



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Cuna de héroes, crisol de pensadores

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Diseño conceptual de un banco de pruebas para pulsorreactores

Tesis que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Presenta:

Ing. Marcelo Tenorio Guzmán

Asesores de tesis:

M.C. Miguel Villagómez Galindo

Dr. Gilberto González Avalos

Morelia, Michoacán, Noviembre del 2017.



DEDICATORIA

A...

Mi esposa.
Andrea Corona Robledo

Mis papas.
Ma. Beatriz Guzmán Ibarra
José de Jesús Tenorio Amaro

Hermanos.
Ma. De la Cruz Tenorio Guzmán
Juan Pablo Tenorio Guzmán
Felipe de Jesús Tenorio Guzmán
Diana Paloma Tenorio Guzmán
David Tenorio Guzmán
Diego Isaid Tenorio Guzmán

Sobrinos.
Maricarmen Tapia Tenorio
José Rodrigo Tapia Tenorio
Sebastián Ávila Corona

Suegros y cuñados
Rosa Imelda Robledo Verduzco
Adolfo Corona Magaña
Natalia Corona Robledo
Adolfo Corona Robledo
José Trinidad Tapia Mercado
Luz Adriana Galeote Olivarez

Amigos
Rubén Ramírez Herrera
Valdemar Conejo Hernández
Atziri Contreras
Martin Ricardo Martínez Álvarez
Francisco Paz Zavala
Javier Ortiz Ortiz



AGRADECIMIENTOS

A...

Dios por permitirme tener vida y las cualidades necesarias que me permiten superarme.

Mi esposa y familia por sus consejos, apoyo y ser lo que me motiva día con día.

Mis asesores y sinodales por formar parte de este proyecto y sus aportaciones que me permitieron crecer profesionalmente.

CONACYT por el apoyo que me permitió realizar los estudios de maestría.



ABSTRACT

This research proposed the design of a test equipment for the characterization of small, or scale pulse jet. The testbed can measure some operating conditions such as temperature in areas along the pulse jet engine, pressure in the combustion chamber, fuel flow, and thrust, it help the characterization, and we get a tool to future research in pulse jet engines. The performance measurement of the testbed was carried out taking the data obtained by the research done by Litke et al. [1] in which was evaluated a 1/5 scale engine of the Argus V-1 engine used by the German Navy in the Second World War.

Keywords: Testbed, banco de pruebas, mechanical design, pulsorreactor, pulse jet.



RESUMEN

Se planteo el diseño de un banco de pruebas para el estudio de pulsorreactores en pequeño o a escala. Este banco de pruebas es capaz de medir algunas condiciones de funcionamiento como son temperatura en áreas a lo largo del motor, presión en la cámara de combustión, flujo de combustible y fuerza de propulsión, ayudando a la caracterización y obteniendo una herramienta de estudio de futuras investigaciones en motores pulse jet. Para la validación de datos obtenidos por el banco de pruebas y su medición de desempeño se tomó como referencia datos obtenidos en el estudio realizado por Litke et al. [1] en cual fue evaluado un motor escala 1/5 del motor Argus V-1 utilizado por la marina alemana en la segunda guerra mundial.

Palabras claves: Testbed, Banco de pruebas, diseño mecánico, Pulsorreactor, pulse jet.



ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ABSTRACT	iv
RESUMEN	v
LISTA DE IMÁGENES	8
LISTA DE TABLAS	10
NOMENCLATURA	11
ABREVIATURAS	12
GLOSARIO	13
Capítulo 1 Introducción	14
1.1. Justificación	15
1.2. Hipótesis	15
1.3. Objetivos y aportaciones esperadas	15
1.3.1. Objetivo general	15
1.3.2. Objetivos específicos	16
1.3.3. Aportaciones esperadas	16
1.4. Metodología	16
1.5. Trabajos relacionados con la presente tesis.	18
Capítulo 2 Estado del arte	19
2.1. Introducción	19
2.2. Antecedentes	21
	22
2.3. Aplicaciones de los Pulsorreactores	24
2.4. Caracterización y pruebas de funcionamiento de pulse jet	25
Capítulo 3 Dimensiones de Pulse Jet admisibles y magnitudes a medir en banco de Pruebas.	29
3.1. Introducción	29
3.2. Dimensionamiento de motor	29
3.3. Características de funcionamiento motor Argus escala 1/5.	30
3.4. Variables y Magnitudes que medir en Banco de Pruebas	34
3.4.1. Fuerza de Empuje	35
3.4.2. Flujo de Combustible	36
3.4.3. Temperatura	37
3.4.4. Presión en cámara de combustión	37



