



**“Implementación de un prototipo de banco de pruebas para el registro de presión,
temperatura y vibración de motores cohete”**

Calvache Gutiérrez, Bolívar Javier y Loachamin Muzo, Lenin Alexander

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica,
Automatización y Control

Ing. Guarderas Burbano, Galo Fernando, Ph. D.

Sangolquí, 8 de agosto del 2023

Scan details

Scan time:
August 2th, 2023 at 15:54 UTC

Total Pages:
74

Total Words:
18252

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	0.1%	14
Minor Changes	0%	0
Paraphrased	0.4%	77
Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage
 AI text
 Human text

Plagiarism Results: (2)

Fabricante de sensores de temperatura automotriz_ 0.4%
https://www.ntcsensors.com/fabricante_de_sensores_de_te...
 Fabricantes de sensores chinos Spain English German ...

D-83467.pdf 0.1%
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/454...>
 Luis Hernan
 Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería en Electricidad
 y Computación *Sistema de Adquisición de Datos de Humeda...





Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **"Implementación de un prototipo de banco de pruebas para el registro de presión, temperatura y vibración de motores cohete"** fue realizado por los señores **Calvache Gutiérrez, Bolívar Javier y Loachamin Muzo, Lenin Alexander**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 08 de agosto del 2023.



Ing. Guarderas Burbano, Galo Fernando, Ph. D.

C.C. 1706848163



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Calvache Gutiérrez, Bolívar Javier y Loachamin Muzo, Lenin Alexander**, con cédulas de ciudadanía n° 171811085-9 y n° 172120455-8, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Implementación de un prototipo de banco de pruebas para el registro de presión, temperatura y vibración de motores cohete"** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 08 de agosto del 2023

Calvache Gutiérrez, Bolívar Javier

C.C.: 171811085-9

Loachamin Muzo, Lenin Alexander

C.C.: 172120455-8



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Autorización de Publicación

Nosotros, **Calvache Gutiérrez, Bolívar Javier y Loachamin Muzo, Lenin Alexander**, con cédulas de ciudadanía n° 171811085-9 y n° 172120455-8, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Implementación de un prototipo de banco de pruebas para el registro de presión, temperatura y vibración de motores cohete"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 08 de agosto del 2023

Calvache Gutiérrez, Bolívar Javier

C.C.: 171811085-9

Loachamin Muzo, Lenin Alexander

C.C.: 172120455-8

Dedicatoria

En primer lugar, a Dios por bendecirme cada día, permitiéndome abrir los ojos, por ser cobijado con su cariño y protección en cada paso hasta aquí.

A mis padres, Rebeca Gutierrez y Bolívar Calvache, los cuales me demostraron que el camino honesto y el trabajo constante, siempre da sus frutos, por apoyarme en mi formación académica y en la espiritual, siendo mi brújula moral para incluir a la sociedad una persona de bien.

A mi hermanita, Jenny Calvache, por ser mi compañera de alegrías y tristezas, por apoyarme en los momentos difíciles y mostrarme que siempre hay esperanza al día siguiente.

A mis primos, Abigail y Pedrito que ocupan un lugar muy especial en mi corazón, son mi razón de ser y muchos logros son por y para ellos.

Finalmente, a mi novia Klaribel, por comprenderme en mis días ajetreados y darme su amor sincero durante el proceso de la carrera.

Bolívar Javier Calvache Gutiérrez

A mis padres, a mis hermanos y hermana que han sido un parte fundamental en mi vida brindándome apoyo, orientación y motivación en cada etapa de mi vida.

A mis cuñado Juan y cuñadas Blanca y Pao quienes han estado ahí preocupándose, cuidándome y aconsejándome en todo momento.

A mis Sobrinos Mishel, Ariel, Leonado y el nuevo integrante que está por venir por su apoyo y colaboración.

A Yuly que siempre me ha apoyado y me ha guiado a seguir desarrollándome en el ámbito académico y personal, por alegrarse por cada uno de mis logros y estar en los momentos más difíciles de mi vida.

Loachamin Muzo, Lenin Alexander

Agradecimiento

Este trabajo de titulación tiene el honor de agradecer encarecidamente a la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, a la dirección de carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control, a su equipo docente, el cual me brindo los conocimientos para mi formación profesional, nutriéndome, siento este trabajo uno de los muchos frutos que aportare a la comunidad

Al Doctor Galo Guarderas, Tutor del Proyecto, que fue una base en la elaboración del tema y la aplicación paso a paso del proyecto.

A Lenin Lochamin, mi compañero, quien presto su tiempo, colaboración y ayuda en la elaboración del proyecto.

A mi familia, por el apoyo incondicional en mí, por depositar su confianza ciegamente en cada trabajo que emprendo, sin importar la situación; por sostenerme en mis momentos de debilidad e impulsarme con más fuerza hacia adelante.

Finalmente, a todos los que contribuyeron a que llegara a este paso de mi vida de manera directa e indirecta, les agradezco de todo corazón.

Bolívar Javier Calvache Gutiérrez

Agradezco a mis padres Luis y Rocío, a mis hermanos William, Cristian y Gabriela, por apoyarme tanto, por ser mi motivación y luz en la oscuridad, por demostrarme la sencillez y alegría que define la palabra familia.

A mi cuñado Juan y cuñadas Blanca y Pao que llegaron a formar parte de mi familia y sus personalidades complementaron y fortalecieron los lazos entre hermanos.

A Yuly que con el pasar de los años llegó a ser una persona especial en mi vida, confió en mí y en mis capacidades, quien durante todos estos años de estudios soportó mi carácter y me demostró con sus alegrías, locuras y energía incondicional que todo se puede lograr mientras haya esfuerzo.

A mis amigos del colegio Francis, Daniel, Diego, Adela, Vanessa, Heidi y Ximena, agradezco su amistad incondicional que con el pasar de los años se ha visto fortalecido, su paciencia, solidaridad y las innumerables horas de compañía han enriquecido mi desarrollo personal.

A mis amigos de la Universidad Darío, Andrea, Luis, David, Sebastián con quienes inicié mi carrera y me han acompañado dentro y fuera del aula a lo largo de mi carrera profesional, por las locuras, convivencias, conocimientos y tiempo compartido en esta grandiosa travesía.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por darme la oportunidad de demostrar dentro y fuera de las aulas mis capacidades como profesional, a todos y cada uno de los ingenieros que con sus deberes y exámenes desarrollaron habilidades para defenderme en el mundo real, y en especial al Ing. Guarderas tutor de este proyecto que con su experiencia propia nos colaboró y apoyo.

Loachamin Muzo, Lenin Alexander

Índice de contenidos

Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	8
Resumen	19
Abstract.....	20
Capítulo I.....	21
Introducción	21
Antecedentes.....	21
Justificación e Importancia.....	23
Alcance del proyecto	24
Objetivos	26
<i>Objetivo general</i>	26
<i>Objetivos específicos</i>	26
Trabajos relacionados	27
Capítulo II.....	31
Marco teórico	31
Misil SAM.....	31
<i>Definición</i>	31
Banco de pruebas para motores cohete	32
<i>Constitución física de los bancos de pruebas</i>	32
<i>Clasificación de los bancos de prueba para motores cohete</i>	32
<i>Clasificación por ubicación del motor</i>	32
<i>Clasificación por tipo de propelente</i>	34
Modelamiento de misil SAM	35

<i>Toberas</i>	35
<i>Combustible</i>	37
<i>Clasificación de sistema de propulsión cohete</i>	38
Partes de un misil SAM	39
Consideraciones de disparo.....	40
Sensores	41
<i>Presión</i>	41
<i>Temperatura</i>	42
<i>Aceleración</i>	42
Categorías fundamentales.....	43
<i>Adquisición de datos</i>	43
<i>Acondicionamiento de señales</i>	44
<i>Análisis de datos</i>	44
<i>Registro de video</i>	45
Software	46
<i>Matlab</i>	46
<i>LabVIEW</i>	47
Capítulo III.....	48
Diseño del sistema	48
Selección de Dispositivos.....	48
<i>Presión</i>	48
<i>Temperatura</i>	50
<i>Vibración</i>	52

	12
<i>Video</i>	53
<i>NI PXIe-8115</i>	53
<i>NI PXIe-6361</i>	55
Diseño electrónico	56
<i>Presión</i>	56
<i>Temperatura</i>	57
<i>Vibraciones</i>	58
<i>Convertidores de señales</i>	59
Diseño Interfaz gráfica	60
Diseño e implementación de la plataforma de pruebas	65
<i>Selección de la estructura</i>	66
<i>Sistema de deslizamiento</i>	68
<i>Diseño de la cámara</i>	70
<i>Diseño del soporte del sensor de presión</i>	72
<i>Diseño del soporte del sensor de la termocupla</i>	73
<i>Diseño del soporte del acelerómetro</i>	73
<i>Sistema de fijación del BEMCO</i>	74
Capítulo IV	76
Implementación	76
Montaje de sistema electrónico	76
Calibración de sensores	77
<i>Transductor de presión</i>	77
<i>Temperatura</i>	79

<i>Vibraciones</i>	81
Programación de interfaz gráfica	83
<i>Interfaz gráfica Servidor LabVIEW</i>	83
<i>Interfaz gráfica cliente LabVIEW</i>	88
<i>Interfaz gráfica Matlab</i>	92
Capítulo V	95
Pruebas y Resultados	95
<i>Protocolo de Pruebas</i>	95
<i>Previo al ensayo</i>	95
<i>Durante el proceso del ensayo</i>	95
<i>Ajuste de la cámara de combustión</i>	96
<i>Carga de la cámara de combustión</i>	96
<i>Sensores</i>	96
<i>Proceso después el ensayo</i>	96
<i>Mantenimiento</i>	97
Funcionamiento del sistema	97
<i>Presión</i>	99
<i>Temperatura</i>	100
<i>Vibración</i>	101
<i>Video</i>	101
Análisis de resultados	103
Interpretación de los resultados	103

<i>Temperatura</i>	103
<i>Presión</i>	104
<i>Vibraciones</i>	105
Caracterización y análisis	108
Conclusiones	112
Recomendaciones	114
Bibliografía	115
Apéndices	120

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Parámetros habituales de diseño de un BEMCO</i>	65
Tabla 2 <i>Valores medidos de presión con la lectura del manómetro.</i>	77
Tabla 3 <i>Relación voltaje con presión deseada</i>	79
Tabla 4 <i>Relación voltaje con temperatura deseada</i>	81

Índice de figuras

Figura 1 <i>Modelo de banco de pruebas horizontal prototipo</i>	32
Figura 2 <i>Modelo de banco de pruebas vertical</i>	33
Figura 3 <i>Modelo de banco de pruebas vertical con tobera inferior</i>	34
Figura 4 <i>Formas geométricas de las toberas en general</i>	36
Figura 5 <i>Propelente sólido para motores cohete</i>	38
Figura 6 <i>Curvas de reacción en función del relleno de la tobera</i>	39
Figura 7 <i>Elementos de un motor cohete solido</i>	40
Figura 8 <i>Cámara Web Genérica</i>	45
Figura 9 <i>Pantalla de trabajo en matlab</i>	46
Figura 10 <i>LabVIEW como lenguaje de programación</i>	47
Figura 11 <i>Transmisor de presión PT200PSIG</i>	49
Figura 12 <i>Termocupla tipo k</i>	50
Figura 13 <i>Pastillas acondicionamiento de señal Pixyxs</i>	51
Figura 14 <i>MPU9250 módulo de acelerómetro</i>	52
Figura 15 <i>Controlador NI PXIe-8115</i>	54
Figura 16 <i>Módulo DAQ NI PXIe-6361</i>	55
Figura 17 <i>Diagrama de conexión en general</i>	57
Figura 18 <i>Diagrama de conexión final entre termocupla, acondicionamiento y envío de datos</i>	58
Figura 19 <i>Diagrama de conexión entre ESP32 y módulo MPU9250</i>	59
Figura 20 <i>Modulo convertidor de 4 a 20Ma hasta 0-5 V</i>	60
Figura 21 <i>Diseño de Interfaz gráfica servidor</i>	61
Figura 22 <i>Diseño de Interfaz gráfica Cliente</i>	62
Figura 23 <i>Interfaz gráfica pantalla principal Matlab</i>	63
Figura 24 <i>Interfaz gráfica pantalla graficos Matlab</i>	63
Figura 25 <i>Interfaz gráfica Pantalla Video Matlab</i>	64

Figura 26 <i>Modelo del BEMCO simulado</i>	67
Figura 27 <i>Estructura del BEMCO</i>	67
Figura 28 <i>Medidas del banco de pruebas</i>	68
Figura 29 <i>Esquema de transición</i>	68
Figura 30 <i>Bases bridas de soporte</i>	70
Figura 31 <i>Cámara de combustión</i>	71
Figura 32 <i>Circuito neumático para medir la presión</i>	72
Figura 33 <i>Soporte de temperatura</i>	73
Figura 34 <i>Conexión MPU9250 y ESP32</i>	74
Figura 35 <i>Fosa para pruebas de lanzamiento</i>	75
Figura 36 <i>Diagrama general del sistema electrónico</i>	76
Figura 37 <i>Linealización del transductor de Presión</i>	78
Figura 38 <i>Configuración de la pastilla pxyxs para rango deseado</i>	80
Figura 39 <i>Diagrama de flujo de la programación del acelerómetro</i>	82
Figura 40 <i>Bloque de programación para la comunicación cliente-servidor mediante el protocolo TCP/IP</i>	84
Figura 41 <i>Bloque de programación para la adquisición de datos</i>	85
Figura 42 <i>Bloque de programación para la conversión de unidades y linealización</i>	86
Figura 43 <i>Bloque de programación completo de la interfaz gráfica del servidor</i>	87
Figura 44 <i>Bloque de programación de comunicación TCP/IP y escritura de archivos</i>	88
Figura 45 <i>Bloque de programación de configuración de bits de lectura de los bloques TCP read</i>	90
Figura 46 <i>Bloque de programación de segmentación y registro de datos</i>	91
Figura 47 <i>Bloque de programación completo de la interfaz gráfica del cliente</i>	91
Figura 48 <i>Interfaz gráfica del servidor registrando datos</i>	97
Figura 49 <i>Interfaz gráfica del cliente registrando datos</i>	98

Figura 50 <i>Archivo de almacenamiento de datos</i>	98
Figura 51 <i>Gráfica de presión en estado de reposo</i>	99
Figura 52 <i>Presión y Temperatura en estado de reposo</i>	99
Figura 53 <i>Gráfica de presión en estado de reposo</i>	100
Figura 54 <i>Temperatura en estado de reposo</i>	100
Figura 55 <i>Aceleración en estado de reposo 3 ejes</i>	101
Figura 56 <i>Reproducción de material fílmico estado de reposo</i>	102
Figura 57 <i>Llama generada en la fase de experimentación</i>	102
Figura 58 <i>Empuje generado en la fase de experimentación</i>	103
Figura 59 <i>Gráfica de temperatura en fase de experimentación</i>	104
Figura 60 <i>Gráfica de Presión en fase de experimentación</i>	104
Figura 61 <i>Datos recolectados en el eje x por el acelerometro</i>	105
Figura 62 <i>Datos recolectados en el eje z por el acelerometro</i>	106
Figura 63 <i>Datos recolectados en el eje y por el acelerometro</i>	107
Figura 64 <i>Vectores en matlab para buscar la función de transferencia de temperatura</i>	108
Figura 65 <i>Comparación salida de temperatura con el modelo matemático</i>	109
Figura 66 <i>Vectores en matlab para buscar la función de transferencia de presión</i>	110
Figura 67 <i>Comparación salida de presión con el modelo matemático</i>	110

Resumen

El presente proyecto práctico tiene como finalidad el diseño y construcción de un banco de pruebas amateur denominado BEMCO, el cual será de suma utilidad para evaluar el comportamiento del misil SAM, las variables físicas que actúan en los motores de empuje y vuelo del misil que estudiamos son temperatura, presión, vibraciones en los tres ejes con respaldo de video. En el Centro de Investigaciones Científica y Tecnológica del Ejército ubicado en la sede de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en Sangolquí se obtuvieron los resultados favorables que pueden potenciar futuros estudios. Además, cuenta con la posibilidad de adaptarse al análisis de diferentes toberas inclusive el análisis de más variables físicas. La adquisición de datos fue por medio de los módulos NI PXIe-8115 y PXIe-6361 que mediante cliente – servidor enviamos los datos para procesar en Matlab para integrarlos todos en una HMI usando app designar del GIU propio de MATLAB. El proponente que se utilizó es la pólvora de guerra donde se logró desarrollar un modelo matemático que se puede utilizar como fundamento científico para elevar el BEMCO a niveles más técnicos y futuras líneas de investigación con la proyección de incrementar, innovar o renovar los recursos en posesión de las F.F.A.A.

Palabras Claves: Banco de pruebas, toberas, motores cohete, adquisición, sensores

Abstract

The purpose of this practical project is the design and construction of an amateur test bench called BEMCO, which will be very useful to evaluate the behavior of the SAM missile. The physical variables that act on the thrust and flight motors of the missile that we are studying are temperature, pressure, and vibrations in the three axes with video support. In the Center for Scientific and Technological Research of the Army located at the headquarters of the University of the Armed Forces ESPE in Sangolquí, favorable results were obtained that can promote future studies. In addition, it has the possibility of adapting to the analysis of different nozzles, including the analysis of more physical variables. The data acquisition was by means of the NI PXIe-8115 and PXIe-6361 modules that through client - server we sent the data to be processed in Matlab to integrate them all in an HMI using the app designer of MATLAB's own GIU. The propellant that was used is gunpowder where it was possible to develop a mathematical model that can be used as a scientific foundation to raise BEMCO to more technical levels and future lines of research with the projection of increasing, innovating or renewing the resources in possession of the F.F.A.A.

Keywords: Test bench, nozzles, rocket motors, acquisition, sensors

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

El centro de investigación de aplicaciones militares – CICTE tiene como misión la de proponer y ejecutar proyectos para ser utilizados en aplicaciones militares, basado en la investigación científica básica mediante el aprovechamiento de técnicas y tecnologías que permitan el desarrollo de una industria bélica nacional, lo que reduciría la dependencia de este campo, además de realizar tareas técnicas para recuperar, modernizar e innovar los recursos tácticos de los medios operativo de las F.F.A.A.

La tecnología de coherería se ha mantenido vigente en el desarrollo de sistemas de armas, producto del aprovechamiento de los avances que esta tecnología ha alcanzado en función del gran desarrollo en lo que respecta a la exploración espacial. En lo que se refiere a la aplicación de la coherería para fines bélicos ha permitido desarrollar sistemas de armas letales, precisas y versátiles, que en combinación con técnicas de control optimo, detección de blancos y el uso de explosivos de alta potencia han permitido desbistar amplias zonas en disputa mediante el transporte de cargas explosivas. Por otro lado, el desarrollo y uso de armas inteligentes equipadas con cohetes, permiten destruir únicamente el objetivo asignado minimizando daños colaterales de manera lógica, rápida y efectiva.

Entre las ciencias involucradas en el lanzamiento de cohetes encontramos la matemática como eje fundamental, la mecánica de materiales, aerodinámica, mecánica de fluidos y la electrónica como sistema de control dentro de los mecanismos a ejecutarse (Robayo Salazar et al., 2021).

Los estudios previos respecto a la tecnología de cohetes pretenden caracterizar las variables que están involucradas en el funcionamiento de este tipo de motores, mediante la comparación de modelos matemáticos existentes y el comportamiento del motor cohete en cuestión.

Algunos desarrollos previos existentes como en Arboleda y Arrechea (2022), varios países latinoamericanos han profundizado el estudio de la coherencia con varios trabajos de grado y postgrado, en el Centro de Investigación de Tecnología Aeroespacial se diseñó un banco de pruebas estático, cuyos resultados fueron de gran ayuda para las F.A.C. Se logró determinar la fuerza necesaria para despegar un cohete modelo BEMCO.

En nuestro país hay escasos estudios acerca de prototipos de cohetes, por lo que, esta línea de investigación es importante desarrollarla y una obligación para las F.F.A.A. En los últimos años se ha realizado un trabajo similar en Chicaiza y Chiluisa (2020) enfocado principalmente en un cohete Candy con combustible sólido, donde se realizó un banco de pruebas que contiene instrumentación para detectar y modelar el comportamiento del cohete, este proceso de censado de datos se realizó principalmente como caso de estudio para la construcción del cohete a tamaño escala.

La adquisición de datos es esencial en el estudio de cohetes donde los sensores son protagonistas en el monitoreo de los parámetros, controlando y precautelando el comportamiento del motor. La electrónica presente permite monitorear y controlar el funcionamiento de las partes mecánicas tanto fijas como móviles, así como también sensar el desempeño y registro de las reacciones químicas de los elementos pirotécnicos involucrados intencionalmente manipulados. Apoyados en sistemas de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE), se realizará el procesamiento de señales y datos en tiempo real (Martin et al., 2011).

Los misiles SAM MANPADS son sistemas antiaéreos portátiles diseñados y fabricados en países con la suficiente tecnología y desarrollo técnico para generar sistemas de armas modernos, actualmente por necesidades de defensa han sido vendidos y se encuentran presentes en los arsenales de varios países alrededor del mundo. Durante el paso del tiempo se ha perfeccionado las funcionalidades del misil, logrando sistemas misilísticos con una variedad de sistemas de control, cuyos sensores principales son radares, sistemas infrarrojos y actualmente los más eficientes sistemas de apuntadores laser. El Ecuador en su arsenal cuenta

con varios tipos de misiles SAM, además del diseño de varios ejemplares entre ellos un misil teledirigido MH-3 con motor cohete clase E y motor BP ideal para objetivos programados (Jacome y Carrillo, 2012; Jurado Y Riquelme, 2019).

El objetivo de este estudio es la caracterización del comportamiento de las toberas de los cohetes, estas permiten la aceleración y expansión de los gases producidos por la combustión del combustible y como resultado ejerce un empuje que genera el desplazamiento del cohete. Con la finalidad de caracterizar el motor cohete del misil se debe implementar un sistema de adquisición de datos que logre capturar, medir, transmitir, capturar y registrar información en tiempo real del sistema de lanzamiento del cohete (Lacruz et al., 2015).

El objetivo de este trabajo es el de implementar un banco de pruebas básico, mediante el cual se pueda realizar comprobaciones del comportamiento de los motores cohete de los misiles, utilizando procesos comparativos con modelos teóricos establecidos previamente.

Justificación e Importancia

Para el estudio del misil superficie aire (SAM) y la comparación matemática establecida para las toberas se requiere analizar las variables físicas que actúan en los motores de empuje y vuelo del misil. Entre las principales variables se encuentran: la presión, la vibración y la temperatura que permitirán complementar los sistemas de diagnóstico y comprobación de sistemas de armas con motores cohete.

Este banco de pruebas propuesto e implementado será una herramienta imprescindible con la cual monitorear y comparar el comportamiento de la tobera, así como también obtener los insumos principales para poder determinar el estado físico químico de sus combustibles sólidos del motor cohete, esto ayudará también a levantar un estudio estadístico de la vigencia u obsolescencia del arma.

Para el desarrollo del proyecto se utilizarán los motores y combustibles del misil superficie aire (SAM), este misil posee dos motores, los cuales siguen una secuencia, al

encenderse el primer motor inicia un proceso que saca el misil de su contenedor, luego de la orden de disparo ejecutada por el misil, al salir completamente del contenedor el misil despliega sus aletas para la estabilidad y el control de vuelo, con un retardo de pocos milisegundos después del encendido del primer motor se activa el motor de vuelo, este permite que el misil viaje hacia su objetivo guiado por un sistema de enganche y seguimiento infrarrojo.

Las F.F.A.A. poseen en dotación estos misiles, y se cuenta únicamente con un sistema de diagnóstico de la electrónica del misil. Sin embargo, es necesario integrar un sistema de supervisión y análisis de variables físicas de los combustibles sólidos que utilizan estos motores, con el fin de completar la información necesaria del comportamiento de los mismos, es decir realizar la caracterización físico química del arma.

Por lo tanto, la construcción del banco de pruebas propuesto representa un aporte para la comprensión del funcionamiento y características en los motores cohete. Este dispositivo integra la electrónica necesaria, para poder sensar los parámetros requeridos y anteriormente mencionados.

El proyecto está enfocado en etapas de diseño, acondicionamiento, registro, monitoreo y análisis de datos en donde se utilizarán los módulos NI PXIe-8115 y PXIe-6361 que al no presentar una alta velocidad en temporización y sincronización es necesario integrar con otros dispositivos electrónicos que muestran exactitud y confiabilidad en la presentación de datos.

También, se realizará una integración hardware y el software necesario para controlar el proceso mediante una PC y finalmente se integrará con el software de Matlab para desarrollar una interfaz gráfica de usuario, mediante la cual presenta las variables bajo observación, permitiendo la supervisión y monitoreo desde el ordenador con el fin de ser comparados con un modelo matemático establecido para las toberas.

Alcance del proyecto

El alcance de este proyecto engloba un sistema de monitoreo y medición con el fin de implementar un prototipo de banco de pruebas genérico para el diagnóstico de los motores

cohete. El sistema de adquisición de datos en tiempo real, consta del diseño electrónico, diseño estructural y la implementación del software necesario para el funcionamiento del banco de pruebas y ejecutar el procesamiento utilizando CAE Matlab. Adicionalmente a ello, el análisis y la visualización del comportamiento de las variables que caracterizan el funcionamiento del sistema completo.

El proyecto consta de 4 fases que consisten en: 1. Diseño conceptual del banco de pruebas genérico. 2. Definición de la Instrumentación electrónica para medir las variables involucradas. 3. Prueba de concepto del banco de pruebas utilizando las toberas del misil. 4. Obtención del modelamiento matemático del comportamiento de este motor en particular, de acuerdo al análisis de las variables involucradas.

Para la adquisición de datos se implementará varios sensores, para presión un sistema en paralelo que capture la fuerza de empuje del motor cuando se dispare la tobera del cohete, para temperatura utilizaremos una termocupla instalada en un soporte que permita intercambiarla dependiendo del rango estimado de temperatura a ser medido, y finalmente se utilizará un acelerómetro con el fin de determinar las vibraciones en los ejes X, Y Z durante el accionamiento del motor del misil.

Todo el proceso de las pruebas, elaboración e instrumentación del sistema quedará registrado, desde el inicio del experimento hasta el final del mismo, lapso de tiempo que se realizará el monitoreo.

El modelamiento matemático de la tobera del motor se lo realizará mediante la investigación de modelos teóricos existentes. Su comportamiento se comparará con los resultados obtenidos a través del sistema de sensores antes descrito, esto permitirá establecer que el combustible sólido del cohete guarda sus características químicas originales que garanticen el normal comportamiento y vuelo del misil.

Como registro en tiempo real de la actividad se grabará en video, será parte importante al momento de observar el comportamiento del motor, el chorro de expulsión y en general todo

el proceso al quemar el combustible, además se registrará la ejecución de las pruebas como complemento de la bitácora de la investigación.

Finalmente utilizando métodos de identificación de sistemas se estimarán las funciones de transferencia que determinen el comportamiento de los motores del misil.

Las curvas de desempeño y resultados de cada experimento se mostrarán mediante una interfaz gráfica desarrollada en Matlab, las variables de presión, temperatura y vibraciones con respecto al tiempo serán graficadas y comparadas con las gráficas obtenidas con los modelos matemáticos existentes.

Adicionalmente, el proyecto entregará diagrama de flujos, planos eléctricos, programación de la interfaz gráfica, y la documentación correspondiente al desarrollo del proyecto en su totalidad. Para complementar, también se entregará una bitácora en video del proceso completo de la elaboración del banco de pruebas, adquisición de datos y funcionamiento del misil SAM tipo (Man Portable Air Defense Systems) MANPADS.

Objetivos

Objetivo general

Implementar un prototipo de banco de pruebas para el registro de presión, temperatura y vibración de los motores cohete de combustible sólido.

Objetivos específicos

- Describir el proceso de funcionamiento del motor de vuelo del misil SAM.
- Diseñar los circuitos electrónicos y acondicionar las señales de las variables de presión, temperatura y vibración para la integración y registro de información con software del DAQ.
- Diseñar una interfaz gráfica de usuario (GUI) en Matlab para registrar el comportamiento de las variables de presión, temperatura y vibración generadas por el misil SAM en tiempo real.

- Registrar filmaciones de las pruebas realizadas en el misil SAM por medio de una cámara de video digital para visualizar el comportamiento de los motores cohete.
- Comparar analíticamente los datos obtenidos por el prototipo de banco de pruebas con los modelos matemáticos existentes de las toberas del misil.
- Analizar y determinar las consecuencias e incidencias de los cambios de las variables físicas con los datos obtenidos experimentalmente.
- Documentar la interpretación de los datos adquiridos y determinar la relación entre el modelo matemático establecido para toberas

Trabajos relacionados

En el ámbito internacional se han evidenciado numerosos trabajos relacionados directamente con el estudio, implementación e innovación para la cohetería. Los estudios principales que siguen nuestra línea de investigación son los siguientes:

En el continente europeo, según Poli et al., (2015) ratifican la existencia de los objetos aeroespaciales desde los años treinta, el crecimiento exponencial hasta la actualidad. En esta ocasión el cohete de sondeo sustituye a los cohetes tradicionales debido al alto costo y largos procesos, se logró desarrollar con éxito el proyecto Nimbus con la proyección de la creación de un banco de pruebas cuyo objetivo principal es constituir un modelo escalable que soporte una altura máxima de 1000m. Asimismo, en Rusia gracias a Smirnov et al. (2014) se plasmó un modelo tridimensional mediante código Logo al trabajar con diferentes tipos de combustibles combinados puestos a funcionamiento dentro de una cámara de combustión. El estudio demuestra de manera eficaz que el DAQ con el código informático LOGO que utiliza una capacidad de procesado menor en la ejecución de un motor de cohete de hidrogeno.

Igualmente, en la línea aeroespacial de KISTLER (measure, innovate and analyze) en Reino Unido Grupo Kistler (2023) abordan un exigente control de los motores cohete durante el

lanzamiento, por lo que, el banco de pruebas que ellos manejan es de alto nivel, precisión y vanguardia. Dentro de los sistemas y accesorios que manejan un extenso catálogo de sensores que pretenden brindar una seguridad intrínseca, estabilidad a largo y corto plazo junto a un monitoreo dinámico de las variables involucradas en los motores al momento de realizar el empuje. De manera similar, se ha visto en Alemania gracias a Heufer, (2022) dentro del laboratorio experimental Shock Wave se está fabricando un banco de pruebas dentro de un contenedor para que pueda ser movilizado, el diseño que se utilizó fue un banco horizontal diseñado en Blender 3D y Solidworks para el modelado completo de las secciones utilizadas.

Ante la creciente necesidad de profundizar en el tema, varios países en Latinoamérica incursionaron en trabajos con la misma perspectiva. En la literatura científica existen publicaciones que nos permiten enfocar las principales tendencias, además de las fortalezas y debilidades que entregan a la comunidad científica.

En nuestro hermano país Colombia en la Universidad del Valle, donde se ha desarrollado con éxito un banco de pruebas para motores cohete tipo híbrido, donde se determinaron varios parámetros intrínsecos para el funcionamiento y modelamiento matemático. Además, como recomendación una interfaz gráfica para enfocarlo a el uso industrial, social y militar. Según Ceron (2017), es necesario seleccionar elementos comerciales para dimensionar la estructura y distintas funcionalidades del banco de pruebas. En concordancia, con el diseño de banco de pruebas cohete en Ordoñez (2010) nos sugiere de 10 directrices para diseñar un correcto banco de pruebas, se registraron datos previos y después de las pruebas pertinentes se lograron obtener dos curvas de comportamiento en correlación con la presión y el empuje respectivamente. La seguridad se convierte en una prioridad absoluta debido a que las pruebas son en estado pasivo, por lo que, si desean una portabilidad es necesario tener en cuenta parámetros pre y post encendido. Se logró concluir con éxito la versatilidad de los BEMCO para diferentes cargas y proyectiles, sugiriendo la posible creación

de un centro de estudio especializado con ayuda de un organismo privado para el estudio de la coherencia a mayor escala.

En el estudio de la Universidad Simón Bolívar profundizaron el diseño conceptual de los motores cohete como alternativa a una dificultad ambiental, donde se logró determinar un tipo especial de combustible a base de azúcar y nitrato de potasio. Además, dado a la baja temperatura presentada se determinó que un óptimo y económico material puede ser el aluminio. Otro inciso importante son las recomendaciones presentadas por Brito (2011) que manifiesta la elaboración de un banco de pruebas estáticos para ensayos donde se analizara previamente la estructura del cohete.

A la par en la Universidad Industrial de Santander gracias a Robayo et al. (2021), usando un SRM (Diseño de Motor de Cohete Sólido) de un cohete Candy y una tobera tipo Laval Convergente – Divergente lograron determinar los parámetros para escalarlos a una versión útil para la coherencia colombiana. El trabajo realizado en esta investigación valida la teoría de la línea de investigación enfocada en el modelamiento de cohetes con combustible sólido siguiendo la metodología SRM.

A nivel nacional, según el trabajo para maestría titulado “Análisis Numérico del comportamiento de flujo de una tobera cónica experimental” según Tolentino et al. (2020) se logró analizar el comportamiento interno de la tobera de 10 mm después de analizar cinco casos de estudios se concluyó con éxito varios puntos. Las fluctuaciones dentro de la tobera son directamente proporcionales a la intensidad hasta la longitud de 1mm, es decir, para esa región la prolongación mencionada perturba el régimen de flujo.

Finalmente, en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en Chicaiza y Ramírez (2020) se analizó el comportamiento de los motores cohete mediante la construcción de un banco de ensayos que está anclado al concreto, para la sección electrónica se utilizó un transductor de presión y para la variable de temperatura se utilizaron varios termopares tipo K. Al mismo tiempo, el enlace de la etapa instrumental con el Ordenador se lo realizó con un

microcontrolador ATXMEGA, aunque se intentó obtener dichos parámetros mediante un PLC. Se enfoca en el estudio del tamaño de las toberas, la reacción del combustible sólido y una mayor profundización de las DAQs para reducir el tiempo de ensayo.

Capítulo II

Marco teórico

Misil SAM

Debido a la ubicación geográfica que tiene el Ecuador durante la historia ha tenido varios momentos de tensión con países como Colombia por grupos guerrilleros en ubicaciones fronterizas y con Perú por disputa territorial y desacuerdos políticos. Es por eso, que tiene un elevado gasto en comparación al resto de Latinoamérica. Por lo cual históricamente fue necesario la adquisición de artillería antiaérea, teniendo un primer vistazo de los misiles SAM en 1990 y siendo un factor clave en 1995 en el enfrentamiento del Cenepa.

Definición

La definición por manual de un misil SAM, es un moderno dispositivo portátil de defensa antiaérea con el objetivo de derribar aeronaves de ala rotativa y fija, el principio fundamental de funcionamiento es “lanzar y olvidar”, es decir, que el misilero cumple actividades de observación, detección, enganche y disparo, lo que le permite después de disparar el misil, protegerse del fuego enemigo. Las características elementales de los SAM son las siguientes (Martins, 2017):

- Para disparar el misil el artillero debe estar en posición de pie o de rodillas, el misil debe ser apoyado en el hombro de tal manera que la mira mecánica quede en posición para el seguimiento manual del objetivo.
- El lugar de disparo puede variar como vehículos a una velocidad menor a 20 Km/h, en ferrocarriles adaptados menores a 45 km/h, embarcaciones inclusive también en trincheras.
- Cuenta con un área de destrucción de aeronaves u objetivos aéreos alrededor de 10-3550 m de altura y un rango aproximado de 500 -7000m.
- La velocidad al alcanzar el objetivo al momento de colisión es de hasta 410 m/s.

Banco de pruebas para motores cohete

Se puede definir al Banco de Pruebas de motores cohetes como una estructura adecuada con subsistemas mecánicos y electrónicos con la función principal de caracterizar el comportamiento de los motores cohete y que permite la recopilación de datos con el fin de reproducir curvas de comportamiento como principal insumo de análisis.

Constitución física de los bancos de pruebas

Los elementos principales para un banco de pruebas de motores cohete son los siguientes:

- **Base de Soporte:** Estructura de montaje de metal u otro material donde se colocará la estructura electrónica y mecanismos varios.
- **Sistemas Electrónicos:** Instrumentación y Sensores.
- **Sistemas Mecánicos:** Ejes, rodamientos.
- **Lugar Físico:** Lugar abierto o lugar amplio controlado.

Clasificación de los bancos de prueba para motores cohete

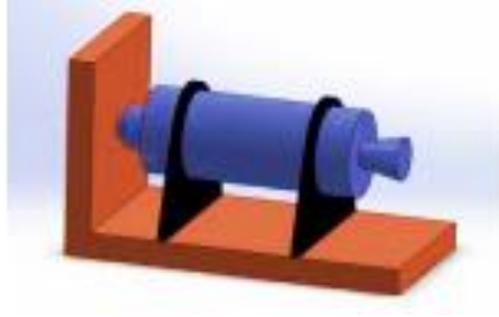
La clasificación de los bancos de prueba puede ser por la ubicación o a su vez por el tipo de combustible

Clasificación por ubicación del motor

Horizontal: La base de soporte debe de estar paralela al plano de lanzamiento, para resistir la fuerza de empuje que ejerce el motor como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Modelo de banco de pruebas horizontal prototipo



Nota. Posición horizontal de un banco genérico de pruebas con tobera. Fuente: Chicaiza León y Ramírez Chiluisa (2020).

Vertical Tobera Superior: Se constituye de un apoyo vertical, como resultado del accionamiento del motor cohete el impulso absorberá el suelo, como se muestra en la figura 2.

Figura 2

Modelo de banco de pruebas vertical

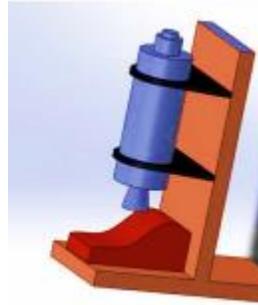


Nota. Posición vertical con tobera superior de un banco genérico de pruebas. Fuente: Chicaiza León y Ramírez Chiluisa (2020).

Vertical Tobera Inferior: Igualmente se compone de un apoyo vertical, adicional un estribo que evitara la expulsión del cohete, como se muestra en la figura 3.

Figura 3

Modelo de banco de pruebas vertical con tobera inferior



Nota. Posición vertical con tobera inferior de un banco genérico de pruebas. Fuente: Chicaiza León y Ramírez Chiluisa (2020).

Clasificación por tipo de propelente

Sólido: Su característica principal es que el propelente se encuentra en estado sólido, cuya relación es directamente proporcional al empuje con la combustión del propelente. Posee un riesgo considerablemente menor que su contraparte líquida, sin embargo, no se puede detener una vez iniciado. Dentro de los propelentes sólidos más utilizados se encuentran:

- **Propelente de alta energía:** Combinación híbrida de APCP, donde se formarán cristales pequeños HMX. Es de poco uso debido a que existe una gran probabilidad que pueda explotar.
- **Propelentes Compuestos:** Combinación entre metal en polvo y un oxidante que usan como unión un tipo de goma. Fabricación fácil con un rendimiento promedio medio su principal utilidad es en el campo experimental militar de la cohetaría.
- **Propelente de Doble Base:** Combinación de dos monopropelentes sólidos pero independientes en sus funciones. Algunos ejemplares son CDB o EDB/JDN.
- **Candy:** Combinación térmica de un oxidante y un combustible que en este caso en específico es un azúcar sucrosa o dextrosa. Uso principal para amateurs, dificultad de encendido y alto riesgo de explosión.

- **Micrograno:** Combinación de pólvoras compactadas de azufre y zinc, debido a su corto tiempo de operación posee una aceleración considerablemente alta. Uso en cohetería experimental debido a que puede ser inestable.
- **Pólvora:** Costo bajo poco eficientes se recomienda solamente para motores de poca potencia y bajo circunstancias controladas.

Modelamiento de misil SAM

Toberas

Las toberas dentro de los motores cohete es una de las partes fundamentales, hay que tomar en consideración la zona divergente, características operativas y distintas dimensiones. Los factores que afectan al diseño o construcción de una tobera son la presión, temperatura, velocidad del aire, las iteraciones y la altitud de operación (Cases Sanchez, 2014).

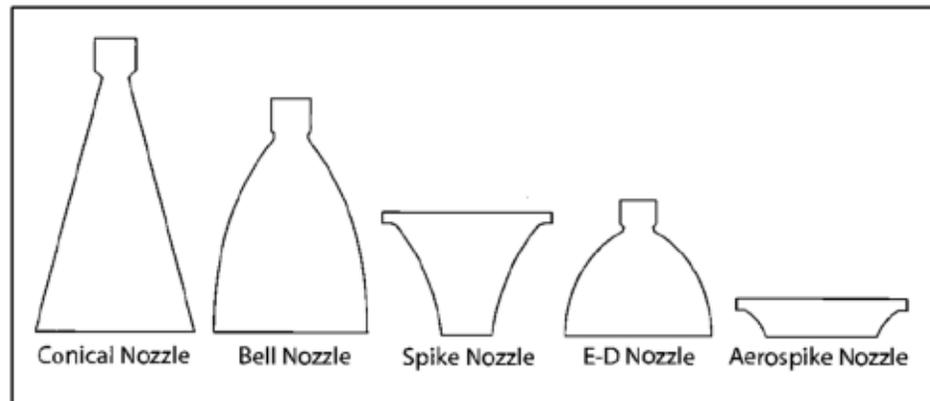
La función transcendental dentro de los motores cohete es que durante la combustión interna en la cámara se debe transformar la energía química y térmica a energía cinética con el propósito objetivo de alcanzar la velocidad necesaria. La forma de la tobera es esencial para alcanzar mayor presión dentro de la cámara y por lo tanto alcanzara mayor velocidad, para un óptimo diseño es necesario tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Tamaño de la Tobera ya que ocupa gran porcentaje del motor.
- Complejidad de diseño y elaboración en cuestión económica.
- Material adecuado para elaborar la tobera permitirá que el combustible elegido pueda quemarse para producir la cantidad de flujo máxima.
- Mantener la dirección de salida unidireccional.
- Escoger adecuadamente la forma geométrica adecuada para la combustión interna.
- El flujo de aire debe ser enviado con rapidez para superar la presión atmosférica.

Existen varias clasificaciones para las toberas dentro de las cuales la geométrica es la primordial, como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Formas geométricas de las toberas en general



Nota. Conos de divergencia para varios tipos de toberas de acuerdo a su forma geométrica.

Fuente: Cappa y Salazar (2019)

Tobera Cónica: La boquilla es la más usada y es de fácil manufactura se usa normalmente para propulsores de pequeños tamaños, su rendimiento en relación al peso y longitud es aceptable gracias al semiángulo de 15° .

Toberas contorneadas: Son basadas en las toberas cónicas, los beneficios al usarlas es una eficiencia más alta debido a que la superficie de fricción es mucho más vasta.

Sección Convergente: Es una porción de la tobera donde no afecta mucho al flujo interno sirve como nexo entre la cámara de combustión y el resto de la tobera.

Garganta: Región de transición de la velocidad de flujo a supersónica. Es determinante para las propiedades de flujo de los gases lanzados.

Sección Divergente: Región de incremento de la aceleración, parte crítica del diseño conceptual, expulsar la presión y gases.

Las toberas de los motores cohete se proyectan a ser isentrópicas, es decir, el flujo solo sea afectado por el área transversal de la misma. Las ecuaciones que gobiernan el sistema mecánico de la sección es la siguiente:

$$\frac{(1 - N_m^2)dv}{v} = -\frac{dA}{A}$$

Donde N_m^2 es el número de Mach, además junto a los momentums, la velocidad y el área transversal mantienen una correspondencia del fluido.

Una de las variables a considerar en el empuje, donde analizando el diagrama de cuerpo libre tenemos que la sumatoria del impulso $m * v_e$ y el empuje de presión $A_T = (P_e - p_o)$ nos da la fuerza total, dependiendo del tipo de tobera se obtendrá un empuje variado. Este fenómeno de la transformación de la energía está caracterizado por la siguiente ecuación:

$$F_{Total} = m * V_e + A_e(p_e - p_o)$$

La garganta de la tobera se representa a partir de la ley universal de gases, donde se tiene las ecuaciones de la presión y de la temperatura de la tobera, asumiendo que la constante de calor específico es de 1,221.

$$p_{gt} = p_c \left(1 + \frac{k-1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$T_{gt} = \frac{T_c}{\left(1 + \frac{k-1}{2}\right)}$$

Combustible

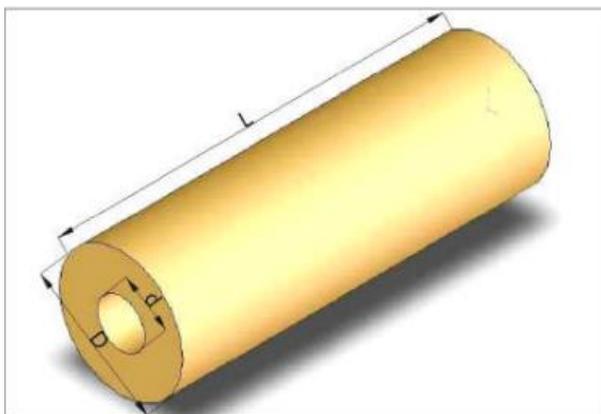
Para el funcionamiento de los motores cohete es necesario un iniciador de combustión que puede ser líquido o sólido, donde un elemento alimentado a 14 V da la señal de inmisión.

El combustible sólido en su mayor parte está compuesto de Nitrato de Potasio (KNO_3), en un comienzo se debe pulverizar los elementos, mediante un proceso químico se coloca una composición a 190 °C hasta fundir la Sacarosa se derramara en moldes de acuerdo a cilindros recubiertos de aislantes que cubra el grano (Lacruz et al., 2015).

El grano de combustible se lo denomina compuesto propelente el cual depende el rendimiento del cohete, en la figura 5 se aprecia la forma más común un cilindro hueco.

Figura 5

Propelente sólido para motores cohete



Nota. Representación del diámetro interno, externo y longitud del propelente sólido. Fuente: Sutton y Chichester (1992)

Clasificación de sistema de propulsión cohete

Las reacciones químicas pueden ser una de las grandes clasificaciones para los cohetes entre ellas también se encuentran por energía usada, combustible, función o vehículo. Casi todos los sistemas tienen el mismo principio, pero los motores cohetes químicos pueden ser líquidos, sólidos o híbridos.

Motores Cohete Líquido: El oxidante y el combustible son puramente líquidos suministrados desde el tanque hasta la cámara de combustión. La alimentación a la cámara puede ser por una hidrobomba o un sistema de presión de gas. La ventaja de este combustible es que se puede controlar la cantidad a suministrar además de reutilizar el mismo combustible manteniéndolo refrigerado (Redondo Calle, 2009).

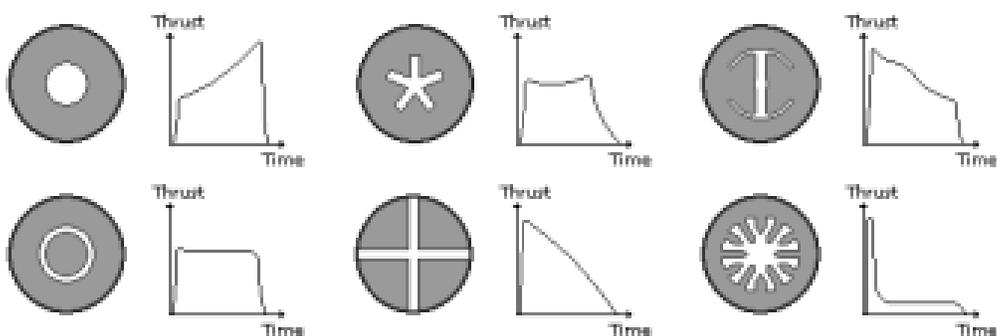
Motores Cohete Sólido: El bloque o grano tiene todos los elementos necesarios para ser quemados, desde la parte interna y de manera progresiva hasta consumir todo el bloque.

En este formato no es necesario un sistema de alimentación ya que el combustible ya se encuentra dentro de la cámara (Vega Moreno y Leyton Moreno, 2016).

La cavidad interna del gramo de combustible determinara la variación del empuje, si aumenta o disminuye nos entregara una respuesta en función del tiempo, como en la figura 6 que representa la función de respuesta a distintos tipos de relleno.

Figura 6

Curvas de reacción en función del relleno de la tobera



Nota. Comportamiento de la tobera a través del tiempo según el relleno de la tobera. Brown et al. (2016)

Partes de un misil SAM

Las partes esenciales que conforman un misil SAM son similares al resto motores cohetes sólidos, señalados en la figura 7.

Figura 7

Elementos de un motor cohete solido



Nota. Elementos capturados del misil SAM en el fuerte militar “El pintado” ubicado en el sur de Quito.

- Tobera
- Cámara De Combustión
- Combustible Solido
- Tapón Ignitor.

Consideraciones de disparo

Si tomamos una percepción ideal ciertos parámetros ayudaran a la simplificación e idealización del diseño del motor cohete, pero en términos reales existen varias perdidas de energía junto a escape de gases incluso hay que tomar en cuenta el desgaste del material, los posibles escenarios serán detallados a continuación (Cases Sanchez, 2014).

- Según la tobera si usamos una cónica causara pérdidas a comparación de una tobera campana parabólica.

- Una pérdida de presión se deberá a que la cámara de combustión es pequeña.
- La velocidad de escape del gas disminuirá debido a fricción en los bordes superior e inferior de la tobera.
- Existe la posibilidad de reacciones químicas extras en el flujo que atraviesa la tobera provocando pérdidas del 0.4%.
- La presión en la cámara de combustión puede disminuir notoriamente por la erosión de los materiales compuestos del combustible.

Sensores

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar y transformar magnitudes físicas o químicas en magnitudes eléctricas (Cruz Herrera, 2019).

Presión

Los sensores de presión miden la fuerza ejercida de un líquido o gas dentro de un área determinada (Cruz Herrera, 2019).

Los sensores de presión pueden ser:

- **Mecánicos.**
 - **Directos:** Barómetros, Manómetros de tubo inclinado.
 - **Elásticos:** Tubos Bourdon, fuelles, diafragmas.
- **Electromecánicos.**
 - **Resistivos:** Varía su resistencia de acuerdo a la presión aplicada.
Puente de Wheastone.
 - **Capacitivos:** Varía la capacidad de su condensador de acuerdo a la presión aplicada.
 - **Piezoeléctricos:** Al ser sometido a una presión varía su carga eléctrica.

De acuerdo con Nakka (2016), la presión en la cámara de combustión del motor cohete es de vital importancia para el diseño, operación y predicción de funcionamiento del motor

cohete. La presión generada influye en la eficiencia termodinámica, el empuje, la carga estructural de las paredes del motor y actúan directamente sobre la tobera en el escape de gases de la combustión realizada.

Temperatura

Los sensores de temperatura miden la energía térmica de los cuerpos, es decir el nivel de calor o frío de un objeto o del ambiente y devuelven una señal eléctrica.

Los sensores de temperatura más comunes son:

- **Sensor de Circuito Integrado CI:** Son chips con base en semiconductores constituidos por pines que miden la temperatura a través de una señal lineal y proporcional (Cruz Herrera, 2019).
- **Termocuplas:** Las termocuplas poseen dos alambres de diferente material que al aplicar temperatura en esta unión generan una diferencia de voltaje en el orden de los milivoltios. Las termocuplas más utilizadas son el tipo j y tipo K que varían por su tolerancia, desviación y rango (Acevedo & Morales, 2019).
- **RTD (Detector de resistencia metálica):** Es un sensor de temperatura resistivo que varía de acuerdo a la temperatura aplicada, la resistencia más común utilizada es la de platino (Pt) (Sánchez Pozo, 2015).
- **Termistor:** Un termistor es un semiconductor constituido por óxidos metálicos con un coeficiente de temperatura de resistencia positivo o negativo, coeficiente de temperatura positivo (PTC) y coeficiente de temperatura negativo (NTC) (Sánchez Pozo, 2015).

Aceleración

Un sensor de aceleración nos muestra las vibraciones máximas y mínimas producidas por pequeños movimientos o por factores como la gravedad, encendidos de equipos y/o ráfagas de viento, dentro del análisis de aceleración este dispositivo nos ayudará a realizar

ajustes de movimiento y aumentar la seguridad en pruebas. Las vibraciones pueden ser vistas tanto como en el eje X, Y Z (Moreno Roig, 2011).

Para medir vibraciones existen diferentes sensores tales como:

- **Acelerómetro:** Convierte una señal vibratoria en una señal eléctrica de alta o baja impedancia.
- **Extensómetro:** La fuerza a la cual está aplicada varía el valor de su resistencia.
- **Sensor capacitivo o sensor de corriente de Foucault:** Genera una pequeña corriente de acuerdo a la interacción de campos del dispositivo a medir y el sensor.

Desde el punto de vista de Arrechéa Rivas y Arboleda Cárdenas, (2022) las respuestas vibratorias producidas por la aceleración vienen influenciadas por el peso y la combustión realizada por el cohete, existiendo variación con el pasar del tiempo. Por lo cual establecen que las vibraciones en general son más relevantes en cohetes grandes en comparación con cohetes pequeños debido a la robustez del mismo.

Categorías fundamentales

Adquisición de datos

Un sistema de adquisición de datos son los diferentes procesos necesarios para adquirir información de varios parámetros, estos valores serán medidos en función del tiempo con el objetivo de obtener un análisis de un sistema específico (Arenas Andrade, 2019).

Un sistema de adquisición de datos está constituido por:

- Sensores.
- Circuitos de acondicionamiento de señal.
- Tarjeta de adquisición.
- Software.
- Equipo de visualización y almacenamiento de datos.

El proceso de adquisición de datos realizar la conversión de señales físicas a señales eléctricas, adaptan la señal eléctrica para la lectura digital y por medio del software y el computador almacenar y visualizar los datos obtenidos de los parámetros.

Los sistemas de adquisición de datos que se utilizará en este proyecto son referentes a medida de presión, temperatura y aceleración.

Acondicionamiento de señales

El acondicionamiento de señales consiste en adaptar la señal obtenida por el sensor para que sea aceptable para el registro y procesamiento en una tarjeta de adquisición de datos (Pullaguari & Yascaribay , 2013).

Un circuito de acondicionamiento de señal tiene varias funciones entre las principales están la amplificación para elevar el nivel del voltaje y ser detectada por la tarjeta de adquisición de datos, el filtrado para eliminar o reducir ruido en las señales, la excitación para proporcionar voltajes o corrientes a diferentes sensores y la linealización, para sensores que no tienen una variación lineal con la magnitud física. Cada uno los circuitos de acondicionamiento dependen según el tipo de sensores que se utilizan (Cuzme Criollo, 2010).

En el presente proyecto se acondicionarán las señales de:

- Presión.
- Temperatura.
- Aceleración.

Análisis de datos

La realización de pruebas del motor cohete nos ayuda a obtener información de la variación de sus parámetros referente al tiempo.

Todos los datos obtenidos permitirán generar interfaces gráficas para visualizar el comportamiento de variables, así como también realizar el monitoreo y supervisión a fin de realizar un análisis con respecto a un modelo matemático establecido.

De los datos obtenidos se registrarán las curvas de:

- Presión vs. Tiempo.
- Temperatura vs. Tiempo.
- Aceleración vs. Tiempo.

Registro de video

El registro de video consiste en la grabación y obtención de imágenes por medio de una cámara de video digital como se muestra en la figura 8, su utilización proporciona una visualización detallada del proceso, información del comportamiento y características del sistema que pasan desapercibidamente del ojo humano en los ensayos de funcionamiento. La importancia de realizar filmaciones contribuye en registrar todos los eventos, elaborar un análisis detallado del proceso y de ser necesario realizar correcciones para pruebas de funcionamiento posteriores.

Figura 8

Cámara Web Genérica



Nota. Representación de una cámara con resolución de 1080 MP.

Teniendo en cuenta el trabajo realizado por Graciano Pérez (2016), donde describe que un análisis de imágenes grabadas de un evento de pruebas de combustión de un motor cohete determina comportamientos de la superficie, dinámicas de la llama, acumulación de residuos, puntos calientes y movimientos inestables.

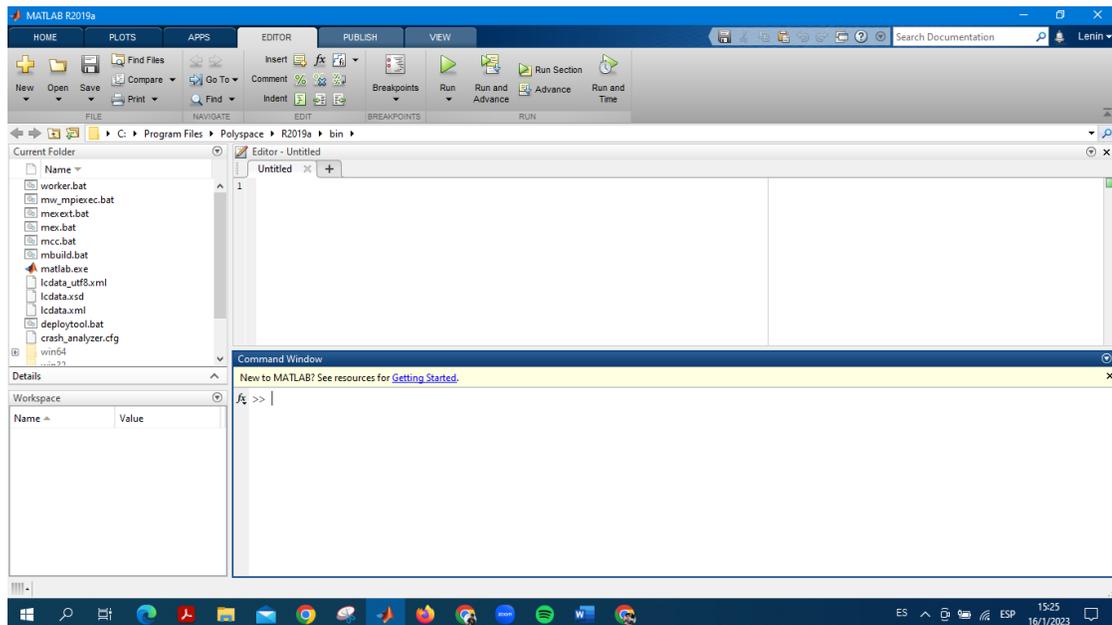
Software

Matlab

Matlab es un software matricial con un entorno de programación moderna y lenguaje de alto rendimiento, posee estructuras de datos adecuados, incluye herramientas integradas de edición y depuración además de soporte para programación orientada a objetos. Matlab posee varias características principales tales como la obtención de curvas de respuesta en tiempo o en frecuencia, realización de cálculos, procesamiento de señales, diseño y análisis de sistemas de control como se muestra en la figura 9. Cuenta con un entorno de Interfaz Gráfica al Usuario (GUI) que permite el diseño, modificación y ejecución de aplicaciones personalizables, simultáneamente genera el código de la interfaz de manera automática (Houcque , 2005).

Figura 9

Pantalla de trabajo en Matlab



Nota. Pantalla de trabajo de Matlab R2019a 64 bits.

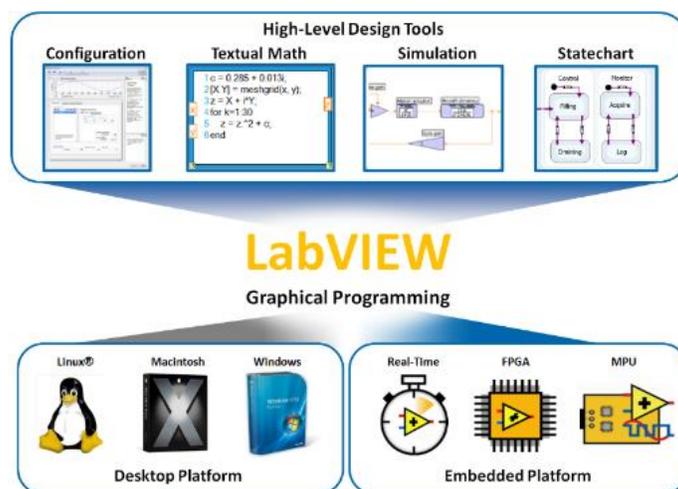
LabVIEW

Técnicamente, es un lenguaje de programación gráfica cuya propiedad intelectual le pertenece a National Instruments, su público objetivo son ingenieros y científicos donde podrán ser aplicados en diferentes campos profesionales como Electrónica, Mecatrónica, Fluidos, Químicos Etc.

La versatilidad que ofrece este software es esencial ya que es compatible con las tarjetas que usaremos en el presente proyecto, las librerías que usaremos nos facilitan la programación gráfica. Para la adquisición de datos los drivers ya se encuentran instalados en nuestra DAQ y los bloques de programación habilitados para poder crear interfaces. Además, con el asistente de creación de bloques podemos ajustar los parámetros que necesitemos. En términos generales LabVIEW se sigue actualizando permitiendo desde crear una interfaz sencilla hasta un servidor de instrumentos virtuales (Kodosky, 2020).

Figura 10

LabVIEW como lenguaje de programación



Nota. Distintos modelos de programación para LabVIEW y sus distintas funcionalidades.

Capítulo III

Diseño del sistema

En el presente capítulo se centra en el proceso de diseño del banco de pruebas del motor cohete. Se detallarán los diagramas de circuitos electrónicos de acondicionamiento de cada uno de los dispositivos, la instalación de los mismos en el banco de pruebas y el proceso de diseño de la interfaz gráfica, así como los dispositivos a implementar y los parámetros utilizados para su selección.

Para desarrollar nuestro banco de pruebas de motor cohete, examinamos los bancos de pruebas existentes y realizamos las modificaciones necesarias que se adapten a nuestras características. El banco de pruebas es estacionario y está equipado con dispositivos tecnológicos de medida, en los cuales se analizaron los rangos de operación y el tipo de sensor a utilizar.

El banco de pruebas estará equipado con soportes para medir la aceleración del cohete, un sistema para medir la presión, un sistema de medición de temperatura que medirá el calor y el enfriamiento del motor durante el despegue, y un sistema de video para registrar mediante grabación los eventos que ocurren durante las pruebas, todos estos sistemas están equipados e integrados correctamente con sus circuitos electrónicos que permiten conectar con nuestro equipo NI PXIe-8115 a una computadora o computadora portátil mediante el software LabVIEW, no obstante el software Matlab se utiliza para visualizar los datos registrados del funcionamiento del banco de pruebas.

Selección de Dispositivos

Presión

Se selecciona el transmisor de presión PT200PSIG-1014-I2-H1143 con salida de corriente tal como se muestra en la figura 11, nuestro sistema de presión es neumático por lo cual este dispositivo integra una celda cerámica de medición que proporciona durabilidad, estabilidad y resistencia a la corrosión, parámetros necesarios para el banco de pruebas que se

acopla a nuestras especificaciones. El cohete alcanza presiones estimadas no mayores a 10 bares. Este transductor posee una alta precisión en su medida. A continuación, se indican algunas características técnicas de nuestro sensor de presión Modelo PT200PSIG como se muestra en la figura 11: (Turck, s.f.).

- Rango de Medida de Presión: 0 ... 13.79 bar.
- Presión Máxima: ≤ 48 bar.
- Temperatura de Trabajo: $-40^{\circ}\text{C} \dots +125^{\circ}\text{C}$.
- Precisión @ 25°C : $< \% \pm 0,5$ FS.
- Tiempo de reacción: < 2 ms, tip. 1 ms.
- Señal de Salida: 4...20 mA

Figura 11

Transmisor de presión PT200PSIG



Nota. Transductor de presión instalado en el BEMCO

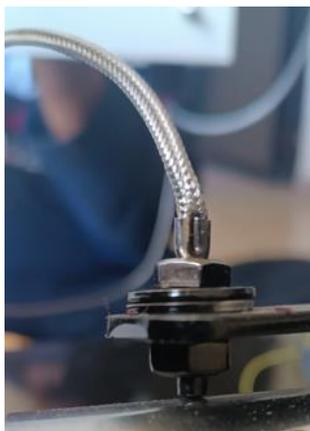
Temperatura

Se selecciona un sensor de temperatura para obtener la cantidad de calor generada por el motor cohete durante el despegue y enviar esta información a nuestro controlador y registrar estos datos. El sensor que se va a utilizar es una termocupla tipo K en forma de tuerca como se aprecia en la figura 12, la cual posee las siguientes características (Tei, s.f.):

- Rango de Temperatura: -200° hasta 1370°C.
- Composición: Cromo y aluminio-Níquel.
- Límite de Error: 2.2° o 0.75°C.
- Salida: Diferencial en mV.

Figura 12

Termocupla tipo k



Nota. Termocupla tipo K instalada en la tobera para medir la presión exterior ajustada con una tuerca de presión.

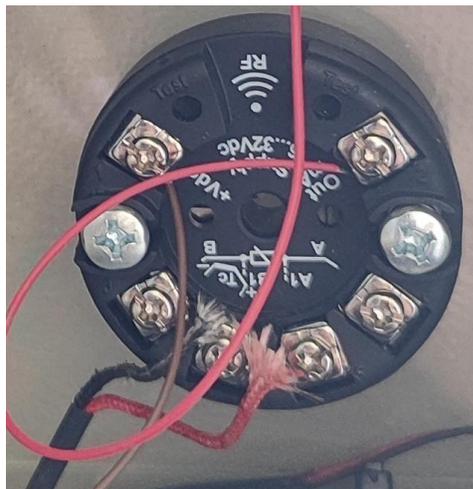
Al hacer uso de una termocupla tipo K la misma genera una señal de voltaje a su cambio de temperatura, el sensor no puede ir posicionado directamente en la llama de prueba cuando despegue el motor cohete, por lo mismo se realiza el uso de un convertidor TC-RTD interconectado con la termocupla para obtener una resistencia de temperatura que variará su resistencia eléctrica en función de la temperatura y así poder registrar los datos en unidad de

voltaje. El convertidor TC-RTD (ver Figura 13) lleva a cabo la conversión a través de un circuito electrónico que recibe la señal de voltaje de la termocupla y la procesa para producir una señal de resistencia que corresponde a la temperatura que se ha medido. Esto permite que el sistema basado en RTD interprete y utilice la señal de la termocupla sin cambiar el sistema actual. Dicho dispositivo posee las siguientes características (Pixsys, s.f.):

- Termocupla compatible: PT100, Ni100, TC K, TC S, TC R, TC J, TC T, TC N, TC B, TC E.
- Rango de medición de Temperatura para TC K: -260. +1360°C
- Tiempo de muestreo: 300 ms / 600 ms
- Resolución de salida: 1 μ A
- Salida de Señal: seleccionable entre 21,5 mA o 3.8 mA.
- Alimentación: 6 - 32 Vdc

Figura 13

Pastillas acondicionamiento de señal Pixyxs



Nota. Pastilla pixyxs para linealizar la salida de temperatura desde la termocupla tipo K.

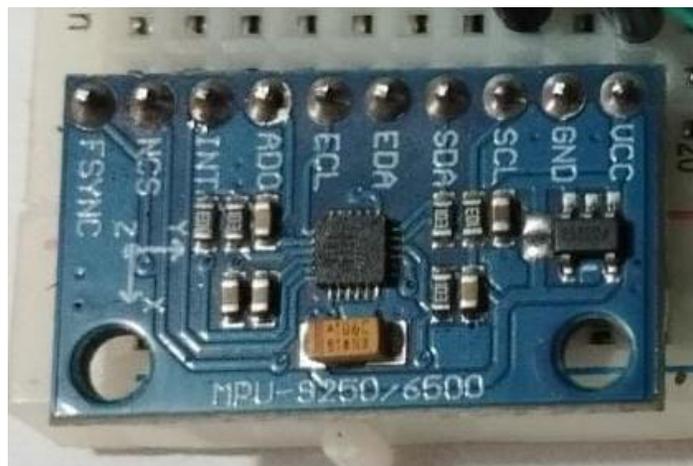
Vibración

Para condiciones de diseño, se selecciona un sensor de aceleración utilizando el módulo MPU-9250 que combina un magnetómetro, un giroscopio y un acelerómetro de tres ejes en un solo chip como se observa en la figura 14. El sensor proporciona datos precisos de movimiento, orientación y campos magnéticos, las características del acelerómetro son las siguientes (InvenSense, 2014):

- Rango de medición: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$.
- Sensibilidad: ajustable.
- Resolución: 16 bits.
- Protocolo de comunicación: I2C.
- Velocidad de transmisión: 400 kHz.
- Frecuencia de muestreo: 8 Hz.

Figura 14

MPU9250 módulo de acelerómetro



Nota. Modulo instalado en la brida secundaria para detectar las vibraciones del BEMCO en los tres ejes coordenados.

El módulo MPU9250 en combinación con el microcontrolador ESP32 realizan la comunicación I2C para el envío de datos por el puerto serial de nuestra computadora, facilitando la integración de nuestro del dispositivo de vibración al sistema de banco de pruebas.

Los elementos de control para el presente proyecto son lo más importante, debido a que son los que permitirán cumplir los objetivos planteados, para integrarlos previamente se desarrolló el análisis de cantidad de elementos y el dimensionamiento, cabe destacar que después del dimensionamiento se solicitó en la empresa auspiciante, la cual, de acuerdo a la disponibilidad y stock entregó los diferentes elementos.

Video

En la actualidad existen gran variedad de equipos de grabación para el registro de eventos, cámaras de todo tipo como las de Red fijas Domo, PTZ o de visión nocturna que se clasifican de acuerdo a su función, incluso las cámaras del celular proporcionan facilidad económica y tecnológica de proporcionar cámara fotográfica, cámara de video cuyas características dependerán de la marca del mismo. Por condiciones de diseño y economía del proyecto se establece sólo la grabación y reproducción de las pruebas realizadas en puntos de vistas específicos para analizar los eventos de prueba, los mismo que se harán con los cámaras de celular y se ejecutarán las grabaciones desde el software de Matlab.

NI PXIe-8115

El centro de investigación de aplicaciones militares – CICTE en su facultad de brindarnos apoyo para la realización del proyecto nos facilita el equipo NI PXIe-8115 fabricado por National Instruments (NI) es un controlador tipo PXIe (PXI Express) utilizada en la automatización de aplicaciones industriales para pruebas y mediciones en laboratorios.

El controlador mostrado en la figura 15, está alojado dentro de un chasis compatible con PXI Express lo que produce una computadora compacta de alta velocidad y de alto rendimiento

debido a sus especificaciones técnicas como un procesador Intel Core I5-2510 de doble núcleo, 2 GB de RAM, un disco duro de 250 GB y un almacenamiento flash integrado de 8 GB (Apex Waves, National Instruments PXIe-8115 Controller, s.f.).

Figura 15

Controlador NI PXIe-8115



Nota. Modulo perteneciente al CICTE que usaremos para adquirir datos mediante el cable de datos.

La tarjeta incluye una gama de puertos de entrada y salida, dos puertos de video DisplayPort para conectar la computadora a un monitor, un puerto serie RS-232 para intercambiar datos con otros dispositivos electrónicos, dos puertos ethernet, un puerto de comunicación paralelo, un conector Trigger de activación PXI para conexión de disparo controlado por software, seis puertos USB de alta velocidad, un conector GPIB para conectar dispositivos electrónicos y una ranura de expansión ExpressCard/34. (National Instruments, 2011).

NI PXIe-8115 tiene compatibilidad con el software NI LabVIEW, lo que facilita la integración con otros sistemas y dispositivos de adquisición de datos de National Instruments. También es compatible con otros lenguajes de programación como C, Python y MATLAB, lo que lo hace muy versátil para una variedad de aplicaciones.

NI PXIe-6361

Dentro del chasis de nuestro controlador también nos integra el módulo NI PXIe-6361 tal como se ve en la figura 16 que es un dispositivo de adquisición de datos multifunción (DAQ) utilizada para medir señales analógicas de entrada, como voltajes, corrientes y temperaturas, cumplen con la función de medir estas señales y transformarla en datos digitales que pueden ser procesados y analizados por una computadora.

Figura 16

Módulo DAQ NI PXIe-6361



Nota. El slot perteneciente al DAQ de señales pertenece al código NI PXIe-6361 instalado.

El módulo cuenta con un único conector HD68 con 68 pines el cual proporciona 16 canales de entrada analógica de un solo extremo, 8 canales de entrada analógica diferencial, 2 canales de salida analógica, 24 canales de entrada y salida digital. La tarjeta tiene una resolución de 16 bits y una tasa de muestreo de 2 MS/s (Apex Waves, National Instruments PXIe-6361 PXI Multifunction I/O Module, s.f.).

Debido a su alta velocidad de visualización y capacidad para procesar múltiples canales simultáneamente, el NI PXIe-6361 es generalmente una excelente opción como herramienta de adquisición de datos. Se puede adaptar a una amplia gama de aplicaciones que requieren una adquisición precisa de datos en tiempo real, y su compatibilidad con LabVIEW hace que sea fácil de incorporar en muchos sistemas de control y adquisición de datos de control y adquisición.

Diseño electrónico

Presión

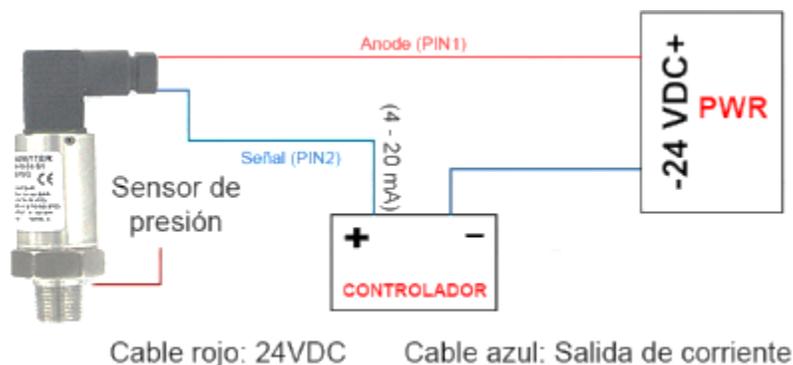
Para el sistema neumático del BEMCO se estudiaron varios transductores de presión y se indagó la posibilidad de usar un módulo integrado de presión barométrica con su transmisor integrado, esa opción quedó descartada debido al rango y el sistema que se aplicó era necesario un sensor más robusto. Se implementó una válvula para que la presión de aire se normalice dentro del embolo.

Para la conexión del sensor fue necesario un convertor de corriente de 4 a 20 mA a Voltaje entre los valores 0 a 5 V, se enviará a la DAQ para procesamiento de datos. Se necesita linealizar y calibrar los rangos máximos y mínimos para el módulo convertor de corriente. Con cable mallado se realiza la conexión directa del transductor de presión al módulo de conversión adicional para la entrada a la DAQ es necesario usar cable protegido para evitar

ruido, la conexión de todo el sistema comienza con la alimentación del transmisor con una fuente de 24 V para que la señal llegue al controlador como se muestra en la figura 17.

Figura 17

Diagrama de conexión en general



Nota. Diagrama de conexión con una fuente de 24 V de alimentación con la entrada del transmisor de presión.

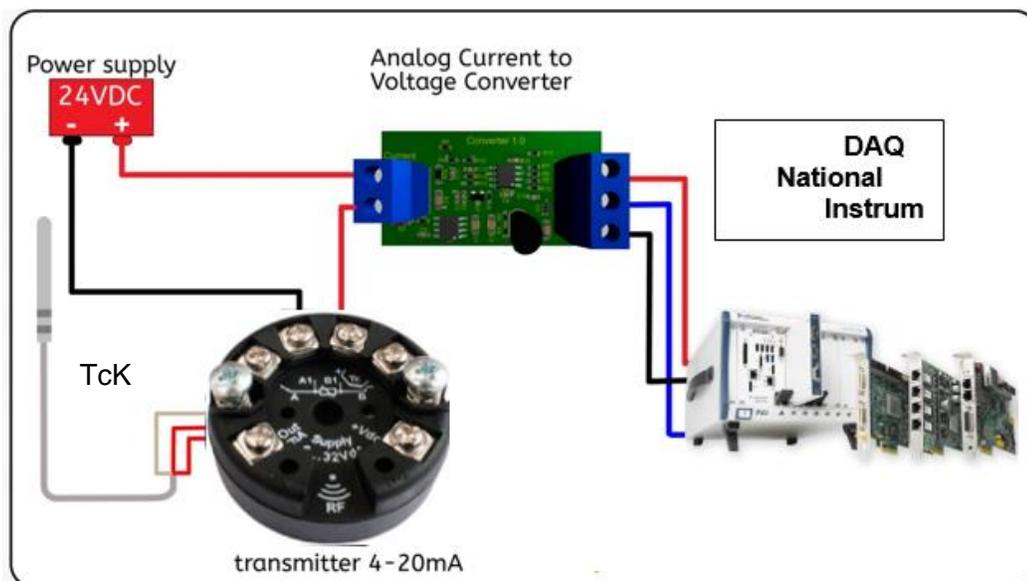
Temperatura

El sensor seleccionado para la etapa de temperatura es la termocupla tipo k, usaremos un convertidor RTD para Termopares y PT100 de la marca Pixsys Electronics que nos entrega una señal de 4 a 20 mA, nuevamente esta será la entrada de un conversor de 4 a 20 mA que se transformará de 0 a 5 V, después la DAQ procesará los datos mediante LABVIEW, donde se escalará a grados Centígrados.

La pastilla Pixsys necesariamente necesita de una fuente de 12V a 36V, es un potente transmisor de temperatura cuya programación y configuración se la realiza mediante RFid junto a una app disponible en Android para una correcta reescalación de la salida. Adicional, para comprobar que la temperatura que recibimos es correcta usamos un TP4-MC18 controlador industrial con entrada para termocuplas, termistores y voltajes referenciales, necesariamente la alimentación de este componente es de 110 V, además de la entrada de la termocupla en los pines 9 y 10 para adquirir la señal que entrega la termocupla tipo K.

Figura 18

Diagrama de conexión final entre termocupla, acondicionamiento y envío de datos



Nota. Diagrama de conexión entre la termocupla, la pastilla transmisora de temperatura, el conversor de señales y el DAQ de National Instruments.

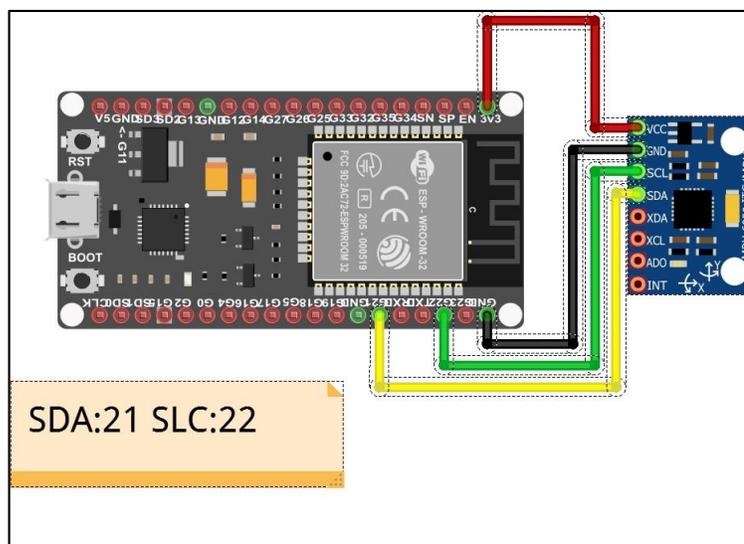
Vibraciones

Para analizar las Vibraciones usamos un sensor acelerómetro con un potencial elevado para más aplicaciones, pero para nuestro proyecto necesitamos centrarnos en los cambios generados en los 3 ejes. El rango del acelerómetro varía desde 2g hasta 16 g de precisión, además, el lenguaje de comunicación es mediante el protocolo I2C que facilita la comunicación con el controlador.

El controlador que usamos para comunicarnos y enviar los datos por el puerto serial es el ESP32 cuya funcionalidad abarca la industria actualmente, varias funcionalidades y periféricos potencian la tarjeta como el procesador principal que mandara los datos por serial usando el protocolo I2C. La importancia de la conexión en los pines es importante para evitar daños físicos y materiales.

Figura 19

Diagrama de conexión entre ESP32 y módulo MPU9250



Nota. Pines que se conectan con el ESP32 para alimentación y transmisión de datos con el módulo MPU9250 con conexión USB 2.0

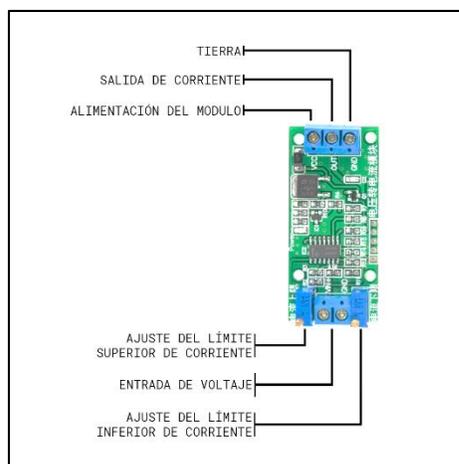
Primeramente, se necesitar colocar la alimentación y tierra para encender el acelerómetro, después es necesario buscar en la hoja de datos para determinar los pines correspondientes para comunicarnos mediante el protocolo I2C, que son D21 y D22 respectivamente.

Conversores de señales

Debido a que nuestra NI-PXie8115 al momento de configurar las DAQ solo se puede recibir voltaje, es necesario un convertor de 4 a 20 mA a 0 – 5 V. Las salidas del transductor de presión y la salida de la pastilla Pixsys después de la linealización de la termocupla tipo K son de 4 a 20 mA. Los módulos de conversión tienen varias funcionalidades, por lo que, se debe especificar el rango de operación junto a la calibración de los potenciómetros para una correcta salida de voltaje.

Figura 20

Modulo convertidor de 4 a 20Ma hasta 0-5 V



Nota. Direcciones de conexión para el convertidor de corriente a voltaje.

La fuente de alimentación de estos módulos es de 12 V, tiene protección inversa para cuidar la señal de entrada en caso de una eventualidad. Para la correcta calibración se necesita de dos multímetros a la entra y a la salida, en primer lugar, se necesita la señal baja de 4mA donde ajustaremos el potenciómetro inferior hasta que la salida de voltaje sea 0, a continuación, se debe ajusta el SPAN el potenciómetro superior hasta el límite que deseamos que llegue los 20 mA es decir en nuestro caso 5V. Finalmente, se realiza la conexión de entrada de corriente y la salida directamente a la tarjeta de adquisición de datos como se muestra en la figura 20.

Diseño Interfaz gráfica

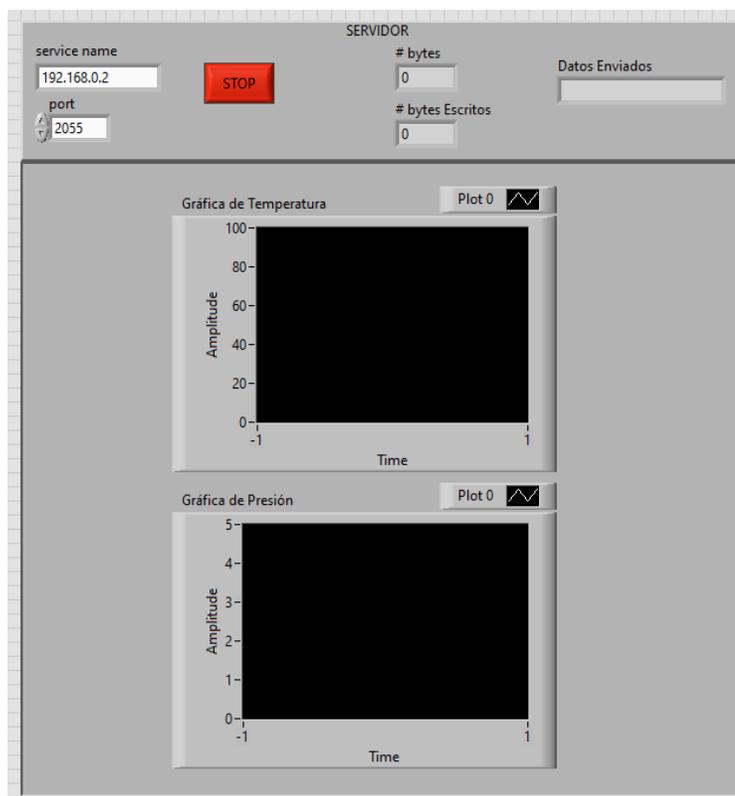
El diseño de las interfaces gráficas se lleva a cabo en dos programas diferentes. El primero es Labview en la estructura de cliente servidor, donde se crea un archivo.txt donde se guardan los datos, y el segundo es Matlab, donde se cargará el archivo.txt y los videos para visualizar las gráficas y reproducir los videos de las pruebas realizadas.

Las interfaces de estructura de cliente y servidor permiten que el controlador NI PXIe-8115 se conecte y transfiera datos a una computadora a través del protocolo TCP/IP por medio de un cable RJ-45 con la asignación de IPs.

La figura 21 muestra la pantalla del servidor, donde se observa dos bloques de texto para colocar los datos de IP del cliente y el puerto asignado. Para el servidor, se debe colocar la IP 192.168.0.2 y el puerto 2055. También se muestran bloques de visualización de datos y bytes enviados. Finalmente, como se puede ver existen gráficas en función del tiempo de la presión y la temperatura.

Figura 21

Diseño de Interfaz gráfica servidor



La figura 22 muestra la pantalla del cliente, donde se pueden ver dos bloques de texto para colocar los datos de IP del servidor y el puerto asignado, en este caso 192.168.0.1 con el

puerto 2055. También se pueden ver bloques de visualización de datos y bytes recibidos, las gráficas en función del tiempo de la presión y la temperatura se mostrarán de la misma manera que en la interfaz del servidor.

Figura 22

Diseño de Interfaz gráfica Cliente



Para crear las interfaces gráficas en el software de Matlab se utilizó la ayuda del aplicativo App Designer que ofrece ayuda en el diseño visual y programación mediante funciones.

La figura 23 muestra el título del proyecto, los integrantes del grupo, una gráfica del banco de pruebas, el logotipo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y un menú de acceso con tres botones a ventanas de gráfica y reproducción de video.

El usuario puede elegir entre las siguientes opciones:

- Gráficas: La ventana crea las gráficas de la curva de datos guardadas en un archivo .txt.
- Video: Ventana donde se secciona el archivo de video y procede a reproducirlo.
- Salir: Botón para salir de la interfaz gráfica

Figura 23

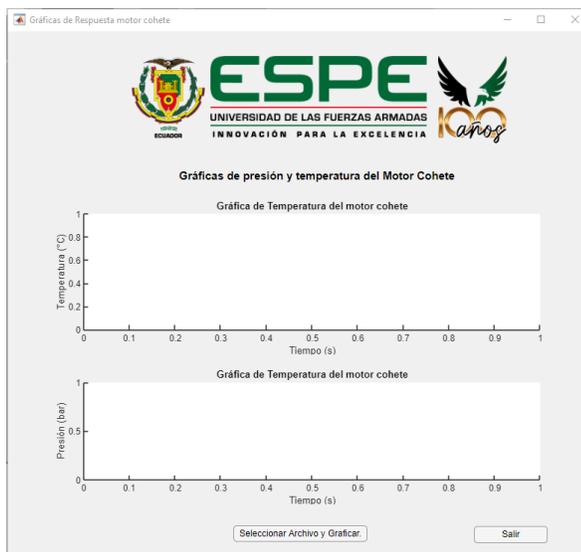
Interfaz gráfica pantalla principal Matlab



La figura 24 muestra la ventana de gráficas en la que se visualiza, la gráfica de presión y temperatura del motor cohete, un botón para seleccionar el archivo .txt en donde están los datos de las pruebas y un botón para salir, y el logotipo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Figura 24

Interfaz gráfica pantalla gráficos Matlab



En la interfaz gráfica se muestra el uso de los siguientes componentes visuales:

- Axes: Corresponde a una visualización gráfica de datos de presión y temperatura.
- Button: Los botones de ejecución de gráfica, selección de archivos y otro botón de salida.

La figura 25 muestra la opción para la ventana de video, que muestra dos vistas específicas donde se realizaron las grabaciones, dos botones de selección y reproducción y un botón de salida.

Figura 25

Interfaz gráfica Pantalla Video Matlab



Diseño e implementación de la plataforma de pruebas

En el presente capítulo se abordará el diseño del banco de pruebas denominado internacionalmente como BEMCO, se ubicarán las etapas de fabricación, fases de sensado, adicional estudiar la estructura adecuada para que el sistema nos entregue resultados óptimos. Generar un concepto global con los prerrequisitos como: el sitio físico a ejecutar el experimento, permisos necesarios oficiales de la institución a cargo, componentes hidráulicos y electrónicos, pruebas que garanticen la seguridad personal y física de los instrumentos.

Parámetros habituales de diseño de los BEMCO necesarios para un óptimo funcionamiento dentro de las normas de seguridad:

Tabla 1

Parámetros habituales de diseño de un BEMCO

Parámetros	Detalle
Dimensiones del Banco	Las dimensiones generales son de 120 mm y 90 mm respectivamente. El alto del banco se debe a que soporte la fuerza al accionar el cohete, el largo se lo realizo de 120 mm por el tamaño del motor cohete y de la etapa de presión que será efectuada con un embolo.
Sistema Mecánico del BEMCO	Se basa en una máquina de ensayo de tracción horizontal, con dos rieles con topes que deben soportar la fuerza ejercida en las pruebas.
Temperatura Externa en la tobera	La temperatura en la tobera puede llegar a los 100 °C aunque puede llegar a ser considerablemente menor.

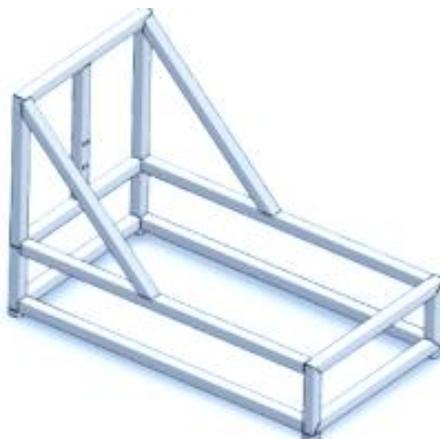
Parámetros	Detalle
Empuje generado	Se debe determinar la fuerza con la que la energía desplazar al motor cohete sobre el riel. Se estima que el empuje puede ser menos a 100 N. Presión no mayor a 4 bares estimados.
Acelerómetro	Determinará las vibraciones en los 3 ejes fundamentales para determinar su comportamiento.
Fuente de Alimentación	Se utilizaran fuentes de DC para la etapa electrónica entre 12 y 24 V según el caso pertinente, de ser necesario también está habilitado 110 V.
Diseño Industrial	Diseño estándar para bancos de pruebas horizontales Matlab
Software de Control	Labview Arduino IDE- ESP32 Programación con código libre

Selección de la estructura

Luego de un estudio de las estructuras posibles escogimos tres finalistas entre la hexagonal horizontal, rectangular vertical y una estructura horizontal simple. Para determinar cuál estructura será nuestro BEMCO se consideró varios parámetros donde se coincidió que la estructura horizontal era superior al resto en Peso, Costo de Materiales, Tiempo de Construcción, Costo de Materiales, por lo cual, la mejor opción es la estructura horizontal mostrada en la figura 26.

Figura 26

Modelo del BEMCO simulado



Nota. Esqueleto del banco de pruebas horizontal preliminar acoplado a los requerimientos del misil SAM Fuente: Chicaiza León y Ramírez Chiluisa (2020)

Para el material usado en la base metálica se utilizó el acero negro debido a su disponibilidad junto a costo y beneficio. Para unir las bases con el resto usamos uniones mixtas para la plataforma inferior el cajón esta empernado y el resto de armazón superior y los bordes de la base se encuentran compactadas con soldadura.

Figura 27

Estructura del BEMCO

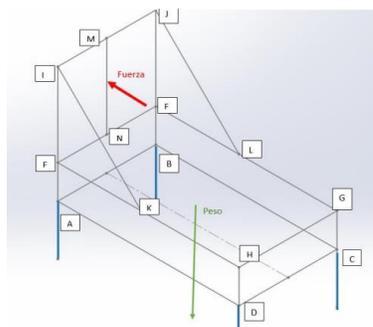


Nota. Elaboración del esqueleto del BEMCO en el taller solamente perfiles estructurales.

Las dimensiones del BEMCO de largo son 120 cm, de ancho 70 cm y de altura 90 cm. La altura de la base inferior principal será de 30 cm y el marco estructural será de 60cm por 70 cm. La base del BEMCO se sotierra en una fosa de 10 cm de alto en un lugar despejado y amplio atrás del CICTE en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, para aumentar la seguridad del personal y preservar la integridad de los equipos aseguramos la base con estacas hechas de acero de 1" a tierra de 50 cm con una curvatura de 10 cm.

Figura 28

Medidas del banco de pruebas



Nota. Proyecciones del BEMCO para modelado de construcción.

Sistema de deslizamiento

Es preciso un sistema de deslizamiento, por lo que, se necesita dos ejes con soportes en ambos extremos, para lograr el movimiento longitudinal se necesita dos rieles transversales y unas abrazaderas de tubo que sujeten el motor cohete.

Figura 29

Esquema de transición



Nota. Ejes transversales del BEMCO donde se moverá la cámara de combustión.

El peso del motor cohete junto a las abrazaderas de tubo soportaran los ejes transversales, por lo que, los rodamientos tienen que soportar dicho peso. La longitud del Eje es de 100 cm, el peso aproximado del Motor cohete junto a los rodamientos y considerando la pólvora es aproximadamente de 2.5 kg. El material para los ejes, rodamientos y topes es el Acero 10 – 45 a nivel industrial, se seleccionó este material por las siguientes cualidades físicas y químicas:

- Soldabilidad compatible con todos los métodos.
- Maquinabilidad acabado Premium
- Resistencia al desgaste.
- Forjabilidad alta.

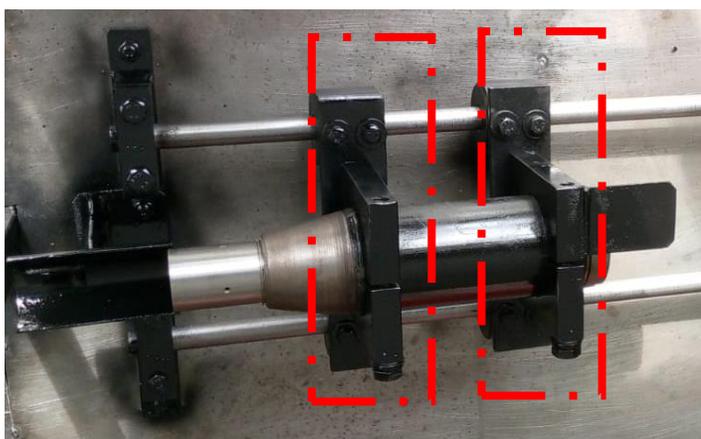
Se lo utiliza principalmente en piñones, bridas, ejes, grapas, tornillería grado 5, barras de conexión, etc. El rango de temperatura cuando se somete a algún tratamiento térmico va entre 850° a 110 ° C ideal para nuestra aplicación.

Los rodamientos que van en los ejes son 4 respectivamente que aguantaran 0.63 Kg cada uno, los rodamientos de tipo cilíndrico son ideales para los dos ejes y para la plataforma de sensado de presión. Además, el mecanismo de la sujeción de la cámara de combustión se

la realizo mediante dos bases bridas elaboradas con acero bonificado V320 que fueron colocadas en el extremo del cuerpo para lograr centrar y sujetar durante el experimento. Las cualidades por las que se seleccionó el acero es por su alto porcentaje de carbono, desgaste tentativamente alto, soporta altas temperaturas como se muestra en la figura 30.

Figura 30

Bases bridas de soporte



Nota. Los bocines del BEMCO fueron diseñados con teflón para mejorar el peso de los materiales y que se desprecie el funcionamiento de los ejes.

Diseño de la cámara

Para la fabricación del cuerpo de la cámara utilizaremos la tapa frontal del misil IGLA y la parte posterior estará la tobera, el largo de la cámara es de 21 cm. El material que se fabricó el cuerpo es el Acero Negro debido a la tradición de la fabricación de tuberías debido a que soporta altas temperaturas como se muestra en la figura 31, debido a su proceso de elaboración y bajos niveles de carbono el acero se oscurece mediante una capa que el material se vuelve duradero y resistente. Asimismo, el acero negro permite su maleabilidad y conexión mediante rosca.

Figura 31*Cámara de combustión*

Nota. Se elabora una cámara de combustión que tenga conexión con la tobera y el sellado de la capsula.

Resumen de Materiales Utilizados

Para la elaboración del BEMCO fueron necesarios distintos tipos de materiales según su estructura o funcionalidad, a continuación, el listado en resumen de los materiales usados:

- Estructura Interna de base. **Material:** Tubo Cuadrado de 20mm acero negro al carbono.
- Recubrimiento de Bases
- Armazón de la Base **Material:** Plancha de 1mm de espesor de acero negro al carbono.
- Bases de Sujeción para ejes de 1 metro y diámetro. $\frac{3}{4}$ **Material:** Acero 10-45
- Ejes de 1 metro **Material:** Acero 10-45
- Bases Bridas Soporte Cámara **Material:** Acero Bonificado V320
Soldadura 6011, 7018 y 6013.

Diseño del soporte del sensor de presión

El sistema hidráulico que se implementó para medir la presión que ejercerá el sistema consiste de los siguientes materiales:

- Cilindro neumático de 100 x 50
- Sello de diafragma acero inox 1/4"
- Manguera neumática 1/2" 3000lbs
- Manómetro
- Transmisor de presión 0-400 bar
- Válvula de Cierre de 1/4

El cilindro será montado en la parte final de los rieles en una base en forma de L con 4 rodamientos similares a los colocados en el soporte de la cámara para facilitar el acceso, el cilindro está conectado al sello de diafragma con el manómetro para que al final ubicar el transductor de presión formando un sistema neumático presurizado. El sistema final instalado en uno de los soportes del BEMCO permanecerá estático hasta que el cilindro complete la carrera de 50 mm como se muestra en la figura 32.

Figura 32

Circuito neumático para medir la presión



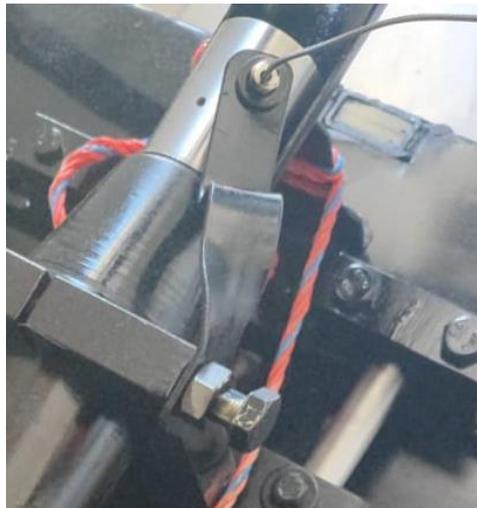
Nota. a) Montaje de embolo sobre rieles. b) Etapa de visualización de presión con manómetro y transmisor de presión.

Diseño del soporte del sensor de la termocupla

La termocupla tipo k se debe de ubicar en la parte superior de la tobera evitando la salida de llama por la parte posterior de la tobera, en la brida posterior de soporte colocamos una tuerca que sujeta una pieza en forma de S para que no interfiera y sea fácilmente extraíble, los extremos son ajustados mediante tuercas y rodela respectivamente. La conexión a la caja está realizada por cable mellado termopar para uso industrial.

Figura 33

Soporte de temperatura

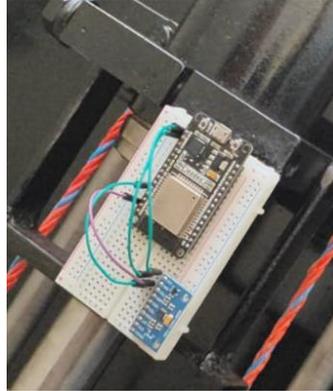


Diseño del soporte del acelerómetro

El acelerómetro necesariamente debe de ubicarse en contacto directo con el experimento, por lo cual, en la brida posterior se soldó una placa de metal de 10 x 10 para que el sensor pueda captar las vibraciones directamente. Se montará el controlador y el sensor dentro de una caja con una salida para la alimentación mediante USB. Además, es necesario dejar una abertura para alimentar el controlador ESP32 ya que tiene una conexión que servirá de alimentación y de bus de datos I2C.

Figura 34

Conexión MPU9250 y ESP32



Nota. Conexión establecida para que el acelerómetro reciba medidas paralelas.

Sistema de fijación del BEMCO

Debido a la dinámica del experimento es ineludible buscar un sistema de fijación del BEMCO en general por seguridad de los equipos y del bienestar del personal en el momento del experimento a su máxima capacidad. Ya que siempre existe un porcentaje de error o escenarios donde pueden fallar las cosas.

En un terreno plano en la parte posterior del CICTE en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en una zona alejada se ubicará el experimento, así que, se realizó una fosa de 10 cm de profundidad aproximadamente para poder introducir el BEMCO y que las posibles vibraciones y efectos de la fuerza de la tobera soporte el experimento completo, para aumentar la seguridad con barras en forma de L aseguramos el BEMCO al suelo anticipándonos a cualquier eventualidad que pueda producirse.

Figura 35

Fosa para pruebas de lanzamiento



Nota. Fosa ubicada en la parte posterior despejada.

Capítulo IV

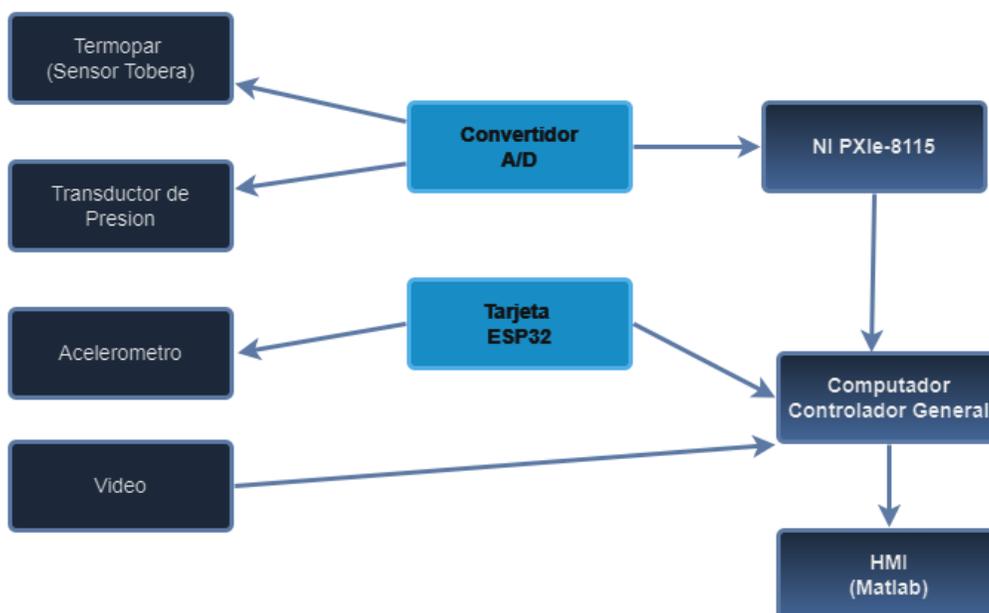
Implementación

Montaje de sistema electrónico

En términos generales el sistema electrónico del BEMCO se encuentra dividido en tres secciones, la primera etapa se encuentran los transmisores y sensores que son enviados a una etapa de acondicionamiento de señal formando la segunda etapa. Finalmente, las señales serán procesadas mediante el computador para visualizar los datos en una HMI generada en Matlab el cual mostraremos a detalle en la figura 36:

Figura 36

Diagrama general del sistema electrónico



Nota. Distribución del sistema electrónico de forma global de principio a fin.

El sistema electrónico se encuentra ubicado en la parte izquierda superior del BEMCO dentro de una caja metálica de 20x20 cm, cuya finalidad es proteger la integridad física de los elementos electrónicos durante las pruebas con pólvora.

Calibración de sensores

La importancia de la calibración de los sensores es un requisito para que el BEMCO obtenga señales reales de acuerdo a las variables físicas, una garantía de fiabilidad y exactitud. Asimismo, la correcta interpretación de las variables medidas nos ofrecerán resultados de alta repetibilidad en futuros estudios.

Transductor de presión

La calibración del transductor de Presión se lo realizó en varias etapas en el taller de pruebas, usando el circuito neumático y tomando varias lecturas a diferentes esfuerzos mecánicos. Usando el manómetro obteníamos el valor de presión referencial y con la ayuda de una gata hidráulica de tubo se realizó varios empujes a distintos valores. Posteriormente, se tomaron mediciones reales de presión con varios empujes con la tabla generada se puede realizar la liberalización, tabla 2.

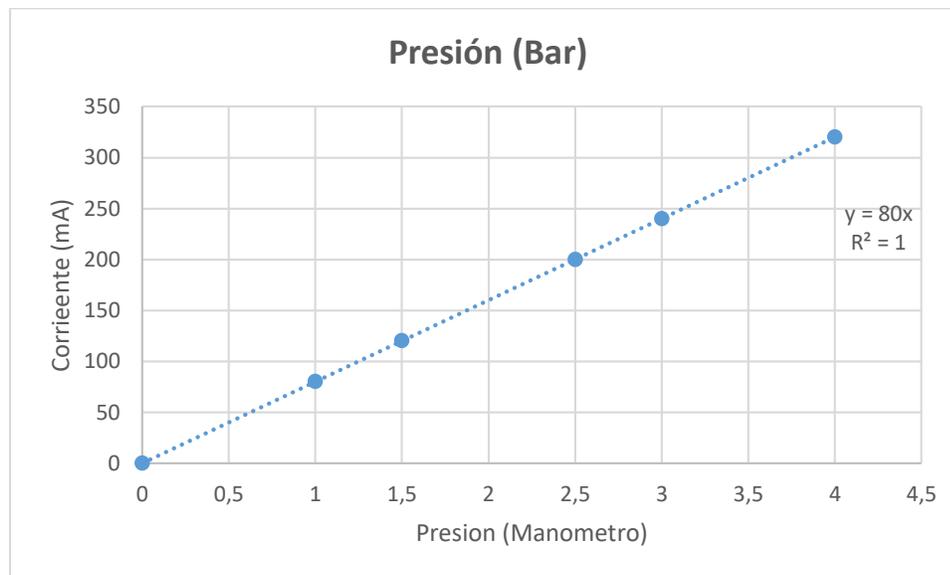
Tabla 2

Valores medidos de presión con la lectura del manómetro.

Presión (Bar)	Corriente (mA)
0	4,2
1	4.39
1.5	5.03
2.5	5.96
3	7.02
4	7.94

Figura 37

Linealización del transductor de Presión



Nota. Datos adquiridos para linealizar el transductor de presión generados con una prensa hidráulica para obtener distintos valores.

Se ha obtenido de los datos reales la siguiente ecuación:

$$y = 0,0384x + 4,0914$$

Donde y representa el valor analógico que el transductor envía y X representa a la variable física leída en el manómetro.

Para obtener la relación de presión real después del convertidor de señales necesitamos la relación voltaje presión para obtener la ecuación y programar en LabVIEW, por lo cual necesitamos valores reales de voltaje junto a su representación en bares, en la siguiente tabla 3.

Tabla 3*Relación voltaje con presión deseada*

Voltaje (V)	Presión Representada (bar)
0	0
1	2.6
1.5	3.9
2.5	6.5
3	7.8
4	10.4
5	13

La ecuación que se obtiene es la siguiente

$$y = \frac{13}{5}x$$

Donde y representa la presión y X representa la entrada de voltaje mediante la tarjeta de adquisición, el factor de multiplicación para labview será de 2.6

Temperatura

La termocupla tipo K nos entrega una salida en mV que no es lineal es por eso que necesitamos de la pastilla Pixsys, la misma que se puede calibrar mediante una base de la misma marca o mediante la aplicación My Pixsys en Android mediante la tecnología NFC. La configuración necesaria para calibrar el transmisor de temperatura para las necesidades del proyecto son las siguientes, también se puede apreciar la configuración final en la figura 38:

1. Sensor TCK, Comp: 2 Wires; Output Error: 21mA

2. Filter: Low
3. Data Logger: Disabled; Time Shot: 1
4. Min Range mA: 4.000; Min Range Input: 0
5. Max Range mA: 20.000; Max Range Input: 100
6. Calibration: 1; Offset: 0

Figura 38

Configuración de la pastilla pxyxs para rango deseado.

Sensor		
Par.ID	Name	Value
P_1	Sensor Type	TcK
P_2	Comp	2 Wires
P_3	Output Error	21.0 mA
Filter		
Par.ID	Name	Value
P_4	Filter	Low
Logger		
Par.ID	Name	Value
P_5	Data Logger	Disabled
P_12	TimeShot	1
Min Range		
Par.ID	Name	Value
P_6	Min Range mA	4.000
<input checked="" type="checkbox"/> P_8	Min Range Input	0
Max Range		
Par.ID	Name	Value
P_7	Max Range mA	20.000
P_9	Max Range Input	800.0
Calibration		
Par.ID	Name	Value
P_10	Gain	1
P_11	Offset	0.0

Nota. Generación de PDF para la configuración de la pastilla controladora de temperatura, configuración ideal para el rango deseado.

Para obtener la relación de temperatura real después del convertidor de señales cuya señal de entrada es la salida de la pastilla en mA necesitamos la relación voltaje-temperatura para obtener la ecuación y programar en labview, por lo cual necesitamos valores reales de voltaje junto a su representación en °C, siguiendo la siguiente tabla 4:

Tabla 4

Relación voltaje con temperatura deseada

Voltaje (V)	Temperatura [°C]
0	0
1	20
1.5	30
2.5	50
3	60
4	80
5	100

La ecuación que se obtiene es la siguiente

$$y = 20x$$

Donde y representa la presión y X representa la entrada de voltaje mediante la tarjeta de adquisición, el factor de multiplicación para labview será de 20.

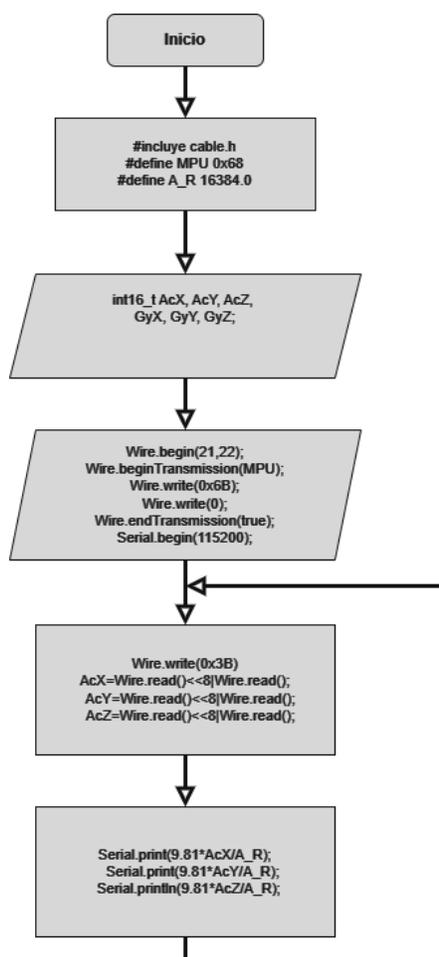
Vibraciones

El MPU6050 tiene un acelerómetro de 3 ejes cuenta con un procesador propio que procesa las funciones. Pero es necesario la conexión con la ESP32 para obtener los datos que requerimos para nuestro experimento. Por lo cual en el IDE de arduino se realizó la programación basándonos en el diagrama de flujo mostrado en la figura 39.

En primer lugar, inicializamos la librería Wire.h que nos dará acceso para que la tarjeta se pueda comunicar mediante el protocolo I2C. Necesariamente hay que seleccionar 0x68 que pertenece a la dirección I2C, para iniciar los sensores hay que escoger el rango de trabajo en nuestro caso será de 2g con una lectura de 16 bits de esta manera A_R 16384.0. Posteriormente creamos variables sin procesar de los tres ejes del acelerómetro y si es indispensable de los ángulos de inclinación.

Figura 39

Diagrama de flujo de la programación del acelerómetro



Nota. Diagrama de programación en el software Arduino IDE para la captura de datos seriales.

Escogemos e inicializamos los pines 21 y 22 que usaremos para controlar el MPU. Para tomar la lectura necesitamos acceder al registro 0x3B y capturamos 6 registros almacenados en las variables anteriormente creadas AcX, AcY y AcZ. Finalmente necesitamos imprimir los valores tomados del registro teniendo en cuenta la gravedad mediante el puerto serial.

Programación de interfaz gráfica

Los dispositivos electrónicos que se describieron previamente se utilizan en el sistema de banco de pruebas que se presenta. Sin embargo, se requiere la creación de un proceso Cliente-Servidor para extraer y visualizar estos datos en el software de Matlab, para cumplir con los requisitos del proyecto.

Según el diseño de nuestro sistema, se utilizará el controlador NI PXIe-8115 junto con el módulo NI PXIe-6361, que tiene integrado el software LabVIEW 2013; también se utilizará una computadora externa que tenga instalado tanto el software LabVIEW de la misma versión del controlador y el software Matlab en cualquier versión. Ambos equipos estarán conectados mediante cable UTP por medio del protocolo TCP/IP

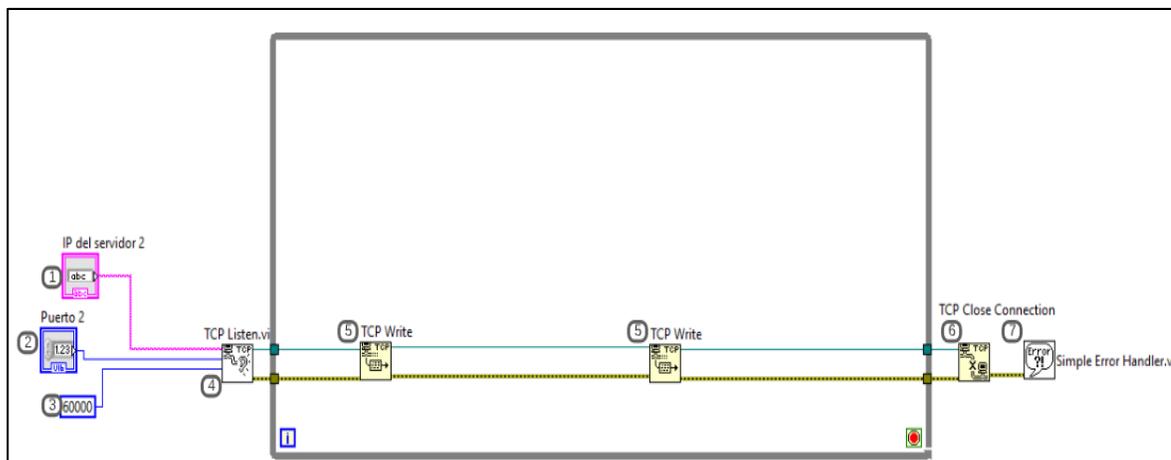
A continuación, se describen los elementos y bloques de programación utilizados en la programación de las interfaces de cliente y servidor, y luego se muestran todos los elementos conectados en el programa completo.

Interfaz gráfica Servidor LabVIEW

En la figura 40 se muestra el uso del protocolo TCP/IP para realizar la comunicación Cliente-servidor, mostrando primero la programación del servidor.

Figura 40

Bloque de programación para la comunicación cliente-servidor mediante el protocolo TCP/IP



Esta parte del programa está conformado por 7 elementos que son:

1. *Control String "service name"*: Este es un control que permite ingresar un valor de texto, se usa para especificar el protocolo de red al que se desea conectar y enviar datos en este caso la IP del cliente.
2. *Control Constant "port"*: Este bloque es un control de una variable constante que permite configurar el valor del puerto. El puerto utilizado es el 2055.
3. *Constant*: Este bloque establece un valor fijo constante sin variación durante la ejecución.
4. *TCP Listen*: El bloque TCP Listen se usa para iniciar un servidor TCP en un puerto específico. El programa comenzará a verificar conexiones entrantes en el puerto predeterminado.
5. *TCP Write*: Bloque de programación que a través de la conexión TCP es utilizado para enviar información.
6. *TCP Close Connection*: Bloque que realiza el cierre de la conexión TCP previamente establecida.

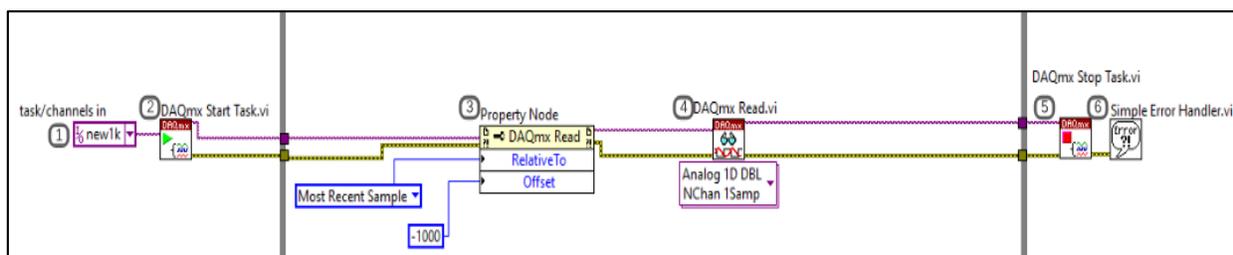
7. *Simple Error Handler*: Este bloque se usa para corregir errores que ocurren durante la ejecución del programa.

El controlador NI PXIe-8115e incluye el software Measurement & Automation Explorer (MAX), que puede sincronizar y verificar la conexión de la tarjeta NI PXIe-8115. La conexión de la tarjeta permite utilizar la librería NI DAQmx en el diagrama de bloques de LabVIEW.

En la figura 41 se muestra la recolección de datos provenientes de los sensores, la conversión de voltaje a valores de presión y de temperatura respectivamente. Dichos datos deben ser enviados por el cable UTP mediante el protocolo TCP/IP por lo cual son agrupados y enviados en formato string por medio del bloque Format Into String.

Figura 41

Bloque de programación para la adquisición de datos



Esta sección del programa está conformada por los siguientes bloques de programación.

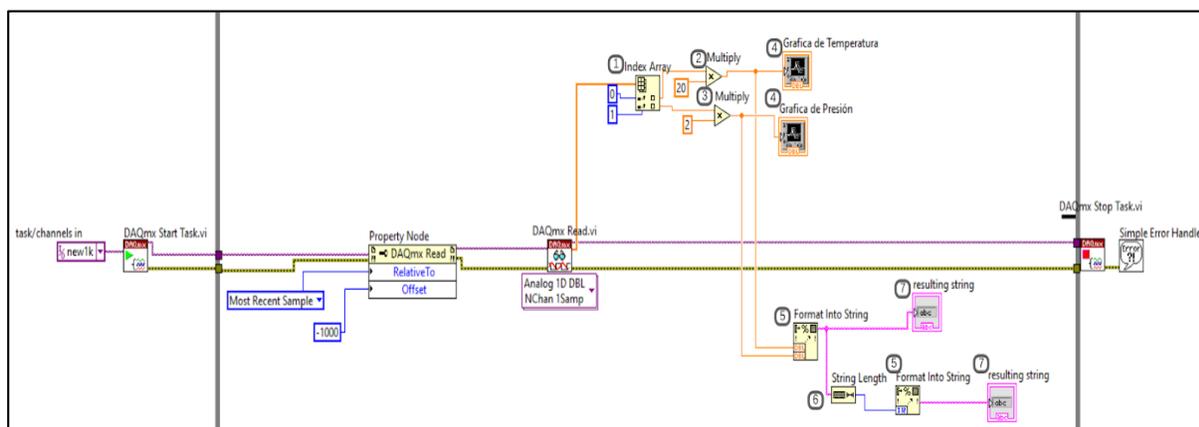
1. *Task/channels in*: Bloque de configuración de adquisición de datos, se configura los puertos, frecuencia de muestreo, rango de entrada.
2. *DAQmx Start Task*: Este bloque se utiliza para iniciar la adquisición de datos por medio del asistente DAQmx
3. *Property Node*: Este bloque permite acceder y cambiar las propiedades según sea necesario de un bloque en este caso del bloque de adquisición de datos.

4. *DAQmx Read*: Bloque utilizado para leer valores de los canales de entrada, estos datos se almacenan en un array.
5. *DAQmx Stop Task*: Bloque utilizado para detener la adquisición de datos.
6. *Simple Error Handler*: Este bloque se usa para corregir errores que ocurren durante la ejecución del programa.

La figura 42 muestra el desglose y la linealización de datos para que se puedan ver los datos reales de temperatura y presión en las gráficas; luego se unen para convertirlos en un string, se obtiene el número de bytes enviados y enviar estos datos por medio del TCP Write.

Figura 42

Bloque de programación para la conversión de unidades y linealización.



Los siguientes bloques de programación componen esta sección del programa:

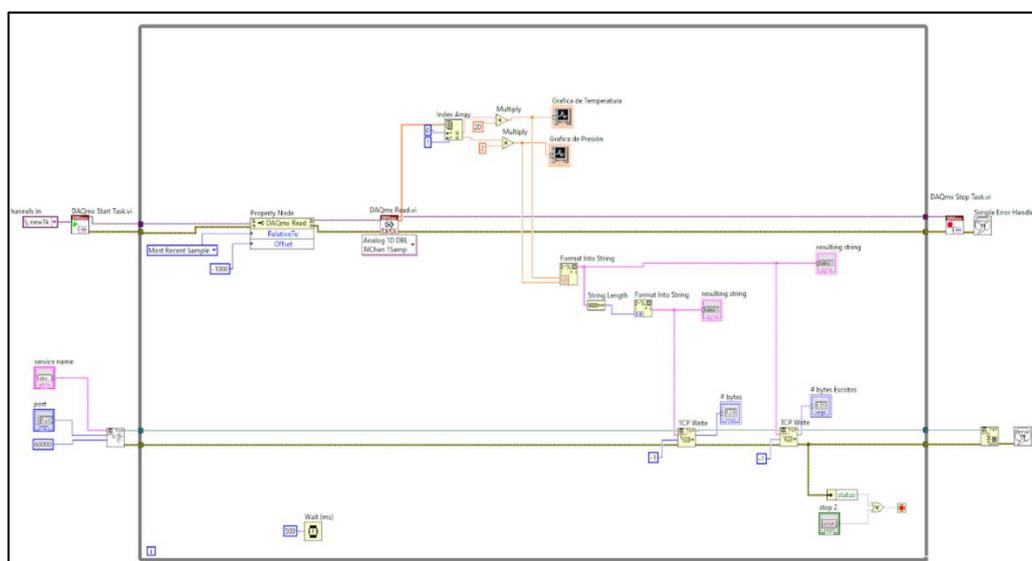
1. *Index Array*: Bloque de acceso a un arreglo de datos, este bloque ayuda para la selección de datos dentro de un arreglo.
2. *Bloques de conversión de temperatura*: Estructura de linealización para obtener los datos reales de temperatura.
3. *Bloque de conversión de Presión*: Estructura de linealización para obtener los datos reales de presión.

4. *WaveForm Chart*: Bloque gráfico que muestra los datos en forma de ondas, utilizado para visualizar señales en tiempo real.
5. *Format to String*: Bloque que convierte los datos en formato de cadena de caracteres.
6. *String Length*: Bloque que determina la longitud de una cadena de caracteres.
7. *String Indicator "resulting string"*: Bloque indicador utilizado para mostrar cadena de caracteres.

En la figura 43 se tiene el esquema de conexión completo de la programación de la primera interfaz gráfica del servidor. En donde se visualiza que tenemos 2 TCP Write, en el primer TCP Write se envía el número total de longitud de caracteres totales (bytes) de los datos agrupados correspondiente a 2 bytes, y en el otro TCP Write se envía los datos reales de las pruebas realizadas.

Figura 43

Bloque de programación completo de la interfaz gráfica del servidor.



Interfaz gráfica cliente LabVIEW

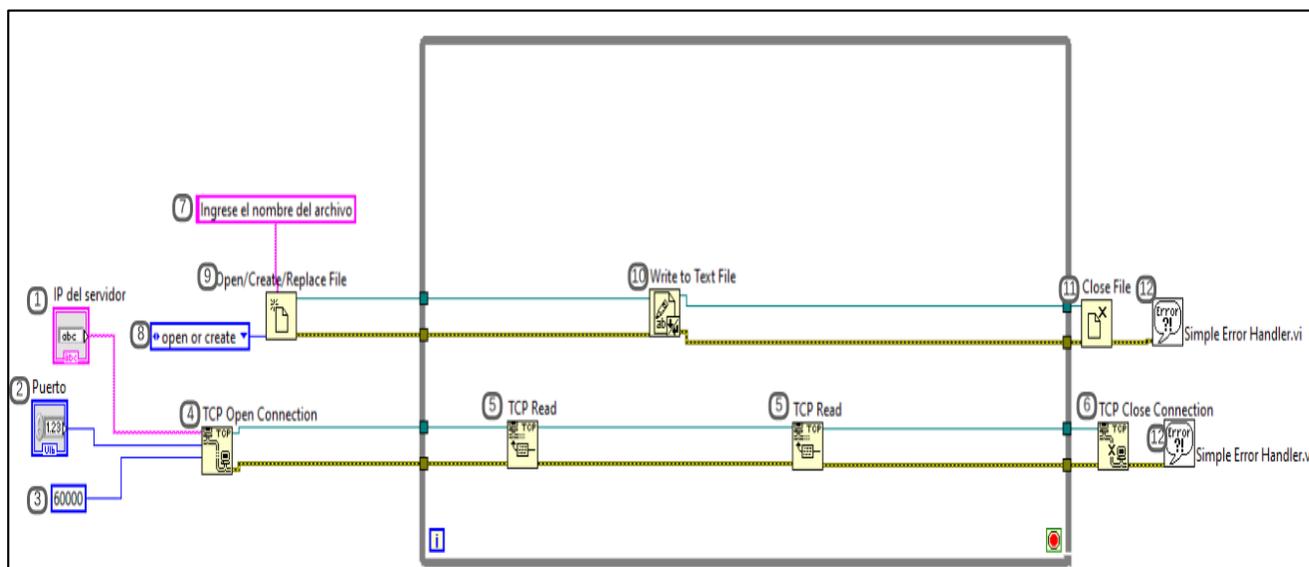
La interfaz gráfica del cliente se encuentra en una computadora externa que realiza la función de cliente y recibe los datos. Las gráficas de obtención de datos en tiempo real se muestran de la misma manera que en la interfaz gráfica del servidor, la programación de la recepción de datos utiliza el protocolo TCP/IP y la programación de bloques crea un archivo en formato.txt donde se almacenan los datos

La programación de la interfaz gráfica del cliente tiene como objetivo recibir, ver, organizar y registrar datos en un documento en formato "txt". La librería DAQmx utiliza bloques de programación, específicamente el bloque TCP read, para recibir archivos. Además, la librería File I/O sirve para crear y escribir archivos mediante los bloques Create/Write y Close File.

En la figura 44 se muestra el uso y la conexión de las librerías TCP/IP y File i/O.

Figura 44

Bloque de programación de comunicación TCP/IP y escritura de archivos.



Esta parte del programa está conformada por los siguientes bloques de programación.

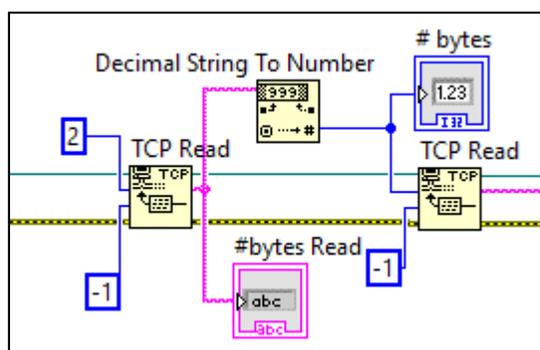
1. *Control String "IP ser servidor"*: Bloque de control que permite la entrada de una dirección IP en formato de cadena de caracteres, en este caso la IP del servidor.
2. *Control Constant "puerto"*: Bloque de control de una variable constante, establece el valor del puerto en la conexión de red.
3. *Constant*: Bloque que presenta un valor numérico constante.
4. *TCP Listen*: El bloque TCP Listen se usa para iniciar un servidor TCP en un puerto específico. Es utilizado para recibir datos a través de TCP/IP.
5. *TCP Read*: El bloque TCP Read lee los datos que llegan a través de una conexión TCP establecida por un dispositivo remoto.
6. *TCP Close Connection*: Bloque de cierre de la conexión TCP.
7. *Prompt "Nombre del archivo"*: Este bloque muestra un cuadro de diálogo que solicita al usuario el nombre del archivo antes de escribir un archivo.
8. *Operation*: El bloque Operation se puede usar para elegir las operaciones que desea realizar en un archivo.
9. *Open/Create/Replace File*: Este bloque se utiliza para abrir, crear o reemplazar un archivo.
10. *Write to Text File*: Bloque utilizado para insertar cadena de caracteres en un archivo de texto.
11. *Close File*: Este bloque se utiliza para finalizar la operación de escritura de un archivo.
12. *Simple Error Handler*: Este bloque se usa para corregir errores que ocurren durante la ejecución del programa.

En la figura 45, se realiza la lectura de datos, se utilizan dos bloques de lectura de TCP porque se enviaron dos datos desde el Servidor. En el primer bloque de TCP read, se debe

especificar el número de bits que se van a recibir para obtener los mismos datos enviados por lo cual se conecta una constante con el número 2 que viene a ser el dato de bytes a receptor, en el data out del primer TCP Read se obtiene el número 26 en formato string y con el uso del bloque *Decimal String to Number* transformamos este dato a constante y lo conectamos directamente al número de bytes que debe receptor el segundo TCP Read, en el segundo TCP Read en el pin Data out se tiene los datos de las pruebas de los sensores.

Figura 45

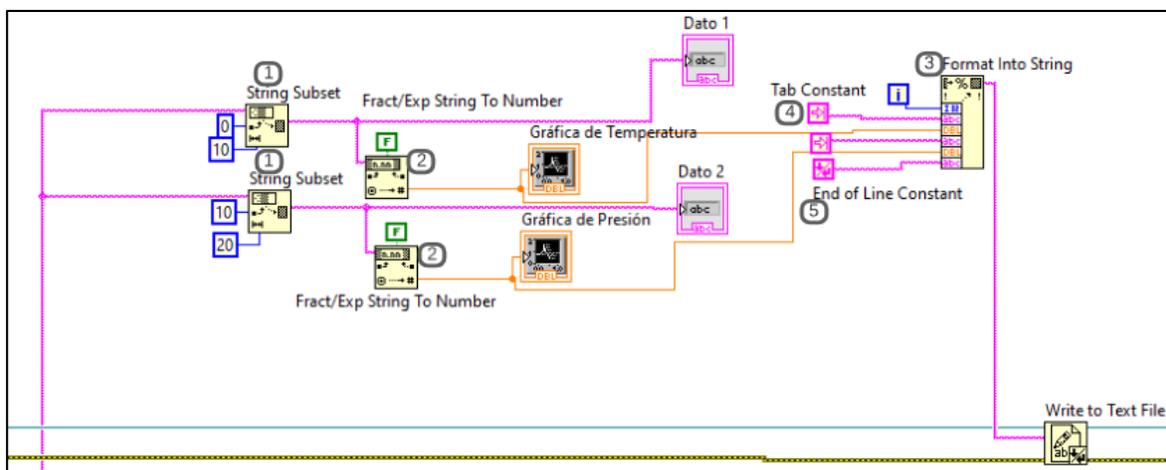
Bloque de programación de configuración de bits de lectura de los bloques TCP read.



En la figura 46 al receptor todos los datos en una cadena de caracteres en formato string, se presenta el desarrollo de una segmentación para obtener individualmente cada uno de los datos, transformarlos a datos numéricos y poder visualizar gráficamente. Al mismo tiempo esta segmentación nos ayuda a obtener un registro de forma más organizada de los datos separados por un tab por medio del bloque *Format Into String* y enviar esta información al ping *text* del bloque *Write to Text File* para obtener el archivo en formato “.txt”.

Figura 46

Bloque de programación de segmentación y registro de datos



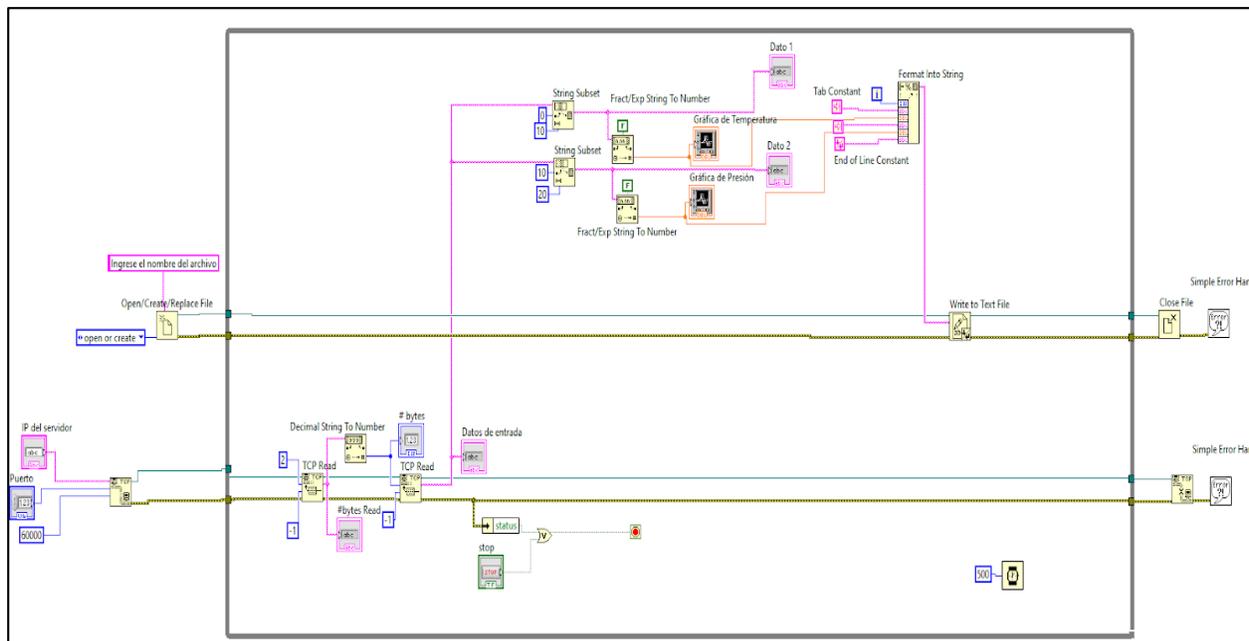
Esta parte del programa está conformada por los siguientes bloques de programación.

1. *String Subset*: Bloque utilizado para extraer una subcadena de un texto.
2. *Fract/Exp String To number*: Bloque que realiza la conversión de una cadena de caracteres en un valor numérico.
3. *Format Into String*: Bloque que convierte los datos en formato de cadena de caracteres.
4. *Tab constant*: Bloque utilizado para agregar el carácter de tabulación.
5. *End of Line Constant*: Bloque que incluye un salto de línea para la creación de estructuras adecuadas.

En la figura 47 se muestra el esquema de conexión completo de la programación de la segunda interfaz gráfica que corresponde al cliente.

Figura 47

Bloque de programación completo de la interfaz gráfica del cliente



Interfaz gráfica Matlab

Las interfaces gráficas realizadas en Matlab por medio de la aplicación *APP DESIGNER* visualizan los datos y reproducen archivos de vídeo obtenidos de las pruebas realizadas.

Al obtener el archivo .txt con los valores registrados de los sensores, el aplicativo de Matlab por medio de la programación por funciones se encarga de cargar el archivo seleccionado y proceder a graficar las curvas que se obtiene durante la fase de despegue del cohete esto con el objetivo de analizar el comportamiento de los motores cohete del misil IGLA.

En la interfaz gráfica denominada Gráfica al dar click en el botón “*Seleccionar el archivo y Graficar*” se abre una ventana de búsqueda y en base a la programación selecciona el archivo, lee los datos del archivo seleccionado, obtiene los datos de presión y temperatura de forma individual, reemplaza las comas por puntos en los valores, convierte los datos en formato string a double y por último gráfica los datos.

La programación se visualiza en la siguiente función que se realiza cuando se da click en el botón y seleccionamos el archivo.

```

function SeleccionarArchivoyGraficarButtonPushed(app, event)

    %Selección de archivo
    [filename, filepath] = uigetfile('*.txt', 'Seleccionar archivo TXT');%
    drawnow; % Actualizar la interfaz gráfica

    % Leer los datos del archivo seleccionado
    fullpath = fullfile(filepath, filename);
    fileID = fopen(fullpath, 'r');
    data = textscan(fileID, '%f %s %s %s', 'Delimiter', '\t');
    fclose(fileID);

    % Obtener los valores de X y Y
    x = data{1};
    y_str = data{2};
    y2_str = data{3};

    % Reemplazar las comas por puntos en los valores de Y
    y_str = strrep(y_str, ',', '.');
    y2_str = strrep(y2_str, ',', '.');

    % Convertir los valores de Y de string a double
    y = cellfun(@str2double, y_str);
    y2 = cellfun(@str2double, y2_str);

    % Imprimir los valores de X e Y en la ventana de comandos
    disp('Valores de X:');
    disp(x);

    disp('Valores de Y:');
    disp(y);

    disp('Valores de Y2:');
    disp(y2);

    % Graficar los datos en el graficador UIAxes
    plot(app.UIAxes, x, y);
    plot(app.UIAxes2, x, y2);

```

En la interfaz gráfica denominada video se realiza la programación para seleccionar y reproducir el video en formato mp4 o avi, abriendo un reproductor de vídeo propio del software de Matlab. La programación se visualiza en la siguiente función que se realiza cuando se da click en el botón y seleccionamos el archivo.

```
% Button pushed function: CargarvideoButton
function CargarvideoButtonPushed(app, event)
    tipos = {'*mp4;*avi'};
    [file,path] = uigetfile(tipos);
    if isequal(file,0)
        disp('Selección cancelada');
    else
        videopath = fullfile(path,file);
        %vid=VideoReader(videopath);
        implay(videopath);
    end
end
```

Capítulo V

Pruebas y Resultados

Protocolo de Pruebas

En primer lugar, es imperativo tener el conocimiento básico del funcionamiento del sistema en general junto al manejo del cohete SAM. La importancia del protocolo de pruebas consiste en establecer un proceso adecuado antes, durante y después del ensayo. Las condiciones que se encuentra el sistema mecánico, electrónico y manual debe de estar en óptimas condiciones.

Previo al ensayo

Inicialmente, los elementos involucrados en la adquisición de datos serán trasladados al lugar despejado donde se va a realizar el ensayo. En el aspecto mecánico se coloca en la posición inicial la cámara de combustión, comprobar la presurización de aire en el sistema de sensado de presión, que la termocupla este en contacto directo con la tobera. Además, el acelerómetro debe de empezar recogiendo datos en los tres ejes para que esté listo en el momento que inicie la prueba. Tener preparado un extintor cerca del área de trabajo en caso de alguna eventualidad. Preparar la carga con pólvora en un lugar seco y verificar que no exista fugas ni que el tabique interno se haya movido. Tener listos los puntos de enfoque de las cámaras de video para capturar un plano general y un plano específico que demuestre el movimiento del sistema.

Durante el proceso del ensayo

Durante el proceso, por seguridad se necesita tener al alcance el extintor con el seguro retirado en caso de un fallo en la prueba, tomar una distancia prudente del personal aproximadamente de 5 metros alrededor del BEMCO. El momento que se complete la adquisición de datos y el tiempo de combustión culmine es necesario detener la adquisición de datos para generar los .txt y .xlsx como respaldo del ensayo.

Ajuste de la cámara de combustión

Alinear la cámara de combustión dentro de las bridas de seguridad, se ajusta en primer lugar la posición que deseamos la termocupla. Se ajusta las dos bridas empezando por la posterior hasta que los bocines y los sistemas queden sin rozamiento en los ejes. Se debe de ajustar correctamente para que la cámara de combustión se encuentre fija y centrada.

Carga de la cámara de combustión

Sustraemos la cámara de combustión, retiramos la tapa superior para realizar un tabique de cartón recubierto de tela para evitar que la pólvora se derrame. Se introducirá la pólvora hasta el límite, después se baqueteará la pólvora para colocar la tobera. Se guarda un poco de pólvora para realizar una línea de inicio que cumpla la función de un mechero. En la parte inferior se encuentra un orificio de desfogue que debemos colocar un tapón.

Sensores

Dependiendo del lugar donde se realice las pruebas sierra o costa es necesario antes del experimento encerar el embolo para que la presión empiece desde cero. Además, el embolo debe estar alineado con la platina del sistema de empuje. Para el sensor de temperatura alinear a la tobera y ajustar en la posición deseada. Comprobar que el transductor de presión este sujetado correctamente sin fugas. El acelerómetro hay que verificar que este abierto el COM3 del puerto serial y que reciba datos reales.

Proceso después el ensayo

Al acabar el experimento esperar un tiempo prolongado alrededor de 10 minutos que se enfríen las partes mecánicas, tener en cuenta la pólvora que se esparce después del ensayo. Se pausa la recolección de datos y se almacena para procesarlos. Eliminar la alimentación del sistema electrónico y del controlador del acelerómetro. En caso de emergencia, alejar los dispositivos electrónicos que se encuentran cerca. Proceso inverso de las partes mecánicas aflojar las bridas y extraer la cámara de combustión con cuidado.

Mantenimiento

Para que el BEMCO sea usado para futuros estudios y complementar con el aumento del análisis de más variables es necesario un mantenimiento óptimo del mismo, el principal tópico después de cada ensayo es la limpieza, es decir, se debe tomar una dedicación para dejar el banco nuevamente en óptimas condiciones. Otro factor a considerar es la corrosión y el mantenimiento de las partes mecánicas, que se encuentren engrasadas correctamente, en un lugar a temperatura ambiente sin exposición al exterior.

Funcionamiento del sistema

El modelo de nuestro sistema de banco de pruebas registra todos los datos desde el momento en que se establece la conexión de Cliente-Servidor desde software de LabVIEW. Por lo tanto, se realiza primero el registro de datos previos al experimento en los cuales se verifican los valores de temperatura, presión y aceleración en estado de reposo. Los datos se irán registrando de manera visual en la interfaz del cliente y del servidor tal como se ve en la figura 48 y 49 respectivamente.

Figura 48

Interfaz gráfica del servidor registrando datos

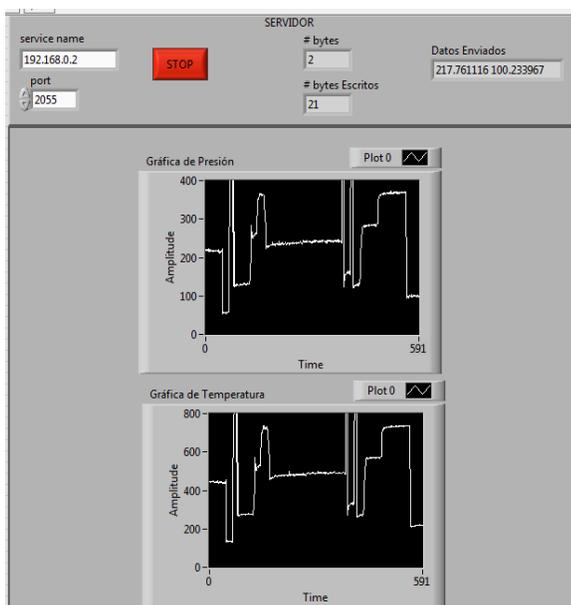
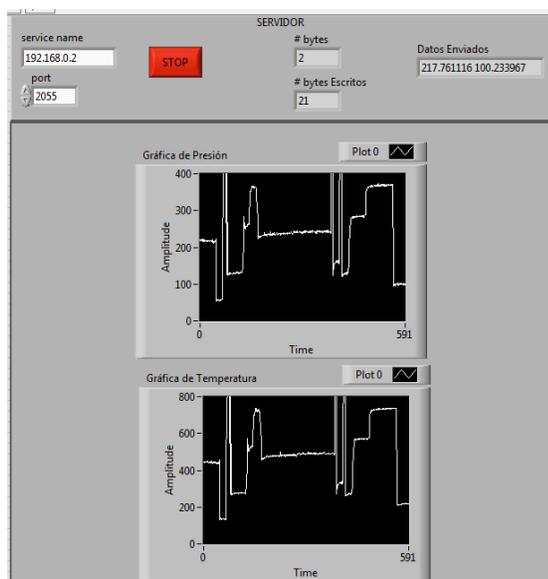


Figura 49

Interfaz gráfica del cliente registrando datos



El sistema de adquisición de datos empieza a capturar datos después de la ejecución del programa y los almacena en un archivo ".txt" tal como se muestra en la figura 50. Después de la prueba, se procesan los datos y se imprimen curvas para el análisis de los resultados en el software de Matlab.

Figura 50

Archivo de almacenamiento de datos.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0	28,752803	0,010775		
1	28,455907	0,013286		
2	28,352635	0,011497		
3	28,292214	0,010866		
4	28,85455	0,017133		
5	28,602071	0,015052		
6	28,604362	0,010923		
7	28,313618	0,019255		
8	28,817824	0,010398		
9	28,102447	0,011497		
10	28,406201	0,017428		
11	28,870621	0,014732		
12	28,485773	0,019255		
13	28,806352	0,018611		
14	28,853028	0,013509		
15	28,843077	0,019229		
16	28,442927	0,014141		
17	28,042007	0,0146303		
18	28,67017	0,017631		
19	28,83127	0,010813		
20	28,607422	0,012719		
21	28,347283	0,012371		
22	28,290674	0,015941		
23	28,669401	0,018006		
24	28,451339	0,016947		
25	28,850738	0,013148		
26	28,206502	0,019136		
27	28,614313	0,018747		
28	28,679352	0,013324		
29	28,698466	0,019299		
30	28,639566	0,01047		
31	28,299085	0,014005		
32	28,993793	0,191726		

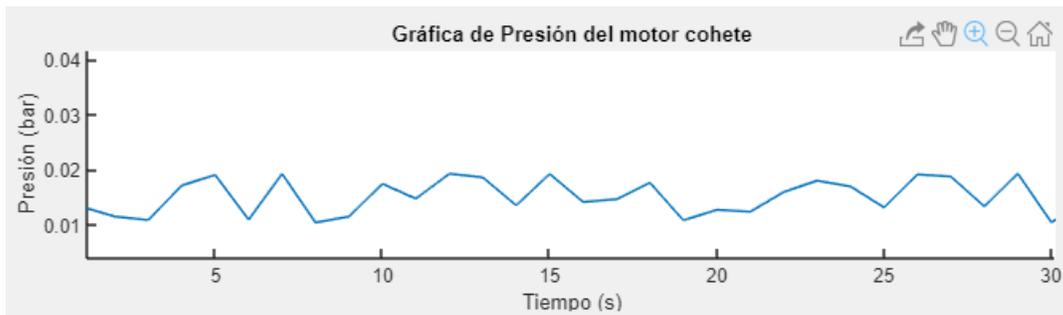
Nota. Archivo .txt generado al finalizar el ensayo con dos columnas voltaje y valor real.

Presión

La presión registrada por nuestra tarjeta de adquisición en estado de reposo se muestra en la figura 51, en estado de reposo el cohete no presiona al pistón por lo que se tiene una presión de 0 [bares], los datos se comprueban con el manómetro como se puede observar en la figura 52.

Figura 51

Gráfica de presión en estado de reposo.



Nota. Variación mínima la presión recibida por el DAQ en estado de reposo previo al ensayo.

Figura 52

Presión y Temperatura en estado de reposo



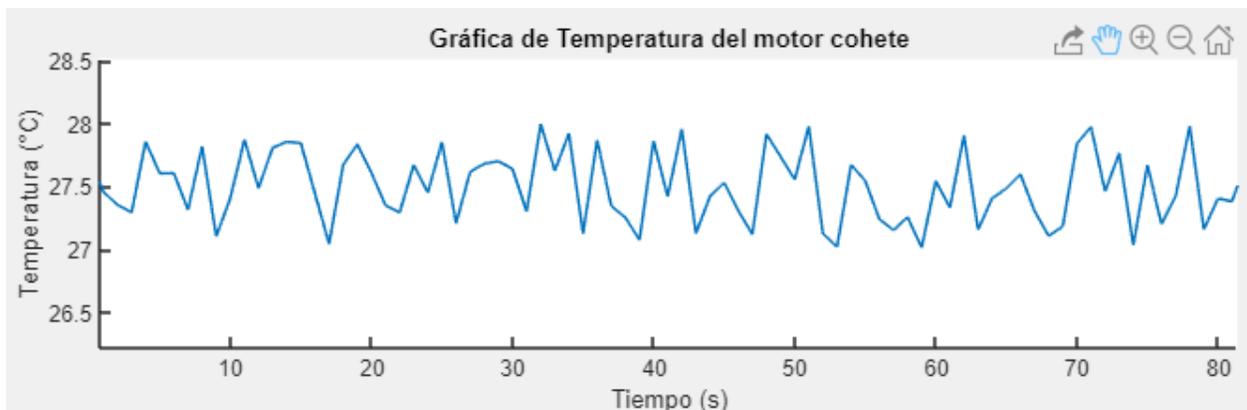
Nota. Manómetro presión de 0 [bar] calibrado con la válvula.

Temperatura

La temperatura que registra nuestra termocupla es de 27 [°C] tal como se ve en la figura 53 y los datos se comprueban mediante el indicador digital en la figura 54.

Figura 53

Gráfica de presión en estado de reposo.



Nota. Variación mínima de la temperatura en estado de reposo previo al ensayo.

Figura 54

Temperatura en estado de reposo



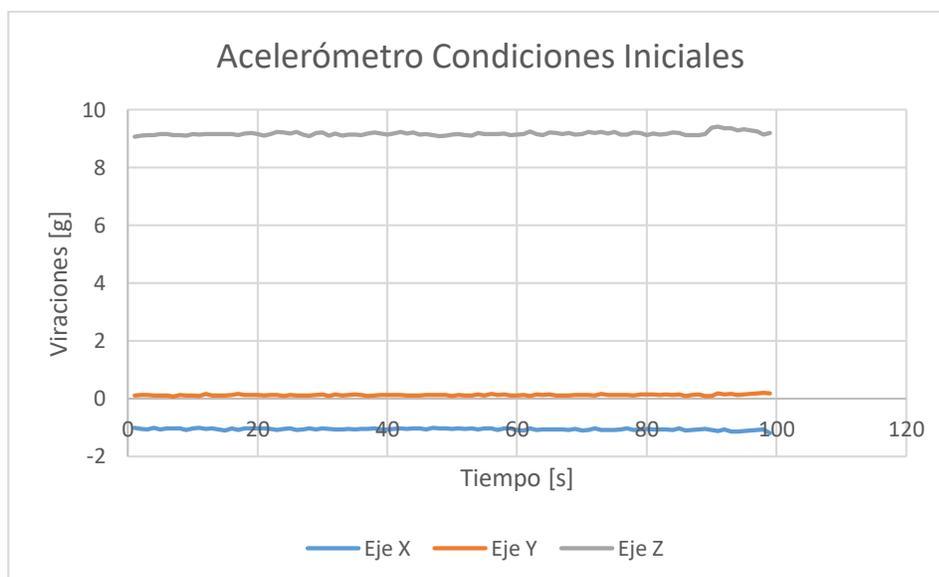
Nota. Indicador Digital de temperatura 27[°C].

Vibración

La aceleración en estado de reposo se muestra en la figura xx, la vibración registrada en los tres ejes por puerto serial en condiciones iniciales el eje x se establece en -1, el eje y se encuentra en 1 y el eje z se mantiene en 9.1 debido a la influencia de la gravedad. De esta manera, se comprueba que el acelerómetro se encuentra funcional permaneciendo constante durante el tiempo previo de la prueba, ver figura 55.

Figura 55

Aceleración en estado de reposo 3 ejes



Nota. Variación mínima de los tres ejes en estado de reposo previo al ensayo.

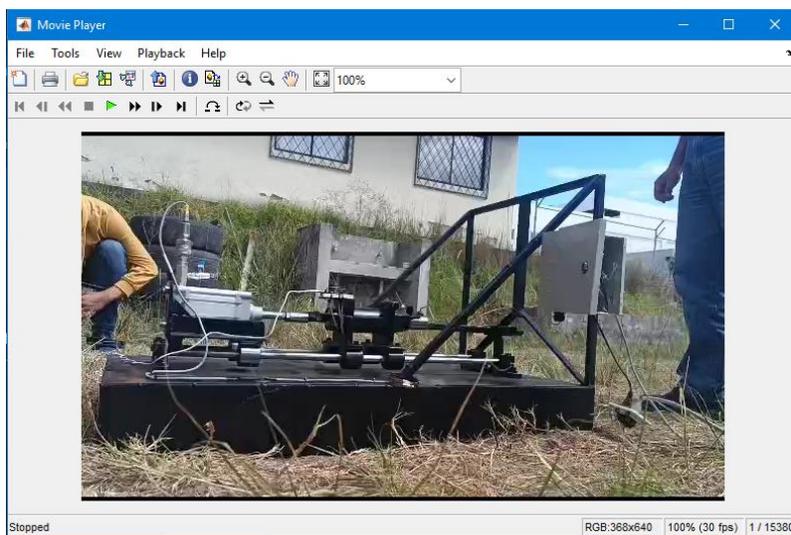
Teniendo en cuenta que nuestro sistema realiza el correcto registro de datos, a continuación, se muestra el comportamiento de las variables de presión, temperatura y vibración generadas por el motor cohete en la fase de despegue.

Video

Las grabaciones registradas por los celulares se abren desde la interfaz gráfica de Matlab como se muestra en la figura 56, la interfaz permite controlar la reproducción de video en donde se verifica todo el proceso, desde la fase de reposo hasta la fase de experimentación.

Figura 56

Reproducción de material fílmico estado de reposo

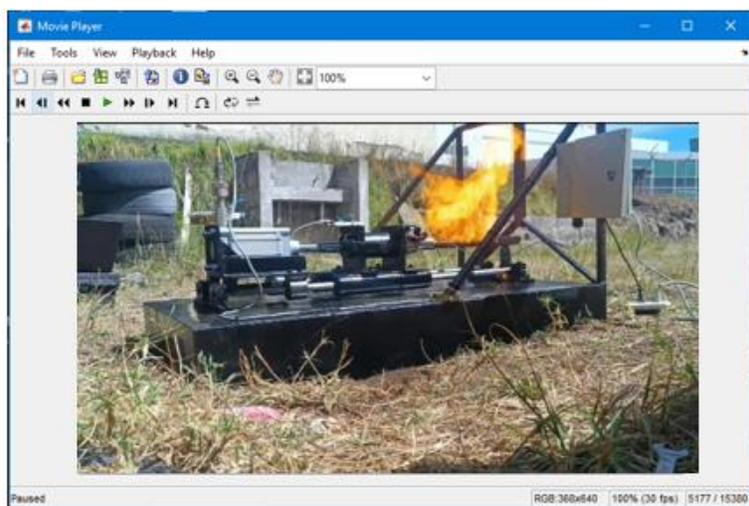


Nota. Evidencia en video preparación de los elementos electrónicos y mecánicos para el ensayo.

Se evidencia en el material fílmico el proceso de encendido de la mecha, la llama generada y el empuje ocasionado. En las figuras 57 y 58 se muestran los eventos registrados.

Figura 57

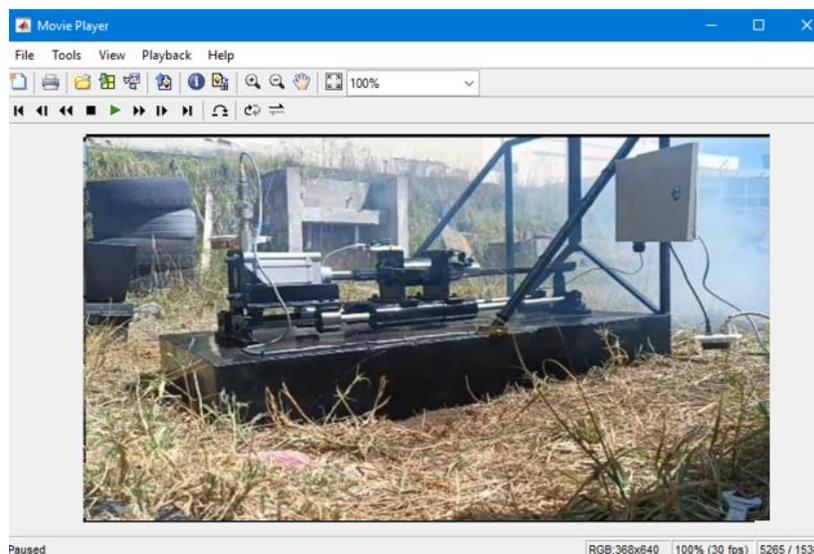
Llama generada en la fase de experimentación



Nota. Evidencia en video del momento inicial que se enciende la pólvora.

Figura 58

Empuje generado en la fase de experimentación



Nota. Evidencia en video del empuje generado por la tobera.

Análisis de resultados

El lugar escogido para las pruebas del ensayo fue la parte posterior del galpón del CICTE ubicado en Sangolqui en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Se realizó la primera prueba experimental con un 20 % de pólvora, con la intención de probar la estructura del BEMCO, su resista y el esfuerzo mecánico, para la primera prueba no se conectaron los equipos electrónicos, sin embargo, si se cumplió el protocolo de pruebas establecido.

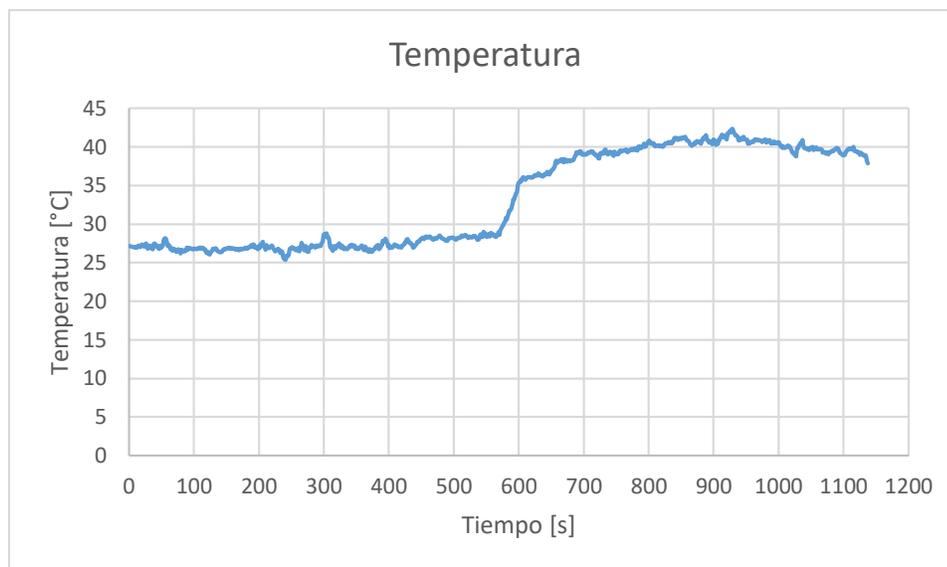
Interpretación de los resultados

Temperatura

La termocupla está en contacto con la parte superior de la tobera y no está en contacto directo con la llama generada, teniendo esto en cuenta la temperatura registrada alcanza los 43 [°C] partiendo de 27 [°C] tal como se ve en la figura 59, la temperatura ira disminuyendo conforme pasa el tiempo.

Figura 59

Gráfica de temperatura en fase de experimentación

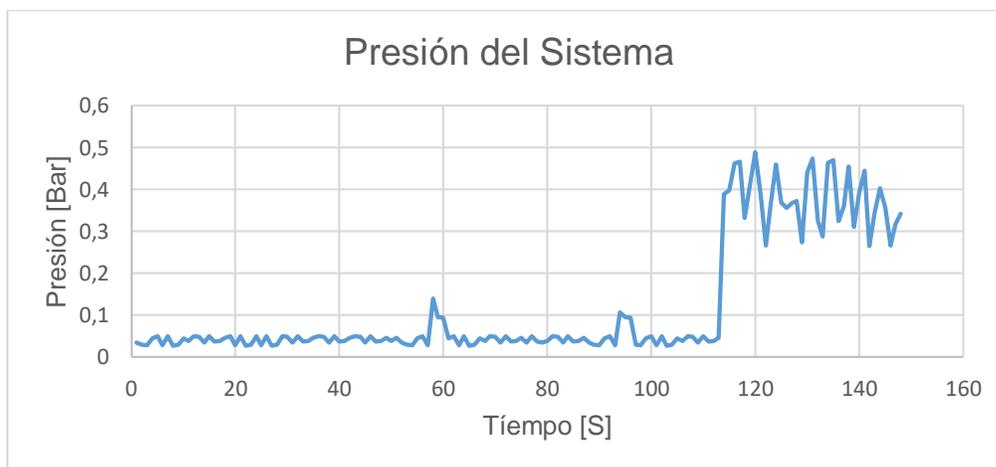


Presión

Como se observa en la figura 60, al combustionar el motor cohete procede a empujar el pistón, se verifica que la presión va aumentando y llega a un punto que ya no genera más fuerza produciendo una presión desde 0 [bar] hasta 0.5 [bar], el motor cohete produjo una presión más alta de 0.5 [bar] que equivale a 7.25 [psi] y 50000 [Pa].

Figura 60

Gráfica de Presión en fase de experimentación



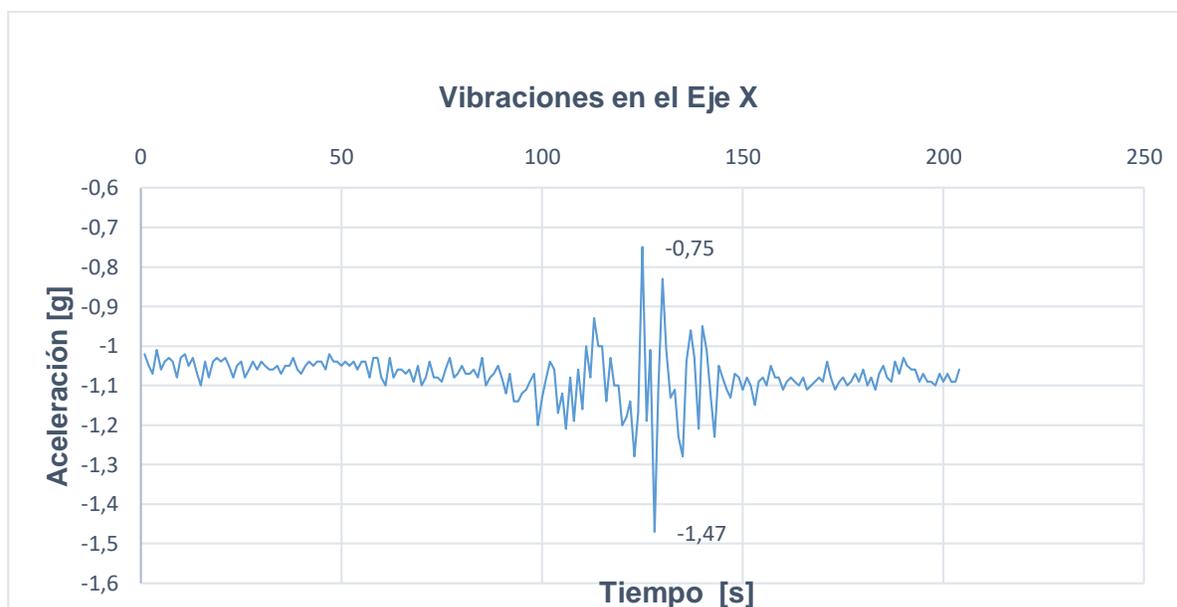
Vibraciones

Como lineamientos generales el acelerómetro detectara siempre un nivel mínimo de vibración, puede ser afectado por que las pruebas son realizadas en un ambiente externo y existen factores como el viento, también, la gravedad influye en la lectura de los 3 ejes del acelerómetro.

Vibraciones en el Eje X

Figura 61

Datos recolectados en el eje x por el acelerómetro

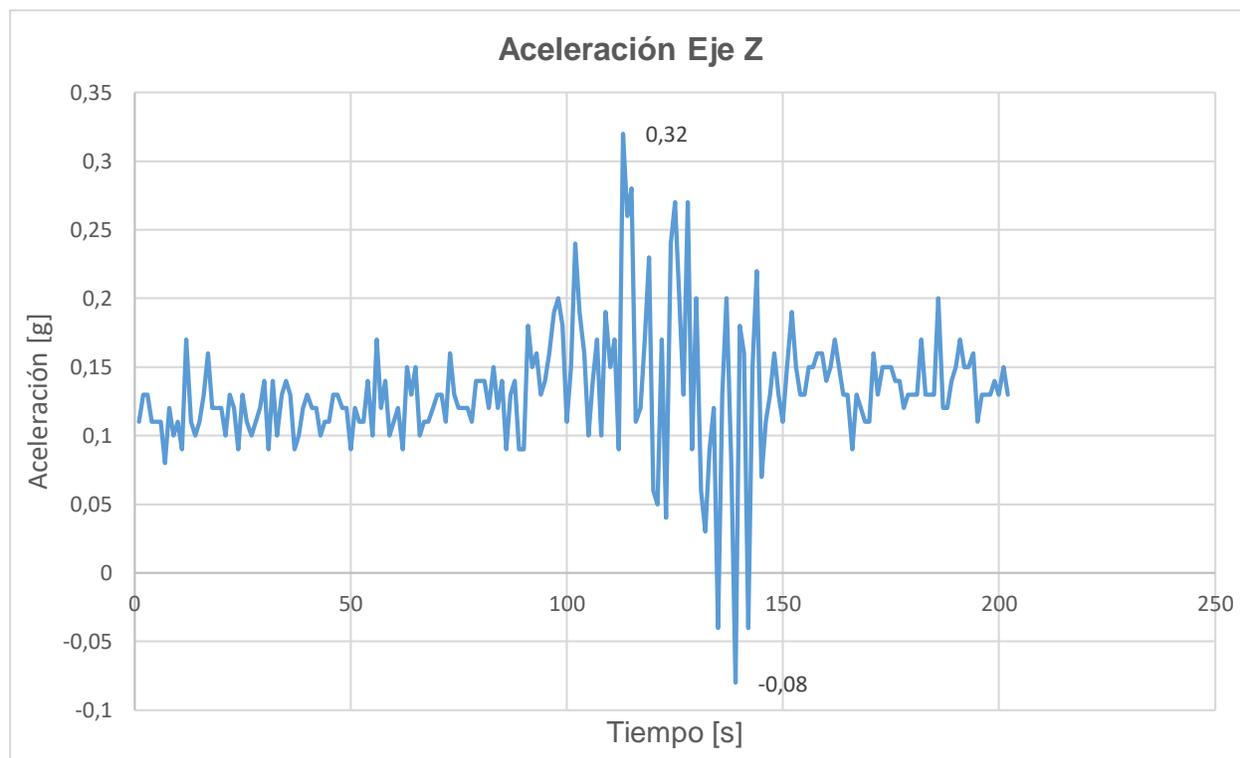


En la figura 61, se interpreta que el punto más alto de vibración es de de -0.75 g ocurre a 0.36 segundos, caso contrario, el punto mínimo ocurre a 0.42 segundo con el valor de -1.47 g. Las vibraciones siguen oscilando hasta culminar el experimento donde se volverá a estabilizar en el valor de -1. El rango de las vibraciones en el eje X es mínimo por lo que se asocia a una ráfaga horizontal de viento despreciable debido a que este paralelo al plano inferior.

Vibraciones en el Eje Z

Figura 62

Datos recolectados en el eje z por el acelerómetro

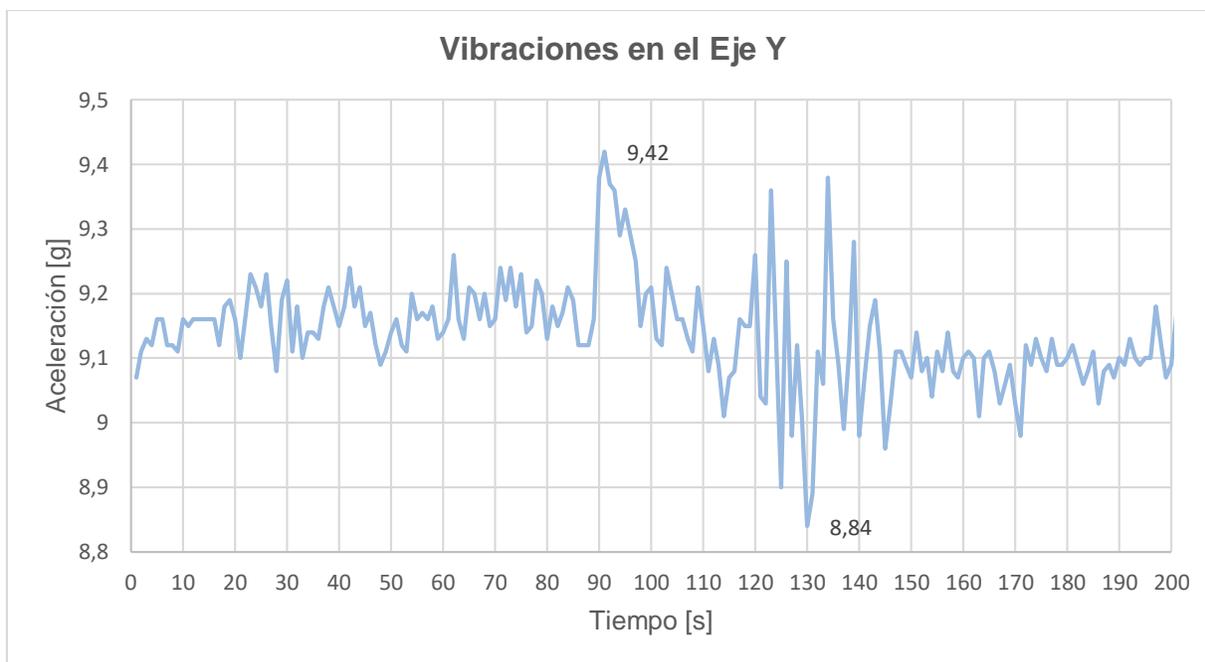


En la figura 62, se interpreta que el punto más alto de vibración es de 0.32 g ocurre a 42 segundos, caso contrario, el punto mínimo ocurre a 98 segundo con el valor de -0.08 g. Las vibraciones siguen oscilando hasta culminar el experimento donde se volverá a estabilizar en el valor de 0.1. El rango de las vibraciones en el eje z es mínimo por lo que se asocia a una ráfaga horizontal de viento despreciable debido a que se encuentra paralelo al plano inferior.

Vibraciones en el Eje Y

Figura 63

Datos recolectados en el eje y por el acelerómetro



En la figura 63, se interpreta que el punto más alto de vibración es de 9.42 g ocurre a 35 segundos, caso contrario, el punto mínimo ocurre a 99 segundo con el valor de 8.84 g. Las vibraciones siguen oscilando hasta culminar el experimento donde se volverá a estabilizar en el valor de 9.1. El rango de las vibraciones en el eje y es más significativo que los ejes anteriores por lo que se asocia a la gravedad y agentes externos. Hay varios picos altos una vez acabado el experimento, pero se los puede asociar a movimientos externos del BEMCO.

Caracterización y análisis

El modelado matemático que usaremos para representar las variables medidas es la función de transferencia, donde con una entrada escalón adaptada para cada caso tendremos un modelado de como actúa su salida. En la industria experimental usualmente se aplican estos métodos para determinar el comportamiento cuando con las matemáticas se dificulta su desarrollo por el manejo de expresiones algebraicas de alto orden.

Temperatura

Se utilizará la herramienta de Matlab llamada System Identification, donde extraeremos los vectores que recibimos mediante el cliente – servidor, es necesario un vector escalón, la lectura en función de la temperatura junto al intervalo de tiempo que se obtuvo la muestra. El tamaño de las muestras debe de ser el mismo para facilitar el cálculo.

Figura 64

Vectores en Matlab para buscar la función de transferencia de temperatura



```

Teoria complementaria.txt x ident.m x ModeladoTemp.m x +
%Temperatura
clear all
clc
Temp=xlsread('Libro1.xlsx','E1:E1137');
T=xlsread('Libro1.xlsx','A1:A1137');
Esc=xlsread('Libro1.xlsx','F1:F1137');
datos = iddata(Temp,Esc,1)
  
```

Name ^	Value
datos	1137x1 iddata
Esc	1137x1 double
T	1137x1 double
Temp	1137x1 double
Temp0	1137x1 double

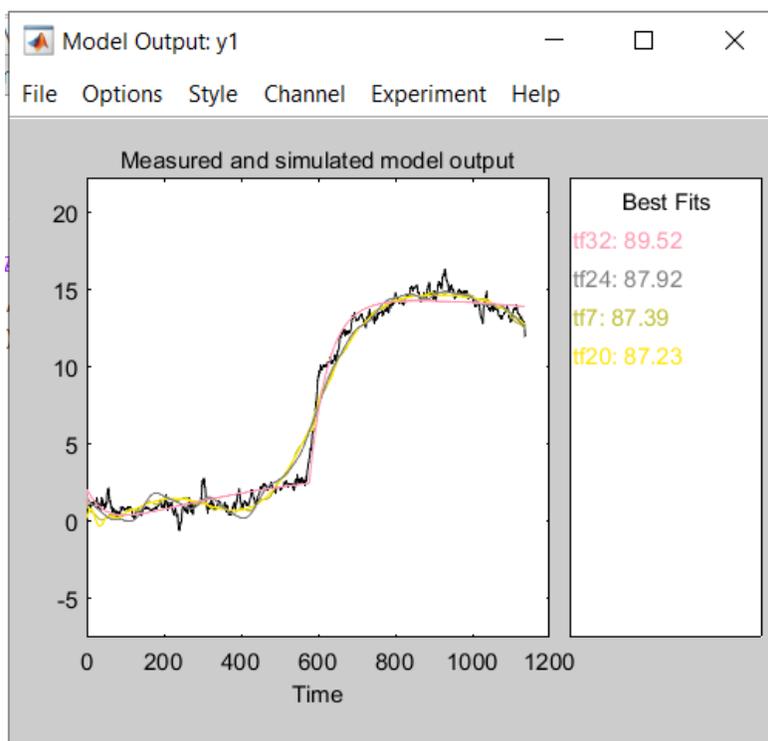
Nota. Editor de Matlab para generar vectores de temperatura necesarios para identificar la planta.

Se importa como entrada de nuestro sistema el vector Esc y como salida del mismo el vector Temp0, en la función Transfer Function Model nos permite escoger el número de polos y ceros. Se realizó 32 veces la búsqueda de la mejor función de transferencia variando el número de polos y ceros dando como mejor resultado la función que contiene 2 ceros y 4 polos, en la

figura 65 podemos ver la relación entre la salida junto a la función de transferencia, teniendo un 90% como mejor rendimiento.

Figura 65

Comparación salida de temperatura con el modelo matemático



Nota. Modelado de la salida de temperatura en comparación con la función de transferencia.

La ecuación con el mejor fit posee un error de predicción final (FPE) de 0.4281, el error cuadrático medio (MSE) de 0.4198 y finalmente el porcentaje de ajuste más alto de todas las iteraciones de 89.52.

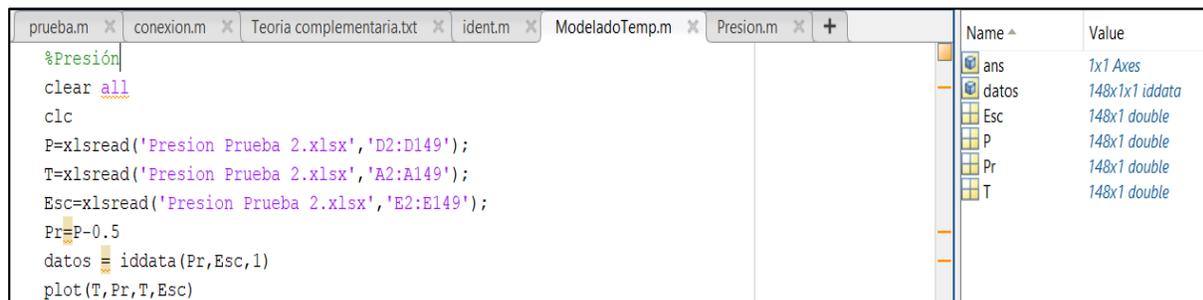
$$T(s) = \frac{-1.401s^2 - 0.0007877s - 6.4 \times 10^{-7}}{s^4 + 5.656s^3 + 0.1244s^2 + 8.75 \times 10^{-05}s + 6.453 \times 10^{-8}}$$

Presión

Se utilizará la herramienta de Matlab llamada System Identification, donde extraeremos los vectores que recibimos mediante el cliente – servidor desde el NI PXIe-1082, es necesario un vector escalón, la lectura en función de la presión junto al intervalo de tiempo que se obtuvo la muestra. El tamaño de las muestras debe de ser el mismo para facilitar el cálculo.

Figura 66

Vectores en Matlab para buscar la función de transferencia de presión



```

%Presión
clear all
clc
P=xlsread('Presion Prueba 2.xlsx','D2:D149');
T=xlsread('Presion Prueba 2.xlsx','A2:A149');
Esc=xlsread('Presion Prueba 2.xlsx','E2:E149');
Pr=P-0.5
datos = iddata(Pr,Esc,1)
plot(T,Pr,T,Esc)

```

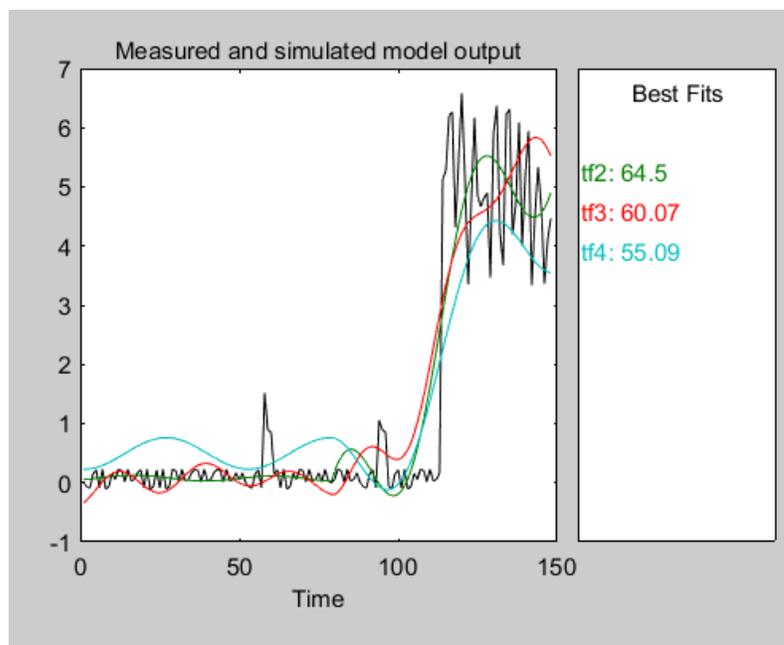
Name	Value
ans	1x1 Axes
datos	148x1x1 iddata
Esc	148x1 double
P	148x1 double
Pr	148x1 double
T	148x1 double

Nota. Editor de Matlab para generar vectores de presión necesarios para identificar la planta.

Se importa como entrada de nuestro sistema el vector Esc y como salida del mismo el vector Pr, en la función Transfer Function Model nos permite escoger el número de polos y ceros. Se realizó 44 iteraciones la búsqueda de la mejor función de transferencia variando el número de polos y ceros dando como mejor resultado la función que contiene 8 ceros y 8 polos, en la figura 67 podemos ver la relación entre la salida junto a la función de transferencia, teniendo un 64.5% como mejor rendimiento a la interacción número 36.

Figura 67

Comparación salida de presión con el modelo matemático



Nota. Modelado de la salida de presión en comparación con la función de transferencia.

La ecuación con el mejor fit posee un error de predicción final (FPE) de 0.6394, el error cuadrático medio (MSE) de 0.5661 y finalmente el porcentaje de ajuste más alto de todas las iteraciones de 73.87.

$$P(s) = \frac{0.01023s^2 - 0.001242s + 8.3 \times 10^{-5}}{0.001009s^3 + 0.004829s^2 + 7.64 \times 10^{-6}s + 3.21 \times 10^{-5}}$$

Conclusiones

Se implementó el prototipo del banco de pruebas horizontal con medidas de 120 cm x 70 cm x 90 cm, el proceso de diseño y construcción fue esencial en el producto final, se desarrollaron varias etapas de diseño, selección de materiales y subsistemas mecánicos hasta lograr el BEMCO deseado. El sistema de anclaje es una fosa de 15 cm al suelo y asegurados en todos los laterales por varillas enterradas para asegurar una buena adquisición de datos.

La instrumentación de las variables físicas en el caso de la temperatura se usó una termopila tipo K con rango de 0 a 100 °C conectada a una pastilla como transmisor de temperatura Pixyxs, para la presión se usó un transmisor de presión de 0 a 13 bares conectado a un conversor de corriente a voltaje, para las vibraciones se usó el MPU9250 que puede detectar la aclaración de los 3 ejes coordenados junto al ESP32 para enviar los datos mediante I2C al computador.

Los circuitos electrónicos fueron diseñados y desarrollados para adquirir y acondicionar el transmisor de presión PT200psig, la termocupla tipo K y el MPU-9250. El uso y programación a través del convertidor TC-RTD y la conexión al dispositivo TP4-MC18, se integran fácilmente con el módulo de adquisición de datos NI Pxl-6361. Esto garantiza la captura de información relevante con precisión y confiabilidad durante las fases de reposo y experimentación del misil.

La interfaz gráfica de usuario desarrollada tanto en LabView como en Matlab, son extremadamente funcionales y fácil de usar, permite el seguimiento y el registro en tiempo real del comportamiento de las variables de presión, temperatura y vibración producidas por el misil SAM en las fases de reposo y experimentación. Las interfaces facilitan la visualización, carga y reproducción de archivos y correspondientes al análisis instantáneo de los datos recopilados, lo

que proporciona una valiosa herramienta para la toma de decisiones y el desarrollo del rendimiento en fases de prueba.

Durante las pruebas realizadas en el misil superficie aire (SAM), se utilizó las cámaras de video proporcionadas por los celulares para realizar un registro audiovisual minucioso. Estas grabaciones han sido cruciales para la observación y el análisis del comportamiento de nuestro banco de pruebas, ya que permiten encontrar posibles mejoras y detectar cualquier anomalía en el sistema.

Los datos recopilados por la termocupla tipo K ubicada en la parte superior de la tobera del sistema experimentó una temperatura inicial de 27 °C ascendiendo hasta los 43 °C, seguido de un descenso gradual con el tiempo. Sin embargo, debido a que la termocupla no está en contacto directo con la llama y otros factores externos pueden influir en las mediciones térmicas, es importante tener precaución al interpretar estos resultados.

Se observó que durante el proceso de combustión del motor cohete, al empujar el pistón, la presión aumentaba gradualmente. No obstante, se determinó que llegó a un momento crucial en el que ya no pudo obtener mayor fuerza. La presión alcanzó un máximo de 0.5 bar durante este ciclo de combustión, lo que equivale a 7.25 psi y 50000 Pa. La presión máxima de 0.5 bar es crucial porque indica el rango operativo en el que se puede obtener la máxima fuerza propulsora. Las vibraciones en el eje Y son considerablemente mayores a los ejes X y Z con un punto máximo de 9.42 g y un punto mínimo de 8.84 g en relación al eje de 9.1.

Los modelos matemáticos de las toberas serán representados por funciones de transferencias, para la temperatura fue necesario realizar 32 iteraciones, donde se determinó que el mejor fit se logra con 2 ceros y 4 polos, asimismo, para la presión fue necesario 44 iteraciones, donde

se determinó que el mejor fit posee 2 ceros y 3 polos. Al obtener las funciones de transferencia se obtiene más información del comportamiento del BEMCO en relación a las variables medidas.

Recomendaciones

Se recomienda un estudio de los materiales del BEMCO que soporte el esfuerzo del ensayo, soldadura de alto nivel, materiales livianos para sujetar la cámara de combustión, colocar bocines en los ejes para eliminar fuerza de rozamiento, además, cubrir con pintura anticorrosiva para alargar la vida útil del banco de pruebas.

Realizar las pruebas del ensayo siguiendo el protocolo de seguridad, siempre con un extintor retirado el seguro listo para actuar, cuidar la integridad de los alrededores y durante la prueba ubicarse a una distancia prudente.

Para garantizar un funcionamiento seguro y adecuado en futuros lanzamientos, es fundamental tener en cuenta el valor de la presión máxima que puede generar el misil (SAM) para optimizar la eficiencia y el rendimiento del sistema.

Es recomendable realizar análisis adicionales y considerar otras variables externas como el calor, el viento y los rayos solares que van directo a la termocupla tipo K para una comprensión más completa y precisa del comportamiento térmico del sistema.

Bibliografía

- Acevedo, E., & Morales, J. (2019). *Adquisición y procesamiento de señales eléctricas de un banco de pruebas para motores de combustión interna*.
https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/2846/Acevedo_Edwin_Morales_Juan_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Apex Waves. (s.f.). *National Instruments PXIe-6361 PXI Multifunction I/O Module*. Recuperado el 12 de Abril de 2023, de https://www.apexwaves.com/modular-systems/national-instruments/x-series/PXIe-6361?gclid=CjwKCAjwrDmhBhBBEiwA4Hx5g7ZKL3qrp0wU1LqrfBSSAaTh4g_Yq0mqBChY9NkbGHxiEYkBrcaubhoCcFIQAvD_BwE
- Apex Waves. (s.f.). *National Instruments PXIe-8115 Controller*. Recuperado el 12 de Abril de 2023, de https://www.apexwaves.com/modular-systems/national-instruments/pxi-controllers/PXIe-8115?gclid=CjwKCAjwrDmhBhBBEiwA4Hx5g0sJ9_we3UIMLdVtjDx7jEiU8pv0LV0XAeHdbmxLluUKULrt-T8uphoC2FoQAvD_BwE
- Arboleda Cardenas, A., & Arrechea Rivas, M. C. (25 de 02 de 2022). Diseño de banco de pruebas de control de empuje para motores cohete de propelentes sólidos de la Fuerza Aérea Colombiana. Universidad Autónoma de Occidente.
- Arenas Andrade, D. Y. (2019). *Diseño y análisis estructural preliminar de un banco de pruebas para cohetería experimental*.
<https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/5592/Dise%C3%B1o%20y%20an%C3%A1lisis%20estructural%20preliminar%20banco.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arrechéa Rivas, M. C., & Arboleda Cárdenas, A. (2022). *Diseño de banco de pruebas de control de empuje para motores cohete de propelentes sólidos de la fuerza aérea Colombiana*. <https://red.uao.edu.co/handle/10614/14008>

- Brito Calleja, J. F. (2011). Diseño y Evaluación Conceptual de un Motor Cohete de Combustible Sólido. Universidad Simón Bolívar.
- Brown, C., Chewakin, E., Feldman, M., Lima, A., Lindholm, N., Lipscomb, C., . . . Sobol, J. (2016). Solid Propellant Additive Manufacturing (SPAM). University of Colorado at Boulder Aerospace Engineering Services.
- Cappa, A. P., & Salazar, R. T. (2019). Diseño de tobera de motor de combustible sólido para el posicionamiento de nanosatélites en órbita baja. *INGENIO*, 9-28.
- Cases Sanchez, P. J. (2014). Estudio del Flujo en la Tobera del Motor Cohete J-2S Mediante Técnicas CFD. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Ceron, O. (2017). Diseño de un banco de pruebas para un motor cohete tipo híbrido. Calí, Colombia: Universidad del Valle.
- Chicaiza León, L. U., & Ramírez Chiluisa, M. S. (2020). Diseño y construcción de un banco de ensayos estático tipo horizontal para evaluar el comportamiento de motores cohete amateurs de propelente sólido clase candy con un impulso de 40.00 N.S. hasta 320.00 N.S. Sangolqui, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Mecatrónica.
- Cruz Herrera, S. (2019). *Diseño de un sistema de adquisición y visualización de datos de sensores inerciales y atmosféricos para cargas útiles de globos estratosféricos*. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/3365>
- Cuzme Criollo, E. S. (2010). *Sistema de monitoreo y control remoto utilizando la herramienta gráfica Labview para tanques de almacenamiento de combustible*. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/158>
- Graciano Pérez, D. A. (2016). *Caracterización de la combustión y balística interna de propelentes sólidos heterogéneos basados en resina epóxica y nitrato de potasio para aplicaciones en motores cohete*. <https://core.ac.uk/download/pdf/286654153.pdf>

- Grupo Kistler. (Febrero de 2023). *Conozca su motor de cohete de memoria: con la tecnología de prueba y medición de Kistler*. <https://www.kistler.com/US/en/rocket-engine-testing/C00000057>
- Heufer, K. A. (03 de Agosto de 2022). *Physico-Chemical Fundamentals of Combustion*. Aachen, Alemania: University RWTH AACHEN.
- Houcque , D. (2005). *Introduction to Matlab for engeneering students*. <https://www.mccormick.northwestern.edu/documents/students/undergraduate/introduction-to-matlab.pdf>
- InvenSense. (2014). *MPU-9250 Especificaciones del Producto*. Obtenido de <https://www.icpartonline.com/datasheet/2f/MPU-9250.pdf>
- Jacome Vega, A. E., & Carrillo Calero, A. S. (Septiembre de 2012). Diseño de una plataforma automatizada de lanzamiento de misiles tierra-aire de corto alcance e implementación del sistema de automatización diseñado en una plataforma militar semejante. Carrera de Ingeniería en Mecatrónica. ESPE. Sede Sangolquí. SANGOLQUÍ / ESPE /2012. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/5683>
- Jurado, M., & Riquelme, J. (2019). Diseño de un prototipo de misil teledirigido con capacidades para destruir blancos de alto valor. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa, IV(8)*, 1-23. <http://geo1.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2019/06/1.pdf>
- Kodosky, J. (2020). LabVIEW. *Actas de la ACM sobre lenguajes de programación*, 1-54.
- Lacruz, L., Parco, M. A., Santos Rafael, Torres , C., Perez, J., Benitez, P., . . . Serrano, C. (2015). Análisis experimental de la eficiencia en un motor de combustible sólido para cohete sonda. *Universidad Ciencia y Tecnologia*, 4-10.
- Martin Marín, C., Pineda Carillo, O. F., & Rivera Medina, J. C. (2011). SADA - sistema de adquisición de datos de una aeronave no tripulada. Universidad Javeriana. <http://hdl.handle.net/10554/7060>

- Martins, F. P. (2017). EMPREGO DO MÍSSIL IGLA-S NA DEFESA ANTIAÉREA DA REGIÃO AMAZONICA. 11-13. Rio de Janeiro: ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS.
- Moreno Roig, J. (2011). *Diseño y construcción de una base de pruebas de motores de cohete amateurs*. <https://1library.co/title/disen-construccion-banco-pruebas-motores-cohete-amateurs>
- Muñoz Mónico, L. F., Ordury Rodriguez, J., Rodriguez Ramirez, A. F., & Higuera, R. (2022). Diseño conceptual de un banco de pruebas estático para motores de cohería tipo G y K. *Ciencia y Poder Aéreo*, 17.
- Nakka, R. (2016). *Teoría Sobre Motores Cohete De propelente Sólido*. Obtenido de https://www.nakka-rocketry.net/articles/teoria_de_los_motores_cohete.pdf
- National Instruments. (2011). *NI PXIe-8115 User Manual*. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/pxie-8115-getting-started/resource/373615a.pdf>
- Ordoñez Cardenas, G. (27 de Noviembre de 2010). Diseño y Fabricación de un banco de pruebas para motores cohete liquidos de hasta 10 toneladas de empuje. Callao, Peru: Instituto de Investigacion de la Universidad Nacional del Callao.
- Pixsys. (s.f.). *Convertidor TC-RTD*. Obtenido de https://www.tme.eu/Document/c9a2ab820855b1e2a4519931724472b4/2000.35.015en_inst.pdf
- Poli , M., Bresannin , N., Madonna, A., Pezzato, M., Di Lorio, E., Mastrangelo, A., & Rodighiero, F. (06 de Agosto de 2015). A sounding Rocket as a test bech for cost effective measurements. Torreglia, Italia: University of Padua.
- Pullaguari, G. G., & Yascaribay , M. V. (2013). *Diseño e implementación de un sistema digital de adquisición y visualización de señales de un motor de combustión A12*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4204/1/UPS-CT002596.pdf>
- Redondo Calle, C. (Febrero de 2009). Motor Cohete de Combustible Liquido. Madrid: Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Aeronauticos.

- Robayo Salazar, R. A., Portocarreño Hermann, J., Meneses Suta, J., Salgado Díaz, J., & Martínez Riaño, S. (2021). Diseño, construcción y prueba estática experimental de un motor-cohete de combustible sólido. *UIS Ingenierías*, 97-108.
- Sánchez Pozo, L. M. (2015). *Diseño e implementación de un banco de pruebas para el contraste de instrumentos de las variables físicas temperatura y presión*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11408/1/UPS-GT001578.pdf>
- Smirnov, N., Betelin, V., Shagaliev, R., Nikitin, V., Belyakov, I., & Deryugin, Y. (2014). Hydrogen fuel rocket engines simulation using LOGOS code. *International Journal of Hydrogen Energy*, 10748-10756.
- Sutton, J. W., & Chichester, B. L. (1992). *Elementos de propulsión de cohetes: una introducción a la ingeniería de cohetes: sexta edición*. El Diario Aeronáutico.
- Tei. (s.f.). *Especificación Técnica Cable para termopar tipo K*. Obtenido de <http://teii.com.mx/Cable-termopar-K.pdf>
- Tolentino Masgo, S., Parco, M. A., Caraballo, S., Lacruz, L., Marcano, V., & Ferreira J, J. (27 de Octubre de 2020). Análisis numérico del comportamiento del flujo en la sección de la garganta de una tobera cónica experimental. Quito: Enfoque UTE.
- Turck. (s.f.). *Transmisor de presión PT200PSIG-1014-I2-H1143*. Obtenido de https://www.turck.de/datasheet/_en/edb_6836952_gbr_en.pdf
- Vega Moreno, J. A., & Leyton Moreno, J. (2016). Optimización de un motor de combustible sólido tipo KNSB para cohetería experimental. *CIENCIA Y PODER AEREO*, 182-193.

Apéndices