidad dependiendo del material
7	Temperatura de los gases de escape	Fácil operación y ergonomía del banco de pruebas
8	Velocidad de los gases de escape	Procedimiento de utilización del banco de pruebas
9	Presión en la cámara de combustión	Número de conceptos que se pueda determinar en el banco de pruebas

10	Presión en la tobera	¿Cuál es la carga máxima que soportará el banco de pruebas?
11	Potencia del motor	¿Cuáles elementos debe emplear el operario para la utilización de ensayos en el banco de pruebas?
12	Consumo de combustible	¿Cuáles sistemas de emergencia serán previstos?

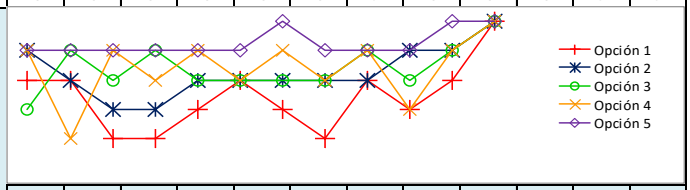
Figura 24 . Resultado de la matriz "casa de la calidad"



	Peso relativo	Requerimientos Funcionales / Requerimientos del cliente	1 ¿De qué manera se puede determinar la fuerza y empuje el cohete?	2 ¿Cuáles elementos son necesarios para la medición de la temperatura?	3 ¿Cómo se puede medir la diferencia de presiones del cohete?	4 Medición de velocidad de los gases en la tobera de escape	5 Materiales dependiendo su condición y composición	6 Maleabilidad dependiendo del material	7 Fácil operación y ergonomía del banco de pruebas	8 Procedimiento de utilización del banco de pruebas	9 Número de conceptos que se pueda determinar en el banco de pruebas	10 ¿Cuál es la carga máxima que soportará el banco de pruebas?	11 ¿Cuáles elementos debe emplear el operario para la utilización de ensayos en el banco de pruebas?	12 ¿Cuáles sistemas de emergencia serán previstos?	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5
1	3,5	Ergonomía	○	▽	▽	○	●	●	●	●	▽	○	●	●	4	2	4	4	4
2	4	Estética	▽	▽	▽	○	●	●	●	●	▽	○	▽	▽	4	3	4	3	4
3	5	Calidad	●	●	●	●	●	●	○	▽	▽	●	○	●	2	3	3	3	4
4	4	Mantenimiento	●	●	●	●	●	●	●	○	▽	●	▽	●	2	4	3	4	2
5	3	Vida útil	●	●	●	●	●	●	●	○	▽	●	○	●	1	4	4	4	4
6	5	Empuje Total	●	▽	▽	▽	○	▽	●	●	●	●	▽	○	3	3	3	4	4
7	4	Temperatura de los gases de escape	▽	●	▽	▽	●	●	▽	●	●	○	○	○	4	4	4	3	4
8	5	Velocidad de los gases de escape	▽	▽	▽	●	○	▽	▽	●	●	▽	▽	○	4	3	3	4	4
9	4,5	Presión en la cámara de combustión	▽	▽	●	▽	○	▽	▽	●	●	▽	▽	○	3	4	3	4	4
10	4	Presión en la tobera	▽	▽	●	▽	○	▽	▽	●	●	▽	○	○	2	4	4	4	4
11	3,5	Potencia del motor	●	●	●	●	○	▽	○	●	●	●	○	○	3	4	4	4	5
12	3,5	Consumo de combustible	●	●	●	●	▽	▽	○	●	●	○	○	●	3	3	3	4	4



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Peso relativo	5	5	5	5	3	3	4	5	5	5	4	5
Opción 1	3	3	1	1	2	3	2	1	3	2	3	5
Opción 2	4	3	2	2	3	3	3	3	3	4	4	5
Opción 3	2	4	3	4	3	3	3	3	4	3	4	5
Opción 4	4	1	4	3	4	3	4	3	4	2	4	5
Opción 5	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	5	5



Column # 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Capítulo 5

5.1 Conclusiones

- Se evidenció que durante la elaboración de un producto tecnológico es importante conocer la necesidad a solucionar y el cliente de interés, de nada sirve llevar a cabo un proceso de diseño en donde no haya un sector al cual ofrecer.

- Se creó una metodología aplicable al diseño de cualquier banco de pruebas para motores cohete de combustible líquido, pero al momento de su aplicación fue necesario establecer una limitante que para este caso fue de 10kN de empuje según la línea base desarrollada.

- Para la clasificación y selección de componentes, se deben tener en cuenta metodologías como las de Rodríguez y de Ashby respectivamente, que permitan encontrar el mejor rendimiento y calidad del producto a diseñar.

- Se encontraron distintas metodologías de diseño con enfoques puntuales, lo cual fue la base para realizar una comparación y adaptar una propia, que tuviera validez a un banco de pruebas de hasta 10kN de empuje.

- Al final la metodología adaptada permitió seleccionar los requerimientos iniciales, luego estos fueron clasificados y posteriormente dieron la pauta a la selección de los elementos que conforman el banco de pruebas de manera jerárquica, y finalmente ofrecer la posibilidad de comparar distintas alternativas planteadas.

- La casa de la calidad fue el método que más ajustó para darle un valor cuantitativo a cada necesidad del cliente, permitiendo así establecer la mejor opción de cada parámetro y a su vez proporcionó las bases para la comparación de las 5 propuestas de diseños, con el fin de brindar la mejor alternativa.

5.2 Recomendaciones

- La metodología de Ashby busca optimizar el índice de rendimiento en el proceso de diseño desde el punto de vista de la selección más adecuada para el material, según las restricciones dadas por la función que va a ejercer el componente y por la configuración geométrica del mismo. Se recomienda profundizar más sobre las características mecánicas de cada componente realizando un análisis estático y de esta manera tener un respaldo fisicomatemático.

- Houseman orienta su profundización en el impacto económico que puede llegar a tener la toma de decisiones de los diseñadores en la fase preliminar. Por esta razón, se recomienda la implementación de un estudio de costos para tener cifras reales del mercado actual y de esta manera, verificar la viabilidad del proyecto, así como el mantenimiento operacional de cada componente a largo plazo y permitir la continuidad a futuras etapas.