3.4.5. Frecuencia	38
3.4.6. Flujo de Aire	38
Capítulo 4 Diseño Estructural Banco de Pruebas.	39
4.1. Introducción	39
4.2. Estructura inferior de Banco de Pruebas	39
4.3. Estructura Superior de Banco de Pruebas.	40
4.4. Materiales	41
4.5. Ensamble Banco de Pruebas	44
4.5.1. Ensamble Estructura Inferior	44
4.5.2. Ensamble Estructura Superior	46
Capítulo 5 Análisis de Diseño estructural y Resultados	48
5.1. Introducción	48
5.2. Análisis estático estructura inferior	48
5.2.1. Metodología	48
5.2.2. Resultados	54
5.3. Análisis de Esfuerzos y deformación estructura superior.	54
5.3.1. Metodología	55
5.3.2. Resultados	57
5.4. Materiales	61
Capítulo 6 Adquisición de Datos	62
6.1. Introducción	62
6.2. Metodología	62
6.3. Selección de Sensores	63
6.4. Acondicionamiento de Señal	65
6.5. DAQ Hardware	66
6.6. Montaje de Sensores	67
Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones	69
7.1. Conclusiones	69
7.2. Recomendaciones y/o trabajos futuros	69
7.3. Publicaciones derivadas del presente proyecto	69
Referencias	70
Anexo A	
Anexo B	



LISTA DE IMÁGENES

Figura 1. 1.- Metodología.....	17
Figura 2. 1.- Ciclo de Lenoir [2].....	19
Figura 2. 2.- Partes de Pulsorreactor con válvulas mecánicas [5].	20
Figura 2. 3.- Funcionamiento de PJ sin válvulas [3].....	20
Figura 2. 4.- Esnault-Pelterie Combustor 1906 [4].....	21
Figura 2. 5.- Marconnet Pulse Jet 1909 [4].....	21
Figura 2. 6.- Esnault-Pelterie Pulse Jet 1910 [4].	21
Figura 2. 7.- Schmidt Combustor Pulsante 1931 [4].	21
Figura 2. 8.- Pulsorreactor Argus 1941 [4].....	22
Figura 2. 9.- Curtis Dyna-Jet 1946 [4].	22
Figura 2. 10.- SNECMA Ecrevisse 1953 [4].....	23
Figura 2. 11.- Persechino Pulse Jet 1957 [4].	23
Figura 2. 12.- SNECMA Escopette 1950 [4].....	23
Figura 2. 13.- Logan Pulse Jet 1957 [4].	23
Figura 2. 14.- Pulse jet sin válvulas mecánicas [11].	25
Figura 2. 15.- Ciclo Pulse jet [11].	25
Figura 2. 16.- Presión máx. y Volumen.....	26
Figura 2. 17.- Empuje relativo y velocidad de vuelo (Experimental o y calculado -) [11].	26
Figura 2. 18.- Presión en cámara de combustión y periodo de tiempo [12].	26
Figura 2. 19.- Cámara de combustión a volumen constante auto-giratoria; 1. Entrada aire, 2. Válvula deslizable, 3. Inyector de combustible, 4. Bugía, 5. Perfil, 6. Salida a tubo de escape, 7. Receptor de gas caliente [13].	26
Figura 2. 20.- Temperatura en motor Dyna jet con diferente porcentaje de etanol [15].	27
Figura 2. 21.- Frecuencia de combustión Dyna jet [15].....	28
Figura 2. 22.- Fuerza de empuje motor Dyna jet [15].	28
Figura 3. 1.- Flujo de combustible vs Presión de inyección de combustible [1].	30
Figura 3. 2.- Empuje vs Flujo de combustible [1].....	31
Figura 3. 3.- Frecuencia, Presión cámara de combustión vs Flujo de combustible [1]..	32
Figura 3. 4.- Presión en cámara y Flujo de aire de entrada en un ciclo [1].	33
Figura 3. 5.- Temperatura en tubo [1].	34
Figura 4. 1.- Partes de estructura inferior de BP.....	40
Figura 4. 2.- Partes Estructura Superior.....	41
Figura 4. 3.- Ensamble Estructura Inferior.....	45
Figura 4. 4.- Ensamble Estructura Superior.	46
Figura 4. 5.- Posición de soportes para celda de carga.	47
Figura 5. 1.- Diagrama de cuerpo libre Banco de Pruebas (Unidades en mm).	49
Figura 5. 2.- Diagrama de cuerpo libre (SP) mm.	53
Figura 5. 3.- Mallado Estructura Superior.	56
Figura 5. 4.- Mallado soporte V.	56



