

Diseño conceptual de un banco de pruebas de inyectores para motores a reacción

Fecha de recibido: 11 de julio 2023	Fecha de aprobado: 17 de abril 2024
Reception date: July 11, 2023	Approval date: April 17, 2024
Data de recebimento: 11 de julho de 2023	Data de aprovação: 17 de abril de 2024

Luisa Fernanda Mónico Muñoz

<https://orcid.org/0000-0002-3597-6332>
luisa.monico@libertadores.edu.co

Doctora en Sistemas Propulsivos
en Medios de Transporte
Docente e investigadora – Fundación Universitaria
Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación ARESYS

Ph.D. in Propulsive Systems in Means of Transport
Teacher and Researcher – Los Libertadores
University Foundation, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
ARESYS Research Group

Doutoramento em Sistemas Propulsivos
em Meios de Transporte
Professora e investigadora – Fundação Universitária
Los Libertadores, Colômbia
Papel do investigador: teórico e escrito
Grupo de investigação ARESYS

Richard Giovanni Avella Sarmiento

<https://orcid.org/0000-0001-8081-7587>
rgavellas@libertadores.edu.co

Doctor en Ciencias Física
Docente e investigador – Fundación Universitaria
Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación ARESYS

Ph.D. in Physical Sciences
Teacher and Researcher – Los Libertadores
University Foundation, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
ARESYS Research Group

Doutoramento em Ciências Físicas
Professor e investigador – Fundação Universitaria
Los Libertadores, Colômbia
Papel do investigador: teórico e escrito
Grupo de investigação ARESYS

Nicolli Andrea Montoya Garzón

namontoyag01@libertadores.edu.co

Ingeniera Aeronáutica
Investigadora – Fundación Universitaria
Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación ARESYS

Aeronautical Engineer
Researcher – Los Libertadores University
Foundation, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
ARESYS Research Group

Engenheiro Aeronáutico
Investigador – Fundação Universitária
Los Libertadores, Colômbia
Papel do investigador: teórico e escritor
Grupo de investigação ARESYS

Cómo citar este artículo: Mónico Muñoz, L. F., Avella Sarmiento, R. G., y Montoya Garzón, N. A. (2024). Diseño conceptual de un banco de pruebas de inyectores para motores a reacción. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(2), 30-45. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.821>



Diseño conceptual de un banco de pruebas de inyectores para motores a reacción

Conceptual design of a jet engine injector test bench

Projeto conceitual de uma bancada de testes de injetores de motores a jato

Resumen: Todo desarrollo de un producto debe pasar por la etapa del diseño conceptual, el cual consiste en obtener una solución parcial a un problema planteado a partir de especificaciones, requisitos y necesidades de un cliente. En el caso de un motor a reacción, la manera como el combustible entra a la cámara de combustión tiene un impacto significativo en su funcionamiento. Los parámetros de operación como el ángulo de aspersion, la presión y la pulverización del combustible son factores determinantes que influyen de manera directa en la velocidad de combustión y en la formación de la mezcla, lo cual ocasiona una alteración de la combustión en los motores a reacción; es por esta razón que los inyectores cumplen una función importante en el sistema de inyección de combustible. De tal manera, el mantenimiento de este componente tiene una gran relevancia e impacto en el motor. La preservación del buen funcionamiento del inyector se da bajo el uso del banco de pruebas, herramienta por medio de la cual se realiza el mantenimiento de este componente, y durante el proceso se calibran, se evalúan y se parametrizan los inyectores frente a un modelo previamente establecido por el fabricante. Dado lo anterior, en el presente artículo se describirá el diseño conceptual de un banco de pruebas para los inyectores de un motor a reacción. Como punto de partida, se selecciona la metodología más adecuada, que tendrá en cuenta los requerimientos y requisitos del cliente, obtenidos por medio de una encuesta, para así generar conceptos que son evaluados por medio de la casa de la calidad. El concepto final se caracteriza por tener una estructura en acero inoxidable, un sistema de alerta avanzado y un diseño ergonómico, con una alta tecnología de elementos que lo hace el más costoso de las opciones establecidas.

Palabras clave: banco de pruebas; diseño conceptual; inyectores; motores a reacción; parámetros.

Abstract: Every product development must go through the conceptual design stage, which involves obtaining a partial solution to a problem based on the client's specifications, requirements, and needs. In the case of a jet engine, the way fuel enters the combustion chamber has a significant impact on its performance. Operational parameters such as spray angle, pressure, and fuel atomization are determining factors that directly influence combustion speed and mixture formation, leading to an alteration in combustion in jet engines. For this reason, injectors play an important role in the fuel injection system. Thus, the maintenance of this component is of great relevance and impact on the engine. The preservation of the injector's proper functioning is ensured through the use of a test bench, a tool used to maintain this component, during which the injectors are calibrated, evaluated, and parameterized against a model previously established by the manufacturer. Given the above, this article will describe the conceptual design of a test bench for jet engine injectors. As a starting point, the most appropriate methodology is selected, considering the client's requirements and needs obtained through a survey, to generate concepts evaluated through the house of quality. The final concept is characterized by having a stainless steel structure, an advanced alert system, and an ergonomic design, with high-tech elements that make it the most expensive of the established options.

Keywords: Test bench; conceptual design; injectors; jet engines; parameters.

Resumo: Todo desenvolvimento de um produto deve passar pela etapa do design conceitual, que consiste em obter uma solução parcial para um problema baseado nas especificações, requisitos e necessidades do cliente. No caso de um motor a jato, a maneira como o combustível entra na câmara de combustão tem um impacto significativo em seu desempenho. Os parâmetros operacionais, como o ângulo de pulverização, a pressão e a atomização do combustível, são fatores determinantes que influenciam diretamente a velocidade da combustão e a formação da mistura, ocasionando uma alteração na combustão dos motores a jato. Por essa razão, os injetores desempenham um papel importante no sistema de injeção de combustível. Assim, a manutenção desse componente tem grande relevância e impacto no motor. A preservação do bom funcionamento do injetor é garantida pelo uso do banco de testes, ferramenta utilizada para a manutenção desse componente, durante a qual os injetores são calibrados, avaliados e parametrizados em relação a um modelo previamente estabelecido pelo fabricante. Diante do exposto, este artigo descreverá o design conceitual de um banco de testes para os injetores de um motor a jato. Como ponto de partida, é selecionada a metodologia mais adequada, levando em consideração os requisitos e necessidades do cliente, obtidos por meio de uma pesquisa, para gerar conceitos que são avaliados pela casa da qualidade. O conceito final se caracteriza por ter uma estrutura em aço inoxidável, um sistema de alerta avançado e um design ergonômico, com alta tecnologia de elementos que o torna a opção mais cara das estabelecidas.

Palavras-chave: Banco de testes; design conceitual; injetores; motores a jato; parâmetros.

Introducción

Los bancos de pruebas son herramientas que tienen como objetivo analizar componentes por medio de diversas pruebas, en donde se evalúan sus parámetros y se estudia la información obtenida para tener un informe completo del estado de este componente (Guerrero-Ángeles, 2016). Es por este motivo que los fabricantes, las empresas y las universidades han trabajado en diversos proyectos para ampliar el conocimiento en este campo. En Colombia, universidades como la San Buenaventura han desarrollado el diseño de un banco de pruebas para motores PT6T-3, a fin de realizar tareas de mantenimiento como el *overhaul* y pruebas pos-*overhaul*, cuyo objetivo era disminuir costos de mantenimiento para los operadores de este tipo de motores (Ferreira-Garzón *et al.*, 2008). Así mismo, en la Fundación Universitaria Los Libertadores se diseñó, construyó e implementó un banco de pruebas para la caja de accesorios del motor J-38 perteneciente al avión A 37-B de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC). Durante esta investigación, se desarrolló un equipo que ofreciera a la entidad mayor confiabilidad y mejores resultados durante el mantenimiento de la caja de accesorios de dicho motor, con el fin de contribuir a una necesidad de que la parte fuera sometida a condiciones de operación (Londoño-Gómez y Méndez-Tejero, 2014).

Un componente fundamental para el buen funcionamiento del motor son los inyectores, debido a que hacen parte del sistema de combustión, el cual se encarga de suministrar la cantidad correcta de combustible. Los inyectores y todo el sistema de combustión están sometidos constantemente a suciedades, residuos o impurezas que pueden afectar directamente el funcionamiento del motor. Por ello, universidades y entidades estatales han realizado investigaciones enfocadas en bancos de pruebas que contribuyan al mantenimiento de estos componentes (BARDAHL, 2020).

Un ejemplo de lo anterior fue el diseño y la construcción de un banco de pruebas para inyectores de los motores GARRETT TPE331 y PT6A-25C, desarrollado por la FAC. El estudio tuvo como objetivo disminuir costos

de mantenimiento a la entidad brindando un equipo con las capacidades técnicas para el cumplimiento completo de sus necesidades (Hernández-Rueda *et al.*, 2007). Así mismo, la investigación estuvo enfocada en el diseño y la construcción de un banco de pruebas para boquillas de inyección de combustible aplicable para los motores PW100 y PT6, cuya finalidad fue abarcar la misma problemática existente en el país, que es la rentabilidad de realizar el mantenimiento de esta clase de componentes a nivel nacional (Escobar-Garzón *et al.*, 2007). También, la FAC desarrolló una investigación sobre un banco de pruebas de inyectores para motores PT-6 A/T y PT-6-3b, que se enfocó en mejorar el mantenimiento de los motores dentro de la institución para disminuir los tiempos de inspección (Pérez y Moreno, 2009).

Inyector

Los inyectores de un motor a reacción son los encargados de introducir una cantidad determinada de combustible a la cámara de combustión, atomizando el combustible de manera que se mezcle con el aire. El chorro que sale de los inyectores es de forma cónica y su movimiento es helicoidal, la presión de salida del combustible puede oscilar entre 30 y 70 kg/cm², dependiendo del fabricante (Galmés-Belmonte, 2015). En la industria aeronáutica, existen dos tipos de inyectores: los de atomización y los de vaporización. Los primeros, que son los más utilizados en la aviación, se dividen en dos tipos: los de composición simple y los de composición dúplex (Rivas, 2003).

Inyectores simple: Fue uno de los primeros utilizados con éxito en los motores a reacción. Van rosados directamente al colector de combustible en la cámara de combustión, y una de sus características principales es que tiene un solo orificio que es por donde el combustible sale atomizado de manera cónica por medio de gotas muy finas (Rivas, 2003). Operan mejor a presiones altas, pero una de sus más grandes desventajas es que no funcionan de manera correcta a presiones bajas (Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí, 2018). En la Figura 1, se pueden observar las partes de un inyector tipo simple.

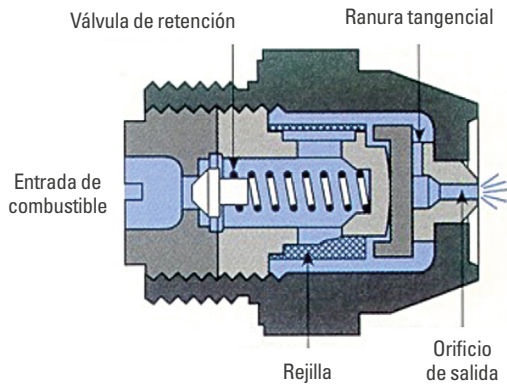


Figura 1. Inyector simplex
Fuente: Rivas (2003).

Inyectores dúplex: El inyector dúplex se clasifica dependiendo del tipo de colector que tenga. En los inyectores dúplex de un solo colector, el combustible llega a este tipo de inyector a través de un colector. Tienen una válvula difusora que se encarga de permitir que el combustible se pulverice desde el orificio central a presiones bajas. El combustible que sale por este orificio se usa para el arrancar el motor (Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí, 2018). Cuando la unidad de control de combustible calibra la suficiente presión, abre el difusor de flujo y es ahí donde permite el paso de combustible por medio del segundo orificio (Rivas, 2003). En la Figura 2, se pueden observar las partes de un inyector dúplex con un solo colector.

Por su parte, los inyectores dúplex de doble colector se caracterizan por tener dos entradas independientes por donde fluyen el combustible primario y el secundario. Cuando se habla de arranque y condiciones de necesidad de bajo flujo, la unidad de control de combustible incrementa la presión lo suficiente para que el combustible primario salga con un espectro de pulverización ancho (Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí, 2018). Ya cuando se realiza un incremento en la velocidad, la presión aumenta, generando que la válvula se abra aún más y permitiendo que el combustible también fluya por medio del colector secundario; el flujo que proviene del colector secundario rodea al del colector primario. En el inyector, se encuentran el orificio por donde sale el flujo primario, que es el del centro, y orificios más pequeños alrededor de este que

generan un chorro cónico (Rivas, 2003). A continuación, en la Figura 3 se observan las partes correspondientes a un inyector dúplex con doble colector.

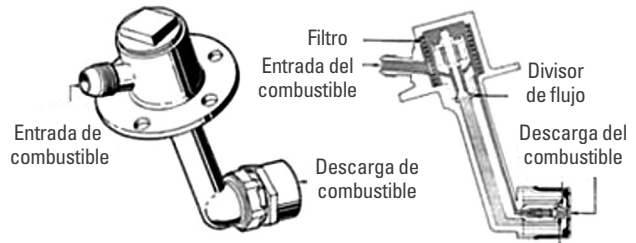


Figura 2. Inyector tipo dúplex con un solo colector
Fuente: Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí (2018).

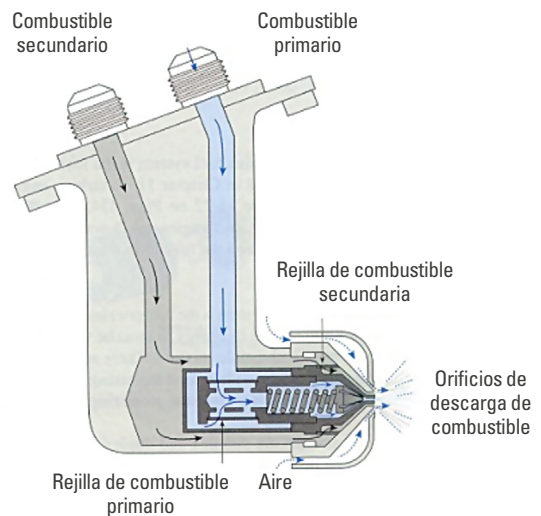


Figura 3. Inyector dúplex con doble colector
Fuente: Rivas (2003).

Metodología

En este trabajo, se desarrolló la metodología analítica, que abarca la descomposición de definiciones, funcionamiento y análisis de parámetros que se van a utilizando en el diseño del banco (Arzola de la Peña, 2011). El proyecto incluye una primera fase en la que se realiza la búsqueda de información sobre inyectores de motores a reacción y el diseño detallado del banco de

pruebas para estos. La segunda fase incluye un desarrollo ingenieril, en el que se realiza el diseño conceptual, compuesto por tres etapas interrelacionadas: recolección de los requerimientos del cliente, orientación de los resultados, y la casa de la calidad y la generación de conceptos.

En esta segunda etapa, se realiza el diseño y el análisis final del banco de pruebas de inyectores para motores a reacción, pero esto se hará por medio de distintas tareas. Primero, se realizará el análisis funcional del banco; en este paso, se establecen las funciones que debe tener cada uno de los aspectos seleccionados de la encuesta. Después, se realiza la generación de conceptos, teniendo en cuenta las funciones establecidas para cada requerimiento del cliente, y se establece un instrumento que pueda cumplir con estas necesidades. Luego, por medio de un proceso creativo, se da lugar a la creación de diversos conceptos globales que cumplan con las características y necesidades operativas; cada uno de estos se evaluará por medio de la casa de la calidad con el fin de obtener el concepto global final que cumpla con cada uno de los requerimientos planteados en las encuestas.

Diseño conceptual del banco

Requerimientos del cliente

El libro *Metodología de diseño para ingeniería* (Arzola de la Peña, 2011) plantea un procedimiento para identificar los requerimientos del cliente, los cuales se obtuvieron por medio de una encuesta. Esta encuesta estuvo dirigida a los clientes del diseño, trece personas con un amplio conocimiento en el sector aeronáutico, especialmente la parte de propulsión; entre ellas técnicos e ingenieros que dieron un enfoque más especializado en el mercado nacional y docentes que ofrecieron una perspectiva más investigativa e innovadora para el diseño. La encuesta se realizó de forma virtual, y se hicieron preguntas cerradas en las cuales las personas debían seleccionar las respuestas que consideraran más adecuadas.

En la encuesta, se evaluaron las características, los requerimientos de construcción y los parámetros de operación del banco, y los encuestados pudieron evaluar la importancia de cada una de las variables establecidas. Esta importancia fue medida de 1 (más baja) a 5 (más alta). Las respuestas llevarían a proponer opciones viables de elementos funcionales para el correcto funcionamiento del banco, como se presentará más adelante.

Los datos obtenidos en la encuesta se clasificaron según la importancia establecida por los clientes. Se tomaron en cuenta para el diseño únicamente las características y los requerimientos que tuvieran una calificación superior al 20 %, dado que al sumar en cada una de las preguntas las respuestas con un porcentaje superior al 20 %, se sobrepasaba más de la mitad de los encuestados. Las características del banco se evaluaron mediante la pregunta 1: “¿Qué características considera que son importantes para realizar el diseño de un banco de pruebas de inyectores para motores a reacción?”. Los datos obtenidos se pueden observar en la Figura 4.

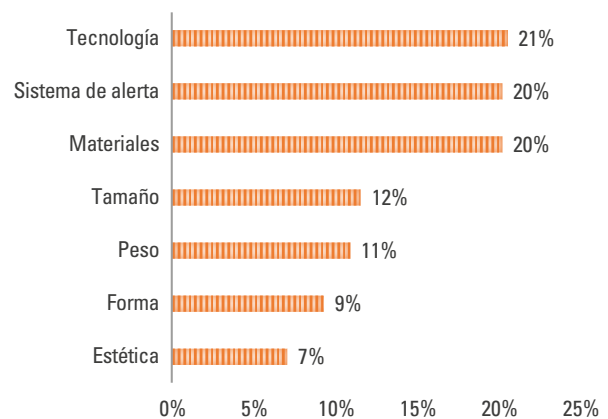


Figura 4. Características del banco de pruebas

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5, se evidencia que la tecnología es el requerimiento más importante para el cliente, dando a entender que es necesario el uso de equipos, dispositivos y sistemas avanzados que logren cumplir este requerimiento en su totalidad. De igual manera, se puede visualizar la relación que tiene el sistema de alerta con

los materiales, y se logra analizar que el cliente prioriza la construcción, la vida útil del banco de pruebas, la prevención de accidentes e incendios y el uso de conjuntos de instrumentos que faciliten la operación del banco de pruebas. Las demás características no serán tomadas en consideración debido a la baja calificación de importancia establecida por los clientes. Los requerimientos de construcción del banco fueron establecidos mediante la pregunta 2: “Califique de 1 a 5 la importancia de los siguientes requerimientos de construcción para el banco de pruebas de inyectores para motores a reacción”.

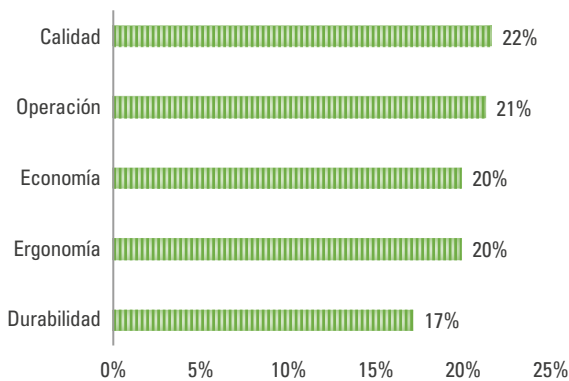


Figura 5. Requerimientos de construcción del banco de pruebas
Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Figura 5, para el cliente es necesario que el banco de pruebas cuente con condiciones óptimas de comodidad y seguridad para el operador, y que contribuya con sistemas ergonómicos para que su operación sea sencilla e intuitiva, pero que este conjunto de instrumentos, equipos y sistemas sean de fácil adquisición y económicos. Finalmente, se analiza que el cliente busca que el banco cumpla con todos los requisitos dejando como principal requerimiento de construcción la calidad del producto.

La tercera pregunta: “¿Qué parámetros considera que debe de evaluar el banco de pruebas para inyectores de un motor a reacción para que pueda cumplir con las necesidades técnicas y de mantenimiento?” tiene como fin establecer los parámetros de operación del banco. Los resultados de esta pregunta se pueden ver en la Figura 6.

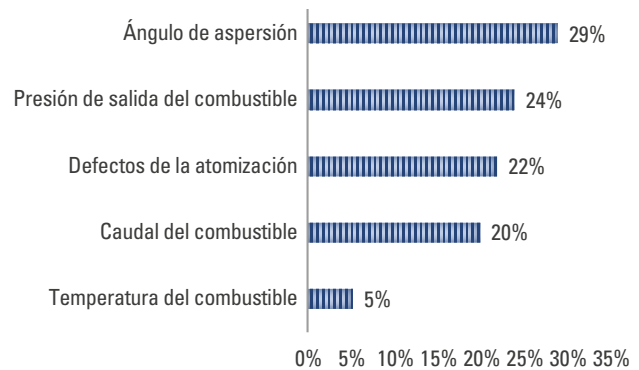


Figura 6. Parámetros de operación del banco de pruebas
Fuente: elaboración propia.

Como resultado de esta última pregunta, se obtuvo que la centralización de los clientes es buscar que el banco esté en la capacidad de evaluar el ángulo de aspersión, considerándolo el parámetro más importante a tener en cuenta al momento de realizar la inspección de los inyectores. Los clientes, en su mayoría, estuvieron de acuerdo y resaltan la importancia de la presión de salida del combustible, los defectos de atomización y el caudal de combustible como parámetros esenciales de este banco de pruebas. Por último, se concluye que los parámetros de operación del banco que son importantes para el cliente coinciden con los parámetros de operación de los inyectores que tienen mayor impacto en el motor, exceptuando la temperatura del combustible, dado que tan solo el 5% de los trece encuestados tomó en cuenta ese parámetro como importante; por tal motivo, no se realizará el análisis de conceptos para este parámetro.

Orientación de los resultados al proceso de diseño conceptual

Para satisfacer los requerimientos del cliente, es importante entender uno por uno, así se podrá obtener la necesidad exacta del cliente. El libro propone un análisis inicial donde se dividen los requerimientos iniciales en cinco requisitos, a saber:

a) Requisitos de seguridad:

Se distinguen por brindarle las respectivas herramientas de apoyo al operador de un equipo, máquina o elemento, como pueden ser: señalizaciones,

sensores de sirenas, alarmas, avisos, etc. (Taco-Álvaro, 2015). Para este diseño, se va a considerar el sistema de alerta como un requisito de seguridad.

b) Requisitos de funcionalidad:

Es una declaración de cómo debe comportarse un producto o sistema y se pueden detectar como: rangos de operación, cálculos, detalles técnicos, manipulación de datos y otras funcionalidades específicas que deba cumplir el sistema (Visure, s. f.). El ángulo de aspersión, la presión de salida de combustible, los defectos de atomización, el caudal de combustible y la operación se van a considerar como requisitos de

funcionalidad de este diseño. Para comprender la función de cada parámetro operativo, y así mismo lograr satisfacer las necesidades iniciales de diseño, se realizó una recolección de información en diferentes empresas del sector aeronáutico, con cuya experiencia se logró obtener rangos de operación de los inyectores de diferentes motores operados en Colombia. Se debe tener en cuenta que estos rangos son aproximaciones técnicas, ya que su correcta información se encuentra en manuales del fabricante. A continuación, en la Tabla 1 se pueden apreciar los rangos de operación de los inyectores.

Tabla 1.
Rangos técnicos de operación de los inyectores

Aeronave	Tipo de motor	Presión flujo primario (PSI)	Caudal (PPH)	Ángulo de aspersión presiones bajas	Ángulo de aspersión presiones altas
Pratt & Whitney					
Boeing 727-200	JT8D-17	110-215	7,05-41,8	70°-90°	45°-50°
Hawker 400A	JT15D-5	98-160	5,01-35,6		
Gulfstream G200	PW306A	99,67-187,03	5,32-37,09		
ATR 42	PW100 - Series	100-190	5,4-38,02		
ATR 72					
Casa C-295					
Dash-8					
Embraer EMB 120					
Embraer 314					
Beechcraft T-6					
Basler BT-67	PT6A - Series	20-60	1,09-12,3		
Beechcraft 1900					
King Air					
Embraer 312					
Embraer 110					
Cessna208					
Rolls-Royce					
Boeing 787-8 / Boeing 787-9V	Trent 1000	120-230	7,23-42,32	70°-90°	45°-50°
Embraer ERJ-145	AE 3007	105-210	5,5-40,07		
Honeywell					
Jetstream 3201	TPE331-12UHR-702H	100-175	5,45-36,1	70°-90°	45°-50°
Learjet 45	TFE731-20				
Casa C-212	TPE331-10R-513C				
King Air	TPE331-6-251B				

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla anterior, los rangos de presión varían entre los 20 psi y los 230 psi. Ahora, se analiza que los rangos de presión son directamente proporcionales a los rangos de caudal; si la presión disminuye, el caudal lo hará de la misma manera, y si la presión aumenta, igualmente aumentará el caudal. Pero el ángulo de aspersión es inversamente proporcional a estos dos parámetros; si la presión aumenta, el ángulo de aspersión va a tender a disminuir.

c) Requisitos de apariencia:

Es considerado un requisito no funcional, y se refiere a los aspectos visuales y los atributos de un producto, como tamaño, forma, color, textura etc. (Ferrero *et al.*, s. f.). Para este diseño, se van a considerar tecnología, ergonomía y materiales como requisitos de apariencia.

d) Requisitos de manufactura:

Son aspectos que integran todos los recursos de fabricación, ofreciendo información de costos, calidad, herramientas y mano de obra de un producto (Visure, s. f.). Se va a considerar la calidad como requisito de manufactura.

e) Requisitos de costos:

Es el conjunto de bienes y servicios que se deben consumir para obtener un producto terminado en condiciones de ser vendido o para prestar algún servicio. Se va a considerar la economía como requisito de costos. Para brindar un mejor enfoque en el tema de costos, se realizará un análisis y se presentará un balance de costos iniciales del diseño conceptual al finalizar este capítulo. Luego de obtener un concepto global dominante, solo se tendrán en cuenta los costos de los conceptos generados en el transcurso del diseño conceptual.

Casas de la calidad

El despliegue de función de calidad o QFD (Quality Function Deployment) es un método utilizado en la metodología de diseño para el desarrollo de productos o servicios que interactúa con la voz del cliente y la traduce mediante pasos sucesivos en especificaciones más claras. Como herramienta principal del QFD, se encuentra la denominada ‘matriz de calidad’ para representar datos e información, con lo cual se permite relacionar la voz del cliente con requerimientos de

componentes, características, procesos de construcción, planes de operación e informes de calidad; la apariencia de esta matriz ha llevado a que se conozca como ‘casa de la calidad’ (Arzola de la Peña, 2011). La casa de la calidad cuenta con seis módulos principales:

- Voz del cliente: En este primer módulo, se relacionan los requerimientos del cliente, previamente identificados, y se deben organizar según su importancia y jerarquía (Vega-Muñoz, 2019).
- Requerimientos técnicos: En este módulo, se resalta la importancia de identificar cómo se van a satisfacer los requerimientos del cliente bajo requisitos de diseño apropiados que cumplan con la necesidad y con la función adecuada del producto (Vega-Muñoz, 2019).
- Relaciones: Luego de haber identificado los dos primeros módulos, se tiene el tercer módulo que hace referencia a las relaciones entre los requerimientos del cliente y los requerimientos técnicos (Vega-Muñoz, 2019).
- Ponderación del mercado: Este módulo hace referencia a la competencia de mercado que va a tener el producto creado, y es implementado únicamente en la tercera casa de la calidad para analizar una oportunidad de mejora antes de realizar el producto final. Normalmente, esto se revisa en la última fase del diseño, la cual detalla específicamente estos puntos (Vega-Muñoz, 2019).
- Prioridades de los requerimientos técnicos: En este módulo, se suman los valores obtenidos en el módulo de relaciones y se ordenan los requerimientos técnicos de manera jerárquica (Vega-Muñoz, 2019).
- Interrelaciones: Este módulo es el “techo” de esta matriz, en donde interactúan todos los requerimientos técnicos y se relacionan unos con otros; entre mayor relación tengan, mayor será la calificación, teniendo en cuenta su prioridad, y al final los requerimientos técnicos con la calificación más alta serán los escogidos para pasar a la siguiente casa de la calidad, y de esta manera cumplir y darle respuesta a la voz del cliente (Vega-Muñoz, 2019).

La primera casa de la calidad (Figura 7) relaciona y califica los requerimientos del cliente con los requisitos técnicos, los cuales fueron escogidos y analizados para transformar la voz del cliente en aspectos más simplificados. Por ejemplo, como requisito técnico del ángulo de aspersión y de los defectos de atomización, se escogió un sistema fotográfico, ya que ayudará en las tomas fotográficas y de video, en las que se podrán analizar las imágenes para una correcta inspección de los inyectores. De igual manera, con

los requisitos técnicos de presión de salida de combustible y caudal de combustible, donde se escogieron aspectos técnicos para satisfacer la necesidad del cliente, como instrumentos capaces y acoplados para medir cada uno de estos parámetros descritos. Todos los requerimientos técnicos van a brindar un análisis y la capacidad de entender qué componentes y qué se necesita para implementar en el banco de pruebas cuyas características cumplan con los requerimientos del cliente.

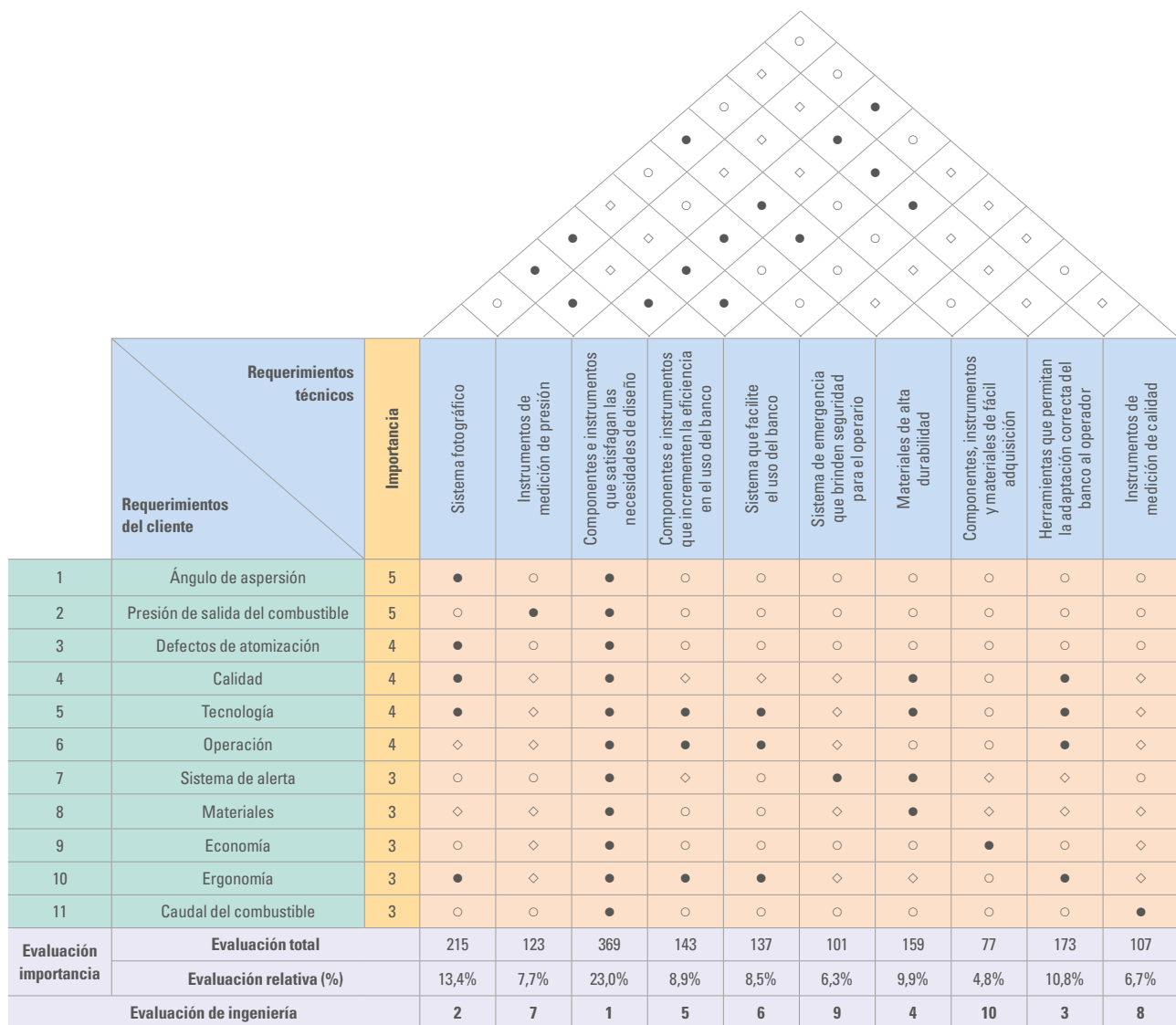


Figura 7. Primera casa de la calidad
Fuente: elaboración propia.

En la primera casa de la calidad, se visualiza que el requerimiento técnico de mayor importancia, dada su evaluación de ingeniería y análisis de evaluación relativa, es el requerimiento: componentes e instrumentos que satisfagan las necesidades de diseño, ya que se especifica que todo componente que se utilice para el banco de pruebas debe cumplir con los estándares de calidad y de función del banco de pruebas. Segundo del requerimiento técnico, un sistema fotográfico que va cumplir con cinco requerimientos del cliente de manera directa, brindándole al banco todos los estándares de calidad y tecnología. El tercer requerimiento técnico más fuerte, con una calificación de 173, son las herramientas que permitan la adaptación correcta del banco al operador, proporcionando funciones técnicas al banco en cuanto a operación y ergonomía.

Todos los requerimientos técnicos dan una idea de la calidad y la función que deben tener los componentes a utilizar en el banco de pruebas. Es por esta razón que el requerimiento con puntaje más bajo es: componentes, instrumentos y materiales de fácil adquisición. Si bien los componentes pueden llegar a ser de fácil adquisición en el mercado, no se garantiza que sean asequibles económicamente, ya que muchos de los equipos de medición y sistemas pueden llegar a ser bastante costosos.

Después, se desarrolló la segunda casa de la calidad, que describe las características exactas de los componentes. Por ejemplo, para los requerimientos técnicos que relacionan instrumentos de medición se tuvieron en cuenta los rangos de operación relacionados al comienzo de este capítulo. El componente de medición de presión tendrá una característica que debe poder medir entre rangos de 0 a 250 psi, y para el componente de medición de caudal, un rango de 0 a 40kg/h. Se debe tener en cuenta que este último rango se tomó realizando la conversión de unidades de Lb/h a kg/h, ya que los datos técnicos encontrados se especifican en Lb/h y las herramientas de medición se comercializan en kg/h. La segunda casa de la calidad se observa en la Figura 8.

Como se puede observar en la Figura 8, la característica principal de los componentes es que sean confiables. Tuvo una evaluación total de 336 y una

evaluación de ingeniería de 1, debido a que los componentes deben funcionar perfectamente, deben tener un ciclo de vida adecuado y deben tener la capacidad de trabajar en las condiciones ambientales de uso habitual del banco de pruebas, como lo pueden ser las altas presiones y las altas temperaturas. De igual manera, se puede analizar que una característica que resalta mucho es que debe ser cómodo para el operador, con una calificación de 208, siendo la segunda característica más importante. El banco debe ser bastante ergonómico, dado que puede ser operado por largos periodos de ejecución y esto puede causar lesiones más adelante para el operador del banco de pruebas. Otra característica como los controles mecánicos y eléctricos tiene la misma calificación, pues si los componentes cuentan con estos sistemas, va producir que el banco de pruebas sea mucho más sencillo de operar.

Si bien todas las características están enfocadas en funcionalidad y vida útil de los componentes, una de las que más se destacan es la modernización, dado que se busca que el banco de pruebas no solo sea funcional, sino que además tenga una alta gama tecnológica, buscando innovar en el mercado. Pero este es un enfoque costoso, lo cual se puede demostrar revisando que la característica de bajo costo tiene una calificación demasiado baja.

Generación de conceptos globales

La creación de conceptos globales es un proceso que trae como consecuencia el desarrollo de diversos prototipos que se encargan de integrar soluciones parciales para dar cumplimiento a los requerimientos del cliente (Arzola de la Peña, 2011). Un concepto global es lo que resulta del proceso de organizar todos los conceptos y subconceptos establecidos en la etapa anterior para formar un único producto. Es importante crear diferentes conceptos globales con el fin de evaluar y seleccionar el más adecuado que se adapte a las necesidades del cliente, siendo este el diseño conceptual final (Arzola de la Peña, 2011).

Para el desarrollo de los conceptos globales del banco de pruebas de inyectores para motores a reacción, se escogió la tabla de combinación, que es el

método creativo más interactivo y fácil de entender, el cual permite crear diversos prototipos asociando los conceptos generados en la fase anterior.

A continuación, en la Tabla 2 se observa el proceso de combinación de conceptos y se representa la creación de cuatro prototipos globales. Es importante aclarar que para los cuatro productos creados se hará uso del sistema de visualización artificial, debido a que esta tecnología permite realizar inspecciones y

detectar las deformaciones que se puedan presentar en el cono de aspersión, analizando el fluido en movimiento de manera automática. Este sistema de visualización artificial se divide en el sistema de formación de imágenes y el de procesamiento; el primero está compuesto por los siguientes subsistemas: de iluminación, de identificación de imagen y de recepción de señal en dispositivos digitales (Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí, 2018).

Características de los componentes		Importancia	Requerimientos técnicos									
			Confiabledad	Velocidad de grabación mayor a 30 fps	Combo para el operador	Resistentes a la corrosión	Modernización	Controles mecánicos y eléctricos	Rangos mecánicos o 250 psi	Rango de indicación o 40 Kg/hr	Prevención y alerta	Costo bajo
1	Componentes e instrumentos que satisfagan las necesidades de diseño	5	●	◇	●	●	◇	●	◇	◇	◇	◇
2	Sistema fotográfico	5	●	●	◇	○	●	○	○	○	○	○
3	Herramientas que permitan la adaptación correcta del banco al operador	5	●	○	●	○	◇	●	○	○	◇	○
4	Materiales de alta durabilidad	4	●	○	○	●	◇	○	○	○	○	○
5	Componentes e instrumentos que incrementen la eficiencia en el uso del banco	4	●	●	●	○	●	◇	○	○	○	○
6	Sistema que facilite el uso del banco	4	●	◇	●	○	●	●	○	○	○	○
7	Instrumentos de medición de presión	4	●	○	◇	○	○	○	●	○	○	◇
8	Instrumentos de medición de caudal	3	●	○	◇	○	○	○	○	●	○	◇
9	Sistemas de emergencia que brinden seguridad para el operario	3	●	○	○	○	◇	●	○	○	●	◇
10	Componentes, instrumentos y materiales de fácil adquisición	3	○	◇	○	◇	○	○	●	○	○	●
Evaluación importancia	Evaluación total		336	136	208	118	184	208	82	74	84	84
	Evaluación relativa (%)		22,2%	9,0%	13,7%	7,8%	12,2%	13,7%	5,4%	4,9%	5,5%	5,5%
Evaluación de ingeniería			1	4	2	5	3	2	7	8	6	6

Figura 8. Segunda casa de la calidad

Fuente: elaboración propia.

El uso del sistema de visualización artificial va a garantizar que cada uno de los conceptos globales pueda automatizar las inspecciones realizadas a los inyectores; además, gracias a su configuración que consta de una cámara digital, permite procesar y capturar la imagen, con una inspección más detallada en comparación con los métodos convencionales que solo hacían uso de la visión humana. Así, se cumple con los requisitos del cliente, como los parámetros operativos: ángulo de aspersión y defectos de atomización, y se satisface con el requerimiento de calidad, ya que se está garantizando una doble verificación y así evitar errores en las inspecciones de los inyectores (Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí, 2018).

Concepto 1

El sistema de visualización artificial logrará que todos los conceptos generales tengan un procesador de imagen, un sistema de iluminación de diodos led y un módulo de digitalización, cuya principal función será convertir la señal análoga que proporciona la cámara en una señal digital (Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí, 2018). Para este concepto, se optó por el uso de un tubo Pitot, ya que son herramientas confiables, muy fáciles de instalar, adecuar y utilizar, pues vienen en diferentes modelos que ofrecen una gran variedad de condiciones ambientales, incluyendo temperaturas extremadamente altas y una amplia

Tabla 2.
Creación de conceptos

Conceptos generados			1	2	3	4
Funciones principales	Ángulo de aspersión	Sistema de visión artificial				
		Barómetro				
	Presión de salida del combustible	Manómetro				
		Tubo Pitot				
	Defectos de atomización	Sistema de visión artificial				
		Caudalímetro ultrasonido				
Caudal del combustible	Caudalímetro de inserción	Caudalímetro electromagnético				
		Caudalímetro de inserción				
		Caudalímetro de inserción				
Funciones secundarias	Almacenamiento de datos	Tarjeta de almacenamiento				
		Disco mecánico				
		Disco de estado sólido				
		Almacenamiento en nube				
Funciones terciarias	Generación de informes	Excel				
		Matlab				
		Python				
Funciones técnicas	Tecnología	Pantallas digitales				
		Computadores portátiles				
		Computadores con torre CPU				
	Materiales	Aceros inoxidables				
		Hierro				
		Aleaciones de metales				
Funciones de uso o manejo	Ergonomía	Aceros estructurales				
		Botones				
		Perillas				
		Palancas				
		Pedales				
		Switches				
Funciones de seguridad	Sistema de alerta	Señalizaciones				
		Sistema contra incendios				
		Botón de emergencia				

Fuente: elaboración propia.

escala de presiones. Por otro lado, es una herramienta de fácil adquisición y económica (IQR Ingeniería Química, 6 de marzo de 2021).

Para este concepto, se seleccionó un caudalímetro electromagnético, el cual toma medidas de alta fiabilidad y estabilidad. El sensor no tiene piezas móviles, esto permite que su instalación sea simple y que los gastos de mantenimiento sean mínimos (Silver Automation Instruments, s. f.). El prototipo cuenta con un computador como sistema tecnológico de adquisición de datos, que a su vez estará equipado con una tarjeta de almacenamiento y de Excel como herramienta clave de optimización de datos.

El hierro, al ser un material maleable, va a permitir la construcción del banco y le brindará ventajas como resistencia al esfuerzo y ductilidad, garantizando excelentes prestaciones en cuanto a ciclos de vida del banco de pruebas¹. Para este concepto, se escogió el uso de pedales y *switches*, ya que su operación es muy sencilla para el operador y permite cumplir el requerimiento de operación establecido por el cliente. Por último, el botón de emergencia será muy útil en caso de que el sistema de operación del banco falle y sea necesario finalizar el proceso de inmediato sin poner en riesgo la integridad del operador.

Concepto 2

En este caso, el concepto general cuenta con un barómetro, instrumento que es muy útil, práctico y sencillo de operar, cuya simpleza y baja tecnología permite que sea un componente de bajo costo y de fácil accesibilidad (Eltiempo.es, s. f.). El caudalímetro ultrasónico es capaz de hacer mediciones muy exactas brindando datos más claros, y su fácil instalación permite reducir tiempos de construcción y ensambles en el banco, además de tener resistencia a la corrosión para garantizar aún más su vida útil (SmartMeasurement, s. f.).

El uso de un computador portátil le ofrecerá mayor comodidad al operador y así se reducirá el espacio al ser una herramienta más pequeña que un

computador de escritorio, además de que su almacenamiento se da por medio de disco de estado sólido, lo que posibilita cinco veces más la velocidad en la administración de datos. Este equipo tendrá instalado Python, cuyo lenguaje de alto nivel permitirá una programación estructurada, funcional y orientada a la generación de cada informe de las diferentes inspecciones realizadas a los inyectores (KeepCoding, 22 de septiembre de 2022).

La aleación de metales le suministra a este concepto la resistencia a los golpes y a las altas temperaturas, y esto le contribuirá al banco de pruebas tener una mayor durabilidad. Al buscar que el banco sea bastante ergonómico para el operador, se optó por el uso de perillas, pues presentan diferentes funciones de entradas y salidas, dándole uso en cualquier disposición que se tenga para la interacción y operación con el banco. Finalmente, para la selección del sistema de alerta se tuvo en cuenta las señalizaciones que ayudarán y limitarán las áreas donde el operador deberá tener precaución al operar el banco de pruebas, junto con un botón de emergencia para evitar cualquier riesgo de mala manipulación o fallas en el instrumento.

Concepto 3

A diferencia de los demás conceptos, este cuenta con un manómetro, una herramienta más resistente a las vibraciones y a los cortes de presión; a su vez, proporciona una lectura de presión instantánea y precisa, es una herramienta fácil de operar, muy versátil y sus costos de mantenimiento son muy bajos (Renting Finders, s. f.). La selección de un caudalímetro de inserción se da debido a que este tiene un microprocesador de señal, ofreciendo una variedad de posibilidades en cuestiones de medidas y registros; este instrumento puede ser instalado como equipo fijo o portátil, además tiene la ventaja de contar con una gran autonomía (Mejoras, s. f.).

Para este prototipo, se optó por computadores de torre CPU que tienen un sistema mayor de almacenamiento de datos, discos de estado sólido y almacenamiento en la nube. Esto proporcionará un doble almacenamiento para todos los informes y registros,

¹ Consultar: <https://tinyurl.com/yc626shn>

ocasionando una mayor confiabilidad para la administración de los datos. El computador de este concepto contará con Matlab, dado que permite construir modelos simples para testear y analizar datos, con cálculos y simulación de sistemas.

El acero inoxidable le brindará al banco una alta resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, y resistencia al impacto, a las ralladuras y a las variaciones térmicas, y gracias a sus propiedades, proporcionará una apariencia estética (Servinox, 14 de marzo de 2014). La combinación de perillas, botones y *switches* como sistema ergonómico le ofrecerá al banco de pruebas una operación bastante sencilla e intuitiva. Cumpliendo con las funciones de seguridad, se seleccionó una combinación de los tres conceptos generados: la señalización, el sistema de incendios y el botón de emergencia, ya que cada concepto puede presentar funciones diferentes, pero igual ayudan a que el diseño general logre ser innovador, representando un alcance a los requerimientos iniciales².

Concepto 4

Este concepto se destaca por el uso de palancas, ya que se utilizan en operaciones que requieran altas velocidades, y se caracteriza por tener de dos a tres posiciones de operación³. La selección de materiales como el acero estructural para este concepto se dio porque puede soportar grandes esfuerzos y dar mayor seguridad a la estructura, brindando ductilidad y tenacidad; además, el acero estructural representa una ventaja al hacer uniones y conexiones por medio de soldaduras, característica a tener en cuenta para la instalación de componentes externos a la estructura (Ferros Texar, s. f.).

El uso de un almacenamiento de datos por medio de disco mecánico cumplirá con un requisito importante para los clientes: la “economía”, pues discos de este tipo brindan una gran capacidad para retener información y son muy económicos en el mercado nacional. Por último, el banco cuenta con la inclusión de

un sistema contraincendios para prevenir accidentes y proteger la integridad del operador.

Concepto final

Este concepto se destaca por tener una relación funcional fuerte en el requerimiento material: su estructura en acero inoxidable, lo cual hace que el banco de pruebas pueda resistir varias alteraciones que se den en la estructura, como la corrosión. La tecnología y la operación también cuentan con una relación fuerte, ya que este prototipo utiliza gran variedad de equipos que facilitan la operación, con lo que le ofrecen comodidad al operador.

El prototipo 3 tiene un sistema de alerta avanzado, esto es, un sistema integrado de tres diferentes conceptos, logrando así que este requerimiento cuente con una relación fuerte. El uso de perillas, botones y *switches* lo hace un diseño bastante ergonómico. Los conceptos de complemento enriquecen mucho este requerimiento de ergonomía, con lo que logra cumplir en su totalidad con los requerimientos del cliente.

Al ser un concepto que cuenta con diferentes sistemas, componentes, piezas y herramientas, lo hace un prototipo bastante costoso y lo lleva a tener una relación débil con el requerimiento económico. Sin embargo, los altos costos de los elementos proporcionarían contar con un sistema que permita evaluar los inyectores de forma más segura, precisa y eficiente, brindando una mayor viabilidad de contar con elementos cien por ciento aeronavales. El diseño final del concepto 3, con cada uno de los conceptos generados, se puede ver en la Figura 9.

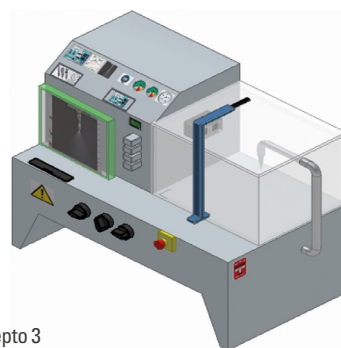


Figura 9. Concepto 3

Fuente: elaboración propia.

² Consultar: <https://tinyurl.com/5n88nber>

³ *Id.*

El diseño propuesto, a diferencia de los bancos o diseños existentes, tiene la ventaja de que puede ser útil para diversos tipos de motores; no como se presentó en la introducción de este trabajo, que los que se han desarrollado solo responden a las necesidades de un motor en específico. Es decir, el concepto 3 es un diseño de banco que permite evaluar inyectores empleados en las múltiples aeronaves que operan a nivel nacional, ya que brinda la oportunidad de moverse en un amplio rango de presiones de flujo primario, caudal y ángulo de aspersión.

Conclusiones

A partir del presente trabajo, se puede concluir que la encuesta permitió seleccionar, identificar y definir los parámetros operativos requeridos por el cliente para el diseño del banco de pruebas para inyectores. Por medio de las técnicas de creatividad, como el diagrama de descomposición funcional, se facilitó la generación de ideas, comprendiendo las funciones de cada requerimiento del banco de pruebas. La tabla de combinación de conceptos fue una técnica que permitió analizar diferentes conceptos, proporcionando la selección adecuada de componentes, materiales y dispositivos tecnológicos que cumplieran con las necesidades del cliente.

Así mismo, el uso de la casa de la calidad estableció una fuente de información clave para poder comprender las funciones, la operación y las características de los componentes a tener en cuenta para el desarrollo conceptual del banco de pruebas, proporcionando un sistema fiable y asegurando cumplir a cabalidad con los requerimientos del cliente, y logrando satisfacer la necesidad inicial. A partir de este proceso, se desarrolló el diseño conceptual de un banco de pruebas para inyectores de motores a reacción, cumpliendo con la caracterización y parametrización de datos de una manera eficiente, disminuyendo los tiempos en la toma de datos gracias a su capacidad tecnológica avanzada; además, ofrece un alto margen de seguridad al operario y satisface las necesidades del cliente.

El concepto final tiene una estructura en acero inoxidable, un sistema de alerta avanzado y un diseño ergonómico. Incluye a su vez una alta tecnología de elementos, lo cual lo hace el más costoso entre las opciones establecidas. Por último, es importante para un diseño detallado del banco de pruebas realizar un análisis, un estudio y una comprensión de los costos, con el fin de tener una mayor claridad y exponerle al cliente qué tan costoso saldría el desarrollo de este.

Referencias

- Arzola de la Peña, N. (2011). *Metodología de diseño para ingeniería*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- BARDAHL. (2020). *La importancia del inyector*. <https://tinyurl.com/mt9p47vr>
- Eltiempo.es (s. f.). *Barómetro* [en línea]. <https://tinyurl.com/3uz2f8vn>
- Escobar-Garzón, A., Villanueva, N., Pérez, G. y Hernández, T. E. (2007). Diseño y construcción de un banco de pruebas para las boquillas de inyección de combustibles de los motores PW100 y PT6. *Ciencia y Poder Aéreo*, 2(1), 41-44. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.82>
- Ferreira-Garzón, R. A., Jurado-Ballesteros, E. R. y Ayala-González, J. A. (2008). *Diseño de un banco de pruebas para motores PT6T-3* (trabajo de grado, Universidad de San Buenaventura). <https://tinyurl.com/2ewpk8aa>
- Ferrero, A., Huertas, R., Perales, E., Huraibat, K. y Santafé-Gabarda, P. (s. f.). Medida de la apariencia. *E-medida: Revista Española de Metrología* [en línea]. <https://tinyurl.com/2fmm42w4>
- Ferros Texar. (s. f.). *Acero estructural: ¿qué es y para qué se utiliza?* [en línea]. <https://tinyurl.com/t9rnwhay>
- Hernández-Rueda, J. A., Gómez-Lugo, J. H., Gutiérrez-Nieto, D. O., Díaz-Gaviria, J. H. y Casallas-Moreno, E. A. (2007). Banco de prueba de inyectores para motores GARRETT TPE331-10R-513C y PT6A-25C. *Ciencia y Tecnología Aero-náutica* [en línea]. <https://tinyurl.com/2ys2d4b9>
- Galmés-Belmonte, B. (2015). *Motores de reacción y turbina de gas* (2.ª ed.). Paraninfo.
- Guerrero-Ángeles, V. R. (2016). *Banco de montaje para motores a reacción*. Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo.
- IQR Ingeniería Química. (2021, marzo 6). *tubo de Pitot: ¿qué es y cómo funciona?* [en línea]. <https://tinyurl.com/nhxyndsc>

- KeepCoding. (2021, septiembre 22). *Ventajas y desventajas de Python* [en línea]. <https://tinyurl.com/98y7um6p>
- Londoño-Gómez, C. D. y Méndez-Tejero, D. A. (2014). *Diseño, construcción e implementación de un banco de prueba para la caja de accesorios del motor J-85 del avión A 37-B de la Fuerza Aérea Colombiana* (trabajo de grado, Fundación Universitaria Los Libertadores). Repositorio institucional. <https://tinyurl.com/yeyms2sn>
- Mejoras. (s. f.). *Hydrins. Caudalímetro de inserción electromagnético para medida de caudal* [en línea]. <https://tinyurl.com/7x54f84t>.
- Pérez, J. J. y Moreno, W. L. (2009). *Banco de prueba de inyectores para motores PT-6 A/T y PT-6/T-3b*. TecnoESUFA.
- RACE. (2022, noviembre 16). *Problemas con los inyectores: síntomas y fallos* [en línea] <https://tinyurl.com/yz4a5ujj>
- Renting Finders. (s. f.). *Manómetro* [en línea]. <https://tinyurl.com/vb92yz9r>
- Rivas, A. G. (2003). *Motores de turbina de gas* [en línea]. <https://tinyurl.com/2rrvnh6v>
- Ocaña-Sánchez, C. F. y López-Velasteguí, D. A. (2018). *Repotenciación del banco de pruebas para los inyectores del motor PT6 A-68C del avión A-29B Súper Tucano perteneciente al grupo logístico No. 232 de la Fuerza Aérea Ecuatoriana* (trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Repositorio institucional ESPOCH. <https://tinyurl.com/dee8nxua>
- Servinox. (2014, marzo 14). *Hablemos sobre el acero inoxidable* [en línea]. <https://tinyurl.com/4scf2fed>
- Silver Automation Instruments. (s. f.). *Ventajas y desventajas del medidor de flujo electromagnético* [en línea]. <https://tinyurl.com/4x7yt25x>
- SmartMeasurement. (s. f.). *Ultrasonic Flow Meters: Revolutionizing Industry Standards* [en línea]. <https://tinyurl.com/2pj56m4e>
- Taco-Álvaro, D. (2015, agosto 12). *Normas de seguridad de un operador industrial* [en línea]. <https://tinyurl.com/ya7xh338>
- Vega-Muñoz, A. (2019). Herramientas para incrementar la Innovación Tecnológica de productos en Latinoamérica. *Latin American Journal of International Affairs*, 2(1). <https://www.lajia.net/lajia/article/view/4>
- Visure. (s. f.). *Qué son los requisitos funcionales: ejemplos, definición, guía completa* [en línea]. <https://tinyurl.com/mtbpsdem>