- Luego de seleccionar la opción de diseño que más se adapta a las necesidades del cliente que en este caso fue la opción 5, se recomienda la comparación con otros bancos de pruebas diferentes a los

propuestos en este proyecto, para mejorar la retroalimentación realizada durante el proceso de diseño, y para ello se sugiere aplicar nuevamente la casa de la calidad.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Referencias

Acosta, I. R. (2001). *Tubos Venturi, dall y tobera.* México D.F.: Comisión Nacional del Agua.

Allen, M. S. (1959). *Morphological creativity: the miracle of your hidden brain power.* Madison: Prentice-Hal.

Altshuller, G. (1988). *Creativity as an exact science.* New York: Gordon and Breach Science.

Altshuller, G. (1994). *And suddenly the inventor appeared.* Technical Innovation books: Worcester.

Álvarez Rojas, N., Huérfano Romero, J., & Ojeda Ramírez, O. (2015). *Diseño de un banco de pruebas estático para prueba y caracterización de motores cohete. 1.*

Amarilla, G. (2021). *Sistemas de adquisición para bancos de potencia de motores, rolos, dinamómetros hidráulicos, eléctricos e inerciales.* Obtenido de Sistemas de adquisición para bancos de potencia de motores, rolos, dinamómetros hidráulicos, eléctricos e inerciales: https://www.accudyno.com/ventajas-y-desventajas-de-cada-tipo-de-dinamometro/

American Space and Propulsion - SORAC . (s.f.). Obtenido de Aercon Systems: https://aeroconsystems.com/cart/test-stand-pictorial

Aremas Andrade, D. (2019). *Diseño y análisis estructural preliminar de un banco de pruebas para cohetería experimental.* Αγαη.

Ashby, M. (1992). *Materials Selection in mechanical design.* Elsevier.

Ashby, M. F. (1999). *Materials Selection in Mechanical Design.* Oxford: Butterworth-Heinemann.

Bausà, J., Gómez, C., Zaragozí, B., Martínez, A., Campos, D., & Llinares, A. (2021). *Sensores de Temperatura Medida de Temperatura.* Obtenido de Sensores de Temperatura: https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/14089/mod_resource/content/0/SensoresTemperatura.pdf

BBC. (11 de diciembre de 2016). Pedro Paulet, el peruano que se convirtió en el padre de la astronáutica inspirado por un libro de Julio Verne. Obtenido de https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-38197437

Betady, E., Ortiz, L., Younes, B., Villanueva, K., Barnum, J., Rozario, N., . . . Johal, J. (2018). *Development of a mobile rocket engine test stand (Mrets).* Obtenido de 2018 Joint Propulsion Conference: https://doi.org/10.2514/6.2018-4600

Bolívar, E. P. (s.f.). *Coeficiente de película.* Durango: Instituto Tecnológico de Durango.

Bouziane, M., Bertoldi, A., Milova, P., Hendrick, P., & Lefebvre, M. (Junio de 2018). *Development and testing of a lab-scale test-bench for hybrid rocket motors.* Obtenido de 15th International Conference on Space Operations: https://doi.org/10.2514/6.2018-2722

Briceño, G. (19 de julio de 2019). *euston96.* Obtenido de euston96: https://www.euston96.com/vacuometro/

Calle, C. R. (02 de 2009). Motor cohete de combustible líquido. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

Cárdenas Fernández, J. (2015). *Lecturas para ingeniería No. 23.* Cuautitlán Izcalli: Universidad Nacional Autónoma de México.

Cárdenas, G. O. (2009). Fabricación de un banco de pruebas para motores cohete líquidos de hasta 10 toneladas de empuje. Bellavista Callao, Perú: Universidad Nacional del Callao.

Casado, J. (2009). *Wernher von Braun entre el aguila y la esvastica.*

Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and Mass Transfer.* New York: Mc Graw Hill Edutacion.

Chaur Bernal, J. (2004). *Diseño conceptual de productos asistido por ordenador: Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa.* Barcelona: Universidad politécnica de Cataluña.

Danish Space Challenge. (s.f.). Obtenido de Aerocon Systems: https://aeroconsystems.com/cart/test-stand-pictorial

Diehl, M., & Stroebe, W. (1991). *Productivity Loss in Idea-Generating Groups: Tracking Down the Blocking Effect*. Obtenido de Journal of Personality and Social Psychology: https://doi.org/10.1037/0022-3514.61.3.392

Downey, K., Parkinson, A., & Chase, K. (2003). *An introduction to smart assemblies for robust design*. Obtenido de Research in Engineering Design: ttps://doi.org/10.1007/s00163-003-0041-5

Erdman, A., & Sandor, G. (1998). *Diseño de mecanismo.* Mexico: Pearson Educación.

Espacio. (2021). La Nasa y la FAA apoyarán el crecimiento de las capacidades aeroespaciales comerciales. *Actualidad aeroespacial*.

Fiaschetti, J. (s.f.). *Citadel - Rocket Engine Test Stand*. Obtenido de Citadel - Rocket Engine Test Stand: https://justincfiaschetti.weebly.com/rocket-engine-test-stand---citadel.html

Franco Caballero, L. M., & Leal Iga, J. (2018). *Método de inventiva para solucionar problemas: aplicación bimetal.* San Nicolás de los Garza: Ciencia UANL.

Gasque, L. (2019). *Platino, el más noble de los metales.* México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Gill, V. (10 de 12 de 2018). *La sonda espacial Voyager 2 de la NASA se convierte en el segundo objeto hecho por el hombre que viaja más allá del Sistema Solar.* Obtenido de La sonda espacial Voyager 2 de la NASA se convierte en el segundo objeto hecho por el hombre que viaja más allá del Sistema Solar: https://www.bbc.com/mundo/noticias-46515634

Grima, P. (Octubre de 2018). *Aportaciones metodológicas al diseño de productos robustos*.

Gutierrez, J. (2018). *La esencia del método de resistencia interna.*

Hatchuel , A., Weil, B., & Le Masson, P. (2017). C-K Theory: Modelling Creative Thinking and Its Impact on Research. *ResearchGate*.

HBM an HBK Company. (s.f.). *HBM*. Obtenido de HBM: https://www.hbm.com/es/6810/guia-de-seleccion-de-sensores-piezoelectricos/

Henrich Saavedra, M., & Rojas Lazo, O. (2013). *Aplicaciones de la metodología TRIZ en el diseño ergonómico de estaciones de trabajo.* Lims: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Hope Technologic (Xiamen) Co., Ltd. (2021). *La Vida Útil Y El Código De Cableado De La Celda De Carga.* Obtenido de La Vida Útil Y El Código De Cableado De La Celda De Carga: https://es.mavin.cn/blog/la-vida-til-y-el-c-digo-de-cableado-de-la-celda-de-carga_b6#:~:text=Generalmente%20el%20la%20celda%20de,capacidad%20nominal%20durante%20mucho%20tiempo

Horizontal/Vertical Test Stand to 1500 LB-f Thrust. (2021). Obtenido de Aerocon Systems: https://aeroconsystems.com/cart/motor-test-stands/horizontal/vertical-test-stand-to-1500-lb-f-thrust/

Houseman, O., Coley, F., & Roy, R. (2008). *Comparing the cognitive actions of design engineers and cost estimators*. Obtenido de Journal of Engineering Design: https://doi.org/10.1080/09544820701802964

ITEA. (2013). *El acero en la construcción*. Obtenido de Construction and Building Materials: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.02.006%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1016/j.conbuild

mat.2008.01.008%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.05.019%5Cn%3CGo to ISI%3E://000261764300012

Jalloul, C. (12 de 01 de 2015). *Elementos primarios de caudal – Placas de orificio.* Obtenido de Elementos primarios de caudal – Placas de orificio: https://www.bloginstrumentacion.com/productos/caudal/elementos-primarios-de-caudal-placas-de-orifio/

Jervis, T. M. (27 de 08 de 2020). *Lifeder* . Obtenido de https://www.lifeder.com/investigacion-descriptiva/

Jiménez, E. (22 de 10 de 2020). *Introducción a la cohetería - Propulsión Líquida.* Obtenido de TECSpace CR: https://www.youtube.com/watch?v=eGZcyg6-wbY

Kazakçi, A., & Tsoukias, A. (2005). *Extending the C-K design theory: A theoretical background for personal design assistants*. Obtenido de Journal of Engineering Design: https://doi.org/10.1080/09544820500131300

Krishnaiah, K., & Shahabudeen, P. (2012). *Applied Design of experiments and Taguchi Methods* . New Delhi: PHI learning private limited .

Llorente, L. (s.f.). *Despliegue de la Función Calidad Historia y Antecedentes*. Obtenido de http://www.gestion-calidad.com/archivos web/QFD.pdf

Lopéz Beltrán, R., & Torres Salcedo, J. (2011). *etodología mixta de selección de materiales aplicada en la escogencia del material para un dedo de pinza de sujeción de un manipulador industrial.* Revista Científica Ingeniería y Desarrollo.

Martiarena, J., Bernardi, A., Di Scala, C., & Heidenreich, E. (2010). *Diseño de bancos de ensayo para pulsoreactores y motores cohetes de pequeño empuje destinados a uav.*

Martinez Guerra, M., Quispe Congora, C., & Santos Cuellar, R. (2018). *Filosofo De La Calidad.*

Martinez Muñiz, E. M., Gonzalez Morales, A., & Ayvar Suarez, T. I. (2017). Walter Shewhart Shigeru Mizuno. Guadalupe, Nuevo León, México.

Martínez, P., & Azuaga, M. (1997). *Medición del módulo de elasticidad de Young.* Buenos Aires: Laboratorio IV - Dpto. de Física.

MetAs & Metrólogos Asociados . (2007). *El Manómetro Bourdon.* Jalisco: MetAs & Metrólogos Asociados .

Mickels, C., Wright, C., Soderquist, N., Prokofieva, A., Panahandehgar, S., Uddanti, N., & Rajan, A. (2019). *Project atlas: A mobile universal rocket engine test stand.* Obtenido de AIAA Scitech 2019 Forum: https://doi.org/10.2514/6.2019-1938

Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. (1994). *Decreto 1295 de 1944.* Bogotá D.C.

Moreno Roig, J. (2012). *Diseño y construccion de un banco de pruebas de motores de cohete amateurs.* Obtenido de http://upcommons.upc.edu//handle/2099.1/15292

NASA . (2021). *Liquid rocket engine.* Houston: Tom Benson .

Nazarov, V., Zuev, A., Zhuikov, D., & Tolstopyatov, M. (2021). *esearch and optimization of the hydraulic performance of bench lines for testing of low thrust spacecraft engines.* Obtenido de IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: https://doi.org/10.1088/1757-899x/1155/1/012013

Neff, T., Rehberger, M., & Meroth, A. (2016). *Thrust test bench for student rocket engines.* Obtenido de 2016 11th France-Japan and 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics, MECATRONICS 2016 / 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics: https://doi.org/10.1109/MECATRONICS.2016.7547130

Nigel Cross. (2002). *Métodos de diseño, estrategias para el diseño de productos.* JoHN WILEY.

Omega Engineering (a). (2021). *¿Qué es una célula de carga y cómo funciona?* Obtenido de ¿Qué es una célula de carga y cómo funciona?: https://es.omega.com/prodinfo/celulas-de-carga.html

Omega Engineering (b). (19 de 07 de 2021). *Galgas extensiométricas ¿Qué son las galgas extensiométricas?* Obtenido de Galgas extensiométricas ¿Qué son las galgas extensiométricas?: https://es.omega.com/prodinfo/galgas-extensiometricas.html

Omega Engineering (c). (19 de 07 de 2021). *Introducción a los anemómetros.* Obtenido de Introducción a los anemómetros: https://mx.omega.com/prodinfo/anemometros.html

Osborn, A. F. (1953). *Applied imagination; principles and procedures of creative thinking* . New York: New York Charles Scribners Sons.

Palacios Montero, N. D., & Torres Villalba, W. (2019). *Fabricación de un dinamómetro para medir fuerzas cortantes en torno.* Bogotá D. C: Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica.

Pastor, A. P. (2013). *Programa educativo "Rutas biotecnológicas".* Cartagena: Escuela Técnica de Ingeniería Agronómica. UPCT.

Paz, R., & Gómez, D. (2013). *Diseño y Selección de Procesos. Faculad de Ciecnias Económicas y Sociales.* Obtenido de 7(Procesos): http://nulan.mdp.edu.ar/1613/1/08_diseno_procesos.pdf

PCE Instruments Chile SA. (2008). *Manómetro.* Santiago de Chile: PCE Instruments Chile SA.

Publicaciones Semana S.A. (2021). América Latina aún tiene camino por recorrer en su conquista por el espacio exterior. *Semana*.

Pugh, S. (1996). *Creating innovative products using total Design.* Glasgow: Prentice Hall.

Ramírez Suarez, D., & Serrato Ortiz, J. S. (2018). Ensamble, puesta a punto y lanzamiento del cohete multietapa Ainkaa Alpha de alcance estratosférico. Bogotá, Colombia: Universidad de San Buenaventura.

Raymer, D. (1989). *Aircraft Design: A Conceptual Approach.* Obtenido de Sixth Edition: https://doi.org/10.2514/4.104909

Reyes, D. A., & Millán, D. (06 de 2015). Proceso de calibración de banco de pruebas de motores cohete. Bogotá, Colombia.

RIT Launch Initiative Hybrid Rocket. (s.f.). Obtenido de RIT Multidisciplinary Engineering: http://edge.rit.edu/edge/P18102/public/Testing/Test%20Stand/Test%20Stand

Rodriguez, G. (1985). *Manual de Diseño Industrial.* México: Ediciones G. Gili, S.A. de C.V.

Salazar, R., Hermann, J., Suta, J., Diaz, J., Riano, S., Delgado, F., & Ruge, A. (s.f.). *Design, construction and experimental static testing of a solid rocket motor.* Obtenido de Revista UIS Ingenierías: https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021009

Salvatierra, Á. (2017). *Pedro paulet, sabio multidisciplinario.*

Salzar Ceballos, O. D., & Solorzano Gomez, A. M. (2016). Diseño conceptual, preliminar y detallado del cohete sonda recuperable “Aristarco I” propulsado por propelente sólido. Bogotá, Colombia: Fundación Universitaria Los Libertadores.

Sánchez, R. (30 de septiembre de 2020). *La historia de los cohetes espaciales.* Obtenido de https://www.muyinteresante.es/ciencia/articulo/la-historia-de-los-cohetes-espaciales-571601492456

Santos, E., Alves, W., Prado, A., & Martins, C. (s.f.). *Development of test stand for experimental investigation of chemical and physical phenomena in liquid rocket engine.* Obtenido de Journal of Aerospace Technology and Management: https://doi.org/10.5028/jatm.2011.03021111

Schmierer, C., Kobald, M., Fischer, U., Tomilin, K., Petrarolo, A., & Hertel, F. (2019). *Advancing Europe’s Hybrid Rocket Engine Technology with Paraffin and LOX.* Obtenido de 8th

European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences (EUCASS): https://doi.org/10.13009/EUCASS2019-682

Shigeru Mizuno, W. S. (1931). *Economic control of quality of manufactured product.* London.

SIG Consulting . (06 de 2018). *Metodologia de las 5 S's.* Obtenido de https://www.lima-airport.com/esp/SiteAssets/Lists/Noticias/AllItems/Las%205S%20como%20herramienta%20de%20mejora%20continua.pdf

SPL Products & Services. (2021). Obtenido de 10 kN regenerative cooled engine SLR10k-I: http://www.spl.ch/old/products/index.html

Stupenengo, F. (2011). *Materiales y materias primas.* Buenos Aires: Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Suh, N. P. (1990). *Principles of Design.* New York: Oxford University Press.

Sutton, G. (2001). *Rocket Propulsion Elements.* Cánada: John Wiley & Sons, INC.

Todo eléctrico. (2021). *Mecanismos eléctricos*. Obtenido de Mecanismos eléctricos: https://www.todoelectrico.es/interruptores-enchufes.html

Ullman, D. (2013). *The Mechanical Design Process.* New York: McGraw-Hill.

Universidad de San Martín de Porres. (27 de 09 de 2015). *Modulo H1 identificación del problema y alternativas de solución.* Obtenido de Modulo H1 identificación del problema y alternativas de solución: https://www.youtube.com/watch?v=960Lv63_p2g

Viñas, J. M. (09 de 04 de 2019). *Meteo Red*. Obtenido de El Experimento de Torricelli : https://www.tiempo.com/ram/el-experimento-de-torricelli.html

Wallingford , R., Phillips , G. A., Bowser , B., & Dalton, J. (2021). *Liquid Rocket Engine and Test System.* Obtenido de The University of Akron : https://ideaexchange.uakron.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2715&context=honors_research_projects

Watlow Powered by Possibility. (19 de julio de 2021). Obtenido de Watlow Powered by Possibility: https://es.watlow.com/Home

Yepes Piqueras, V. (28 de 03 de 2014). *QFD: Despliegue de la función de calidad | 28/86 | UPV.* Obtenido de QFD: Despliegue de la función de calidad | 28/86 | UPV: https://www.youtube.com/watch?v=b3ibdXdRQnk)

Yupanqui, C., & Mejía, Á. (2016). *Los proyectos extraordinarios de Pedro Paulet.* Colegio de Ingenieros Del Perú. Obtenido de Colegio de Ingenieros Del Perú.

Anexos

Anexo A. Promedio de empuje

$$Promedio = \frac{(6679 + 6672 + 8896 + 10000 + 8896 + 14000 + 22241 + 6672)N}{8}$$

$$Promedio = 10507N$$

$$Promedio = 10{,}5\ kN$$

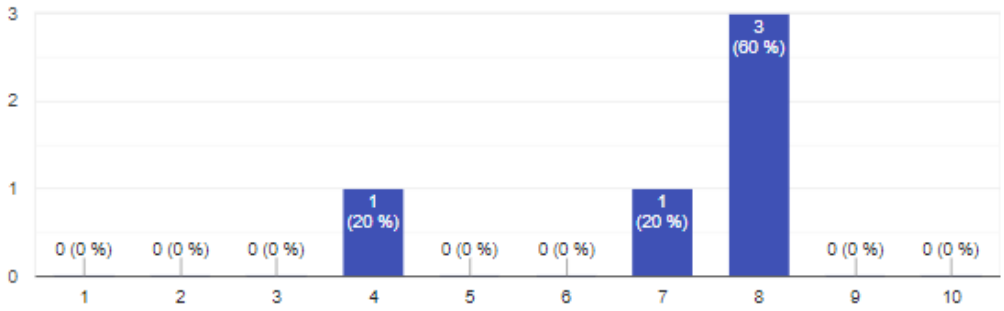
Anexo B. Encuesta

Importancia de los Características de Diseño.

Instrucciones: seleccione una puntuación entre 1 al 10, donde 1 corresponde al nivel de importancia más bajo y 10 al nivel de importancia más alto.

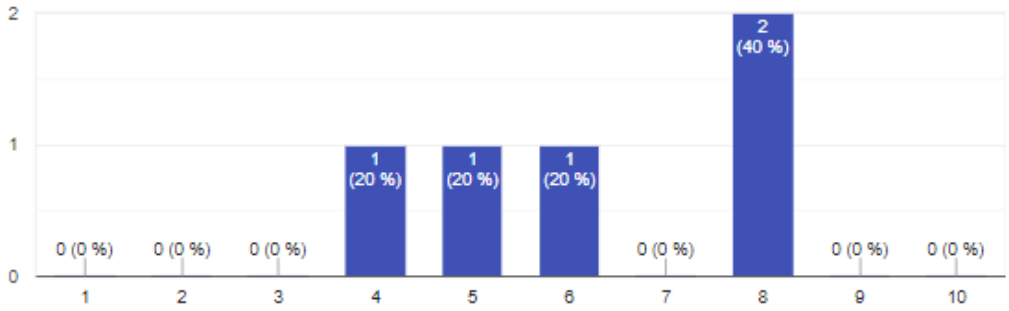
1. Ergonomía

5 respuestas



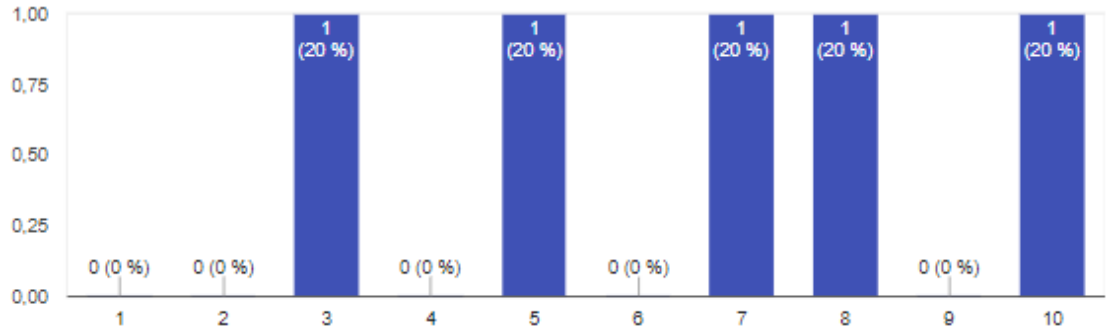
2. Economía

5 respuestas



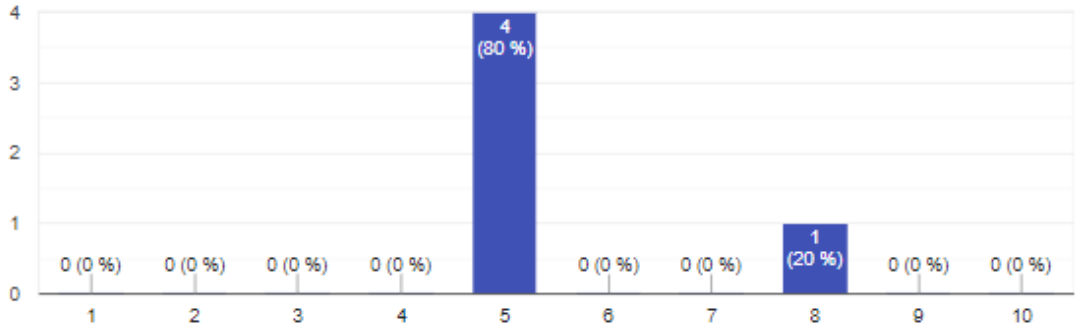
3. Tamaño (dimensiones) y forma estructural

5 respuestas



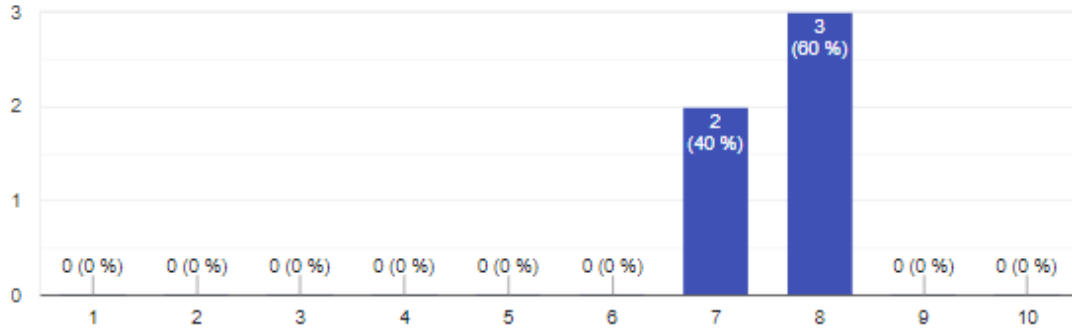
4. Portabilidad

5 respuestas



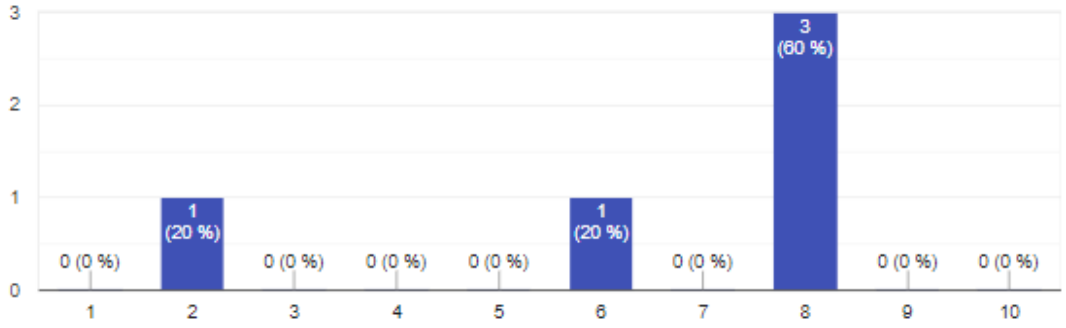
5. Estética

5 respuestas



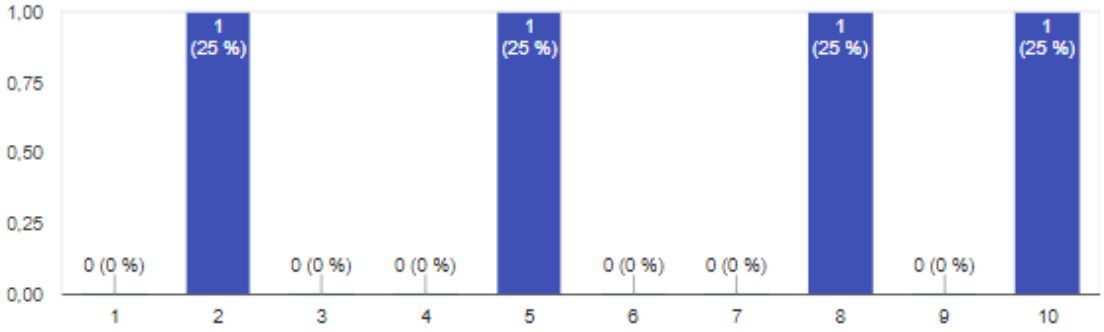
6. Complejidad de construcción

5 respuestas



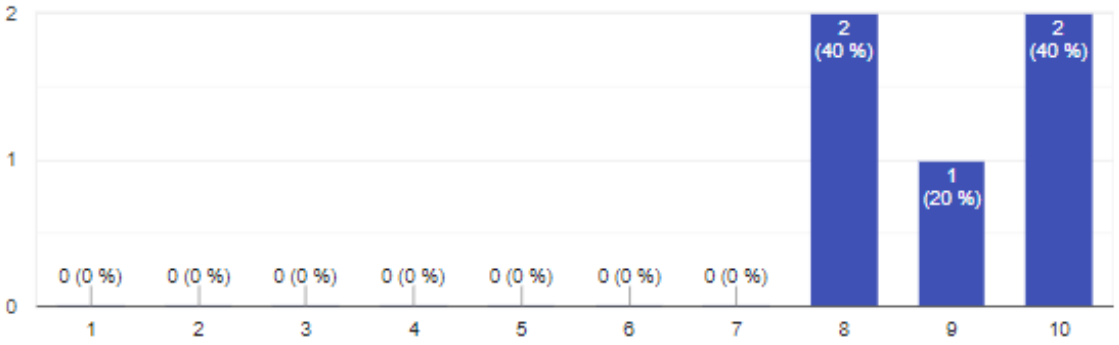
7. Materiales

4 respuestas



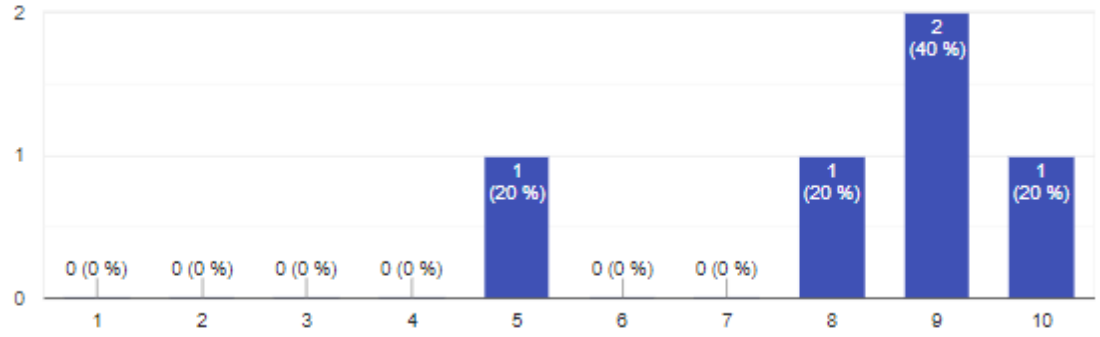
8. Calidad

5 respuestas



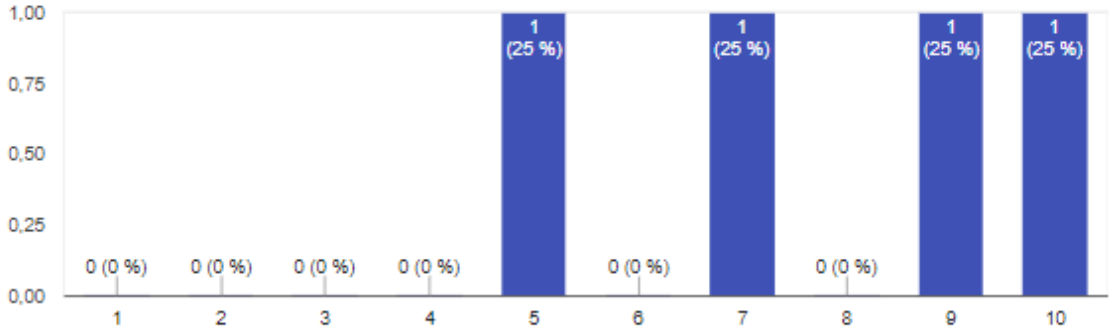
9. Mantenimiento

5 respuestas



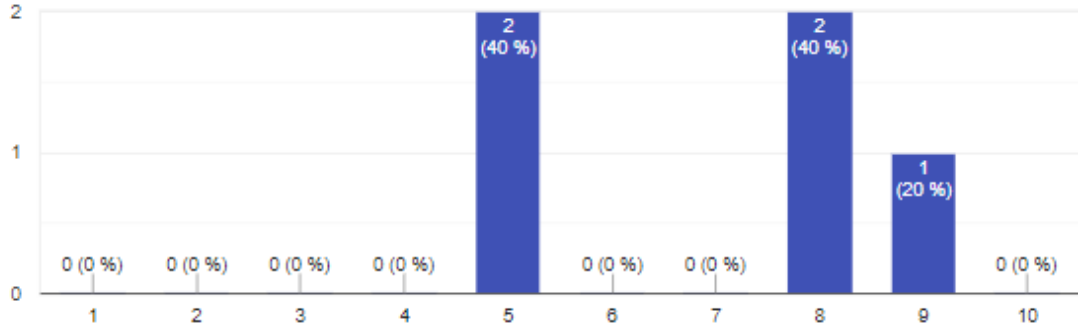
10. Vida útil

4 respuestas



11. Impacto ambiental

5 respuestas



12 . Si considera alguna otra característica importante por favor escribir cuál y/o cuales y su nivel de importancia:

3 respuestas

Considero que las preguntas deben formularse en la encuesta de mejor manera, muchas quedan ambigüas. Por ejemplo, aunque dice que el motor cohete es de 10kN no todo el mundo va a tener magnitud en mente para lograr definir costos tamaño, materiales, etc.

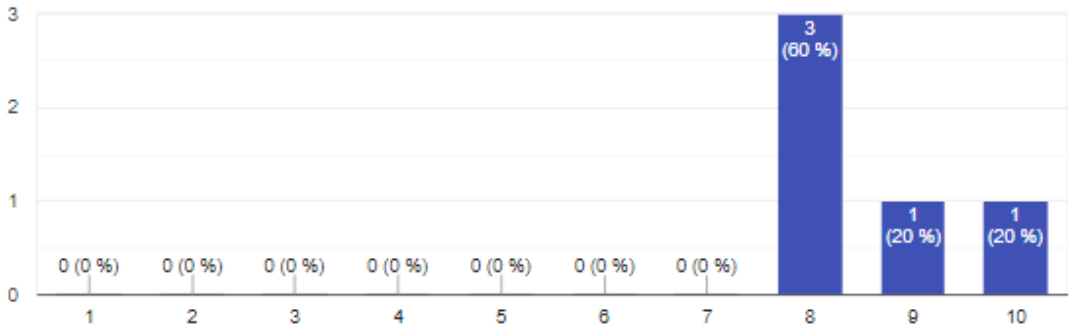
Por otro lado cuando se ponen cosas como complejidad en la construcción que selecciona uno? Otra cosa es preguntar alta o baja complejidad en la construcción. Lo mismo con la 9, la 10 y la 11. No queda claro

Considerar el marco legal

Actualización tecnológica - 7

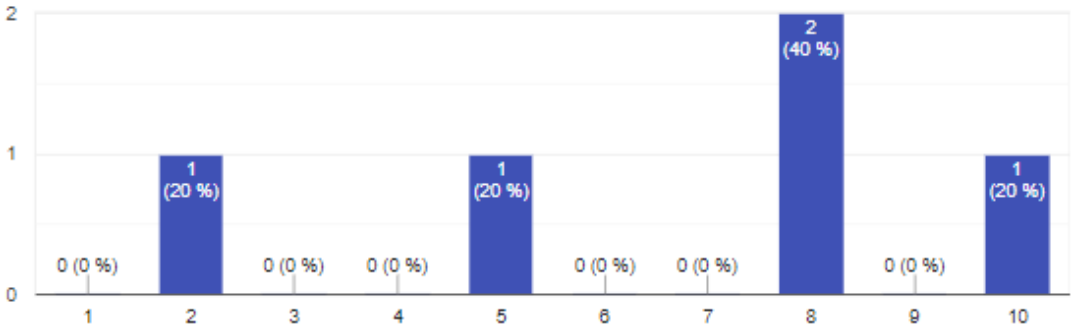
13. Empuje total

5 respuestas



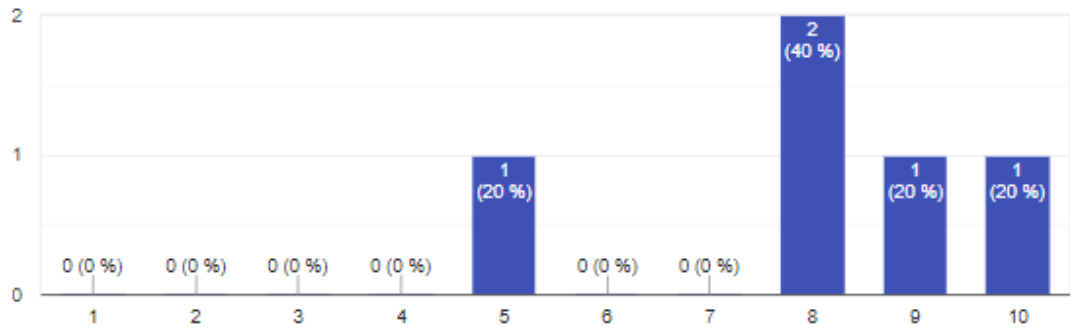
14. Peso

5 respuestas



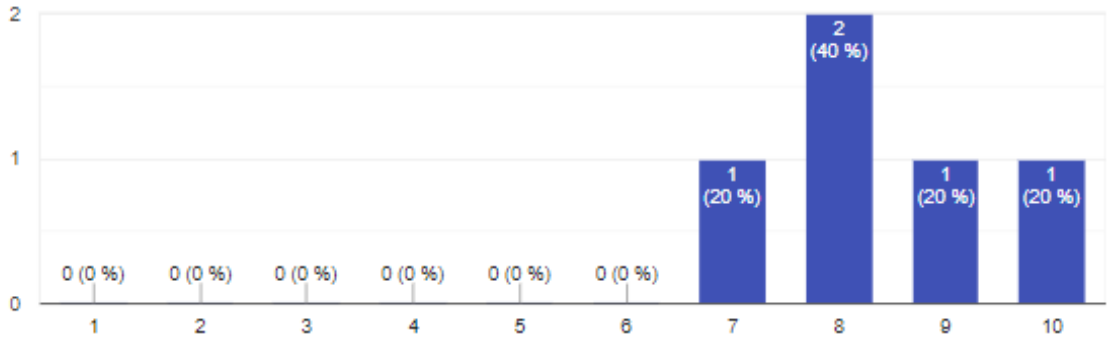
15. Temperatura de los gases de escape

5 respuestas



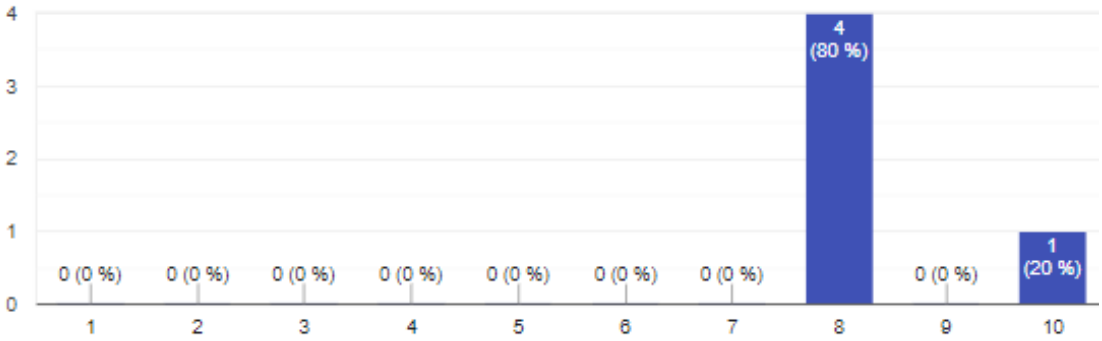
16. Velocidad de los gases de escape

5 respuestas



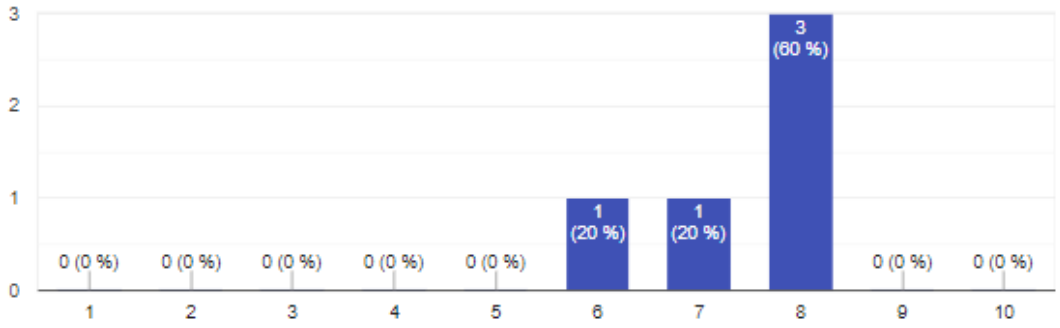
17. Presión en la cámara de combustión

5 respuestas



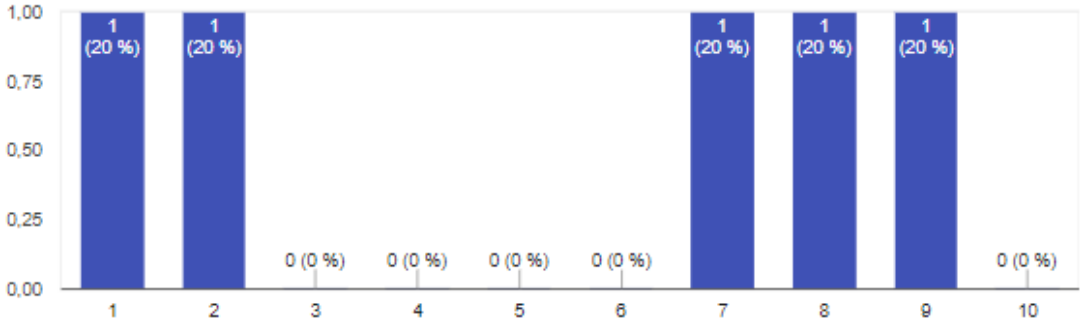
18. Presión en la tobera

5 respuestas



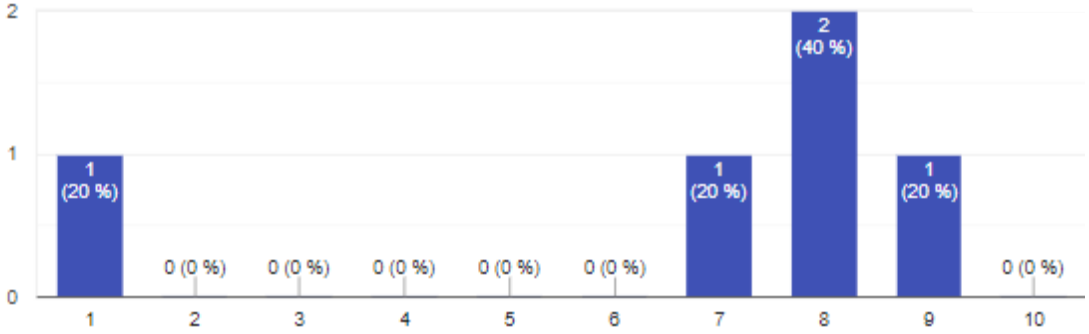
19. Tiempo de combustión

5 respuestas



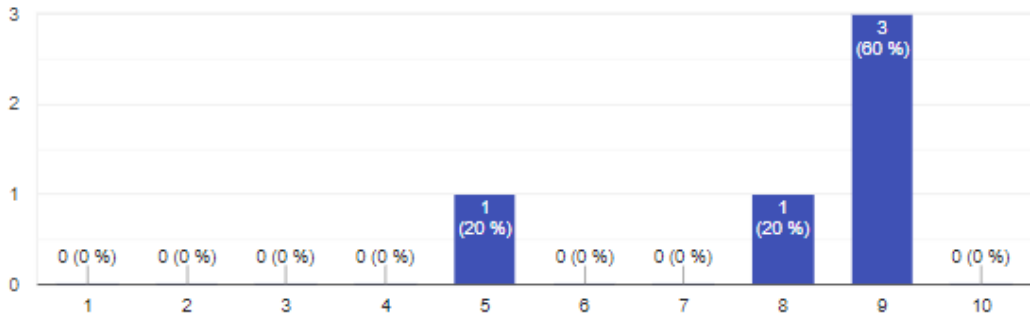
20. Potencia del motor

5 respuestas



21. Consumo de combustible

5 respuestas



22. Si considera algún otro requerimiento importante por favor escribir cuál y/o cuales y su nivel de importancia:

2 respuestas

En cuanto al peso, aclarar si es el peso del Banco de pruebas o del motor.

Página dejada en blanco intencionalmente.