<i>Figura 5. 5.- Soporte V con tubo a 800°C.</i>	57
<i>Figura 5. 6.- Deformación total estructura superior.</i>	58
<i>Figura 5. 7.- Esfuerzos equivalentes (von-Mises) estructura superior.</i>	59
<i>Figura 5. 8.- Deformación total soporte V.</i>	60
<i>Figura 5. 9.- Esfuerzo equivalente (von-Mises) soporte V.</i>	61
<i>Figura 6. 1.- Elementos de sistema DAQ.</i>	63
<i>Figura 6. 2.- Entradas, salidas y alimentación de acondicionador de señal.</i>	66
<i>Figura 6. 3.- Esquema de colocación de sensores.</i>	67
<i>Figura 6. 4.- Montaje de sensor de presión y termopares.</i>	68
<i>Figura 6. 5.- Montaje celda de carga.</i>	68



LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 2. 1.- Aplicaciones de Pulse jet y Combustión Pulsante [10].</i>	24
<i>Tabla 3. 1.- Flujo de Combustible PJ32.</i>	31
<i>Tabla 3. 2.- Presión de Inyección PJ32.</i>	31
<i>Tabla 3. 3.- Fuerza de Empuje PJ32.</i>	32
<i>Tabla 3. 4.- Frecuencia del Ciclo.</i>	32
<i>Tabla 3. 5.- Presión Cámara de Combustión.</i>	33
<i>Tabla 3. 6.- Rango flujo de aire de entrada.</i>	34
<i>Tabla 3. 7.- Rango de temperatura en tubo de PJ.</i>	34
<i>Tabla 3. 8.- Magnitudes de Fuerza de Empuje.</i>	36
<i>Tabla 3. 9.- Magnitudes de flujo de combustible.</i>	37
<i>Tabla 3. 10.- Magnitudes de Temperatura.</i>	37
<i>Tabla 3. 11.- Magnitudes de presión.</i>	38
<i>Tabla 3. 12.- Magnitudes de Frecuencia.</i>	38
<i>Tabla 3. 13.- Magnitudes de Flujo de aire.</i>	38
<i>Tabla 4. 1.- Materiales necesarios para Banco de Pruebas.</i>	41
<i>Tabla 5. 1.- Total peso aproximado de estructura inferior Banco de Pruebas (Wi).</i>	50
<i>Tabla 5. 2.- Peso total aproximado estructura superior Banco de Pruebas.</i>	50
<i>Tabla 6. 1.- Sensores.</i>	63
<i>Tabla 6. 2.- Anemómetro.</i>	64
<i>Tabla 6. 3.- Acondicionador de Señal Universal.</i>	65
<i>Tabla 6. 4.- Dispositivo DAQ.</i>	66



NOMENCLATURA

A	Reacción en la llanta A (x, y).
B	Reacción en la llanta B (x, y).
G_i	Centro de gravedad estructura inferior.
G_s	Centro de gravedad estructura superior.
l	Longitud de motor.
μ_s	Coefficiente de fricción estática.
N	Fuerza normal.
P	Fuerza de empuje.
SP	Fuerza de sobrepeso.
W_i	Peso estructura inferior.
W_s	Peso estructura superior.



ABREVIATURAS

BP	Banco de Pruebas.
DAQ	Data Acquisition (Adquisición de Datos).
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio).
PETA	Pulse Ejector Thrust Augmentor (Ejector Pulsante para Aumentar Empuje).
PJ	Pulse Jet (Pulsorreactor).
SNECMA	Société Nationale d'Étude et de Construction de Moteurs d'Avion (Sociedad Nacional de Estudio y Construcción de Motores de Avión).



GLOSARIO

Banco de Pruebas	Equipo desarrollado para la experimentación de proyector.
Combustión Pulsante	Combustión en ciclos de alta frecuencia. No se genera de forma continua.
Cubesats	Satélite pequeño utilizado para la investigación espacial.
Empuje	Fuerza de propulsión generada por un motor de reacción.
Hardware DAQ	Componentes físicos que conforman un dispositivo de adquisición de datos.
Motor de Reacción	Es un sistema propulsivo cuyo principio de funcionamiento está basado en la aplicación de la segunda y tercera ley de Newton.
Pulsorreactor	Motor de reacción de combustión pulsante.
Sistema DAQ	Conjunto de sensores, cableado y tarjeta DAQ que tienen como objetivo proporcionar datos de estudio de la experimentación de un proyecto.
Software DAQ	Programa lógico utilizado para la adquisición de datos.



Capítulo 1 Introducción

En la presente tesis se aborda el estudio realizado sobre motores pulse jet o pulsorreactores y sobre el diseño de un banco de pruebas el cual nos permite caracterizar motores de este tipo que se encuentren dentro de un rango de dimensiones y características a medir. Este banco de pruebas es una herramienta útil para la caracterización de pulsorreactores en estado de optimización, diseño o en prueba.

El presente trabajo está estructurado en siete capítulos, los cuales se describen a continuación:

En el **capítulo 1**, se presenta la introducción al proyecto de tesis, así como su justificación, hipótesis, los objetivos y las aportaciones.

El **capítulo 2**, proporciona los antecedentes para poder entender términos y conceptos fundamentales para el buen desarrollo de la tesis.

En el **capítulo 3**, se encuentran descritas cada una de las características de importancia que se pueden medir en el banco de pruebas, así como las magnitudes que puede tener cada una de ellas.

En el **capítulo 4**, se presenta el diseño estructural del banco de pruebas y cada una de las partes que lo componen, así como los componentes necesarios para su funcionamiento y el ensamble de cada uno de ellos.

El **capítulo 5**, se muestra el análisis estructural realizado y los resultados obtenidos para la validación de diseño.

Para finalizar, en el **capítulo 7**, se presentan las conclusiones y las recomendaciones derivadas de la presente tesis.



1.1. Justificación

Se ha visto un creciente interés en los últimos años por el desarrollo de alternativas de propulsión de vehículos no tripulados, así como de cohetes desechables para poner en órbita satélites pequeños o cubesats por parte de empresas privadas, derivado de la apertura que recientemente ha dado la NASA a la iniciativa privada. Por otra parte, al crearse la Agencia Espacial Mexicana, se abren nuevas oportunidades para desarrollar tecnología de propulsión.

Esta investigación plantea el diseño conceptual de un banco de pruebas que permita el estudio del funcionamiento de pulsorreactores. Dando como resultado una contribución que permita caracterizar y desarrollar la tecnología de pulsorreactores mexicanos al poder medir la temperatura, la frecuencia de combustión, presión, empuje, flujo de aire y flujo de combustible de un pulsorreactor, y que el banco de pruebas desarrollado sirva como herramienta para futuros estudios en pulsorreactores experimentales.

1.2. Hipótesis

Es posible diseñar un banco de pruebas para el estudio de un pulsorreactor con las características del pulsorreactor utilizado en la bibliografía [1], en el cual se puedan medir presión, temperatura, fuerza de propulsión, flujo de aire de entrada, flujo de combustible de entrada, mezcla aire/combustible y frecuencia del ciclo.

1.3. Objetivos y aportaciones esperadas

1.3.1. Objetivo general

Diseño conceptual de un banco de pruebas que nos permita estudiar el funcionamiento y comportamiento de un pulsorreactor, y poder disponer de una herramienta de estudio para futuras investigaciones.



1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar el banco de pruebas acorde a las dimensiones del pulsorreactor pequeño o a escala.
- Estudiar y determinar los sensores que nos permitan la medición de las variables de control y las variables de salida.
- Estudiar y determinar los componentes de funcionamiento.
- Seleccionar los sensores para cada una de las características a medir.
- Seleccionar la tarjeta para adquirir los datos del banco de pruebas.

1.3.3. Aportaciones esperadas

Dentro de las aportaciones que se pueden esperar del desarrollo de esta tesis están:

- Disponer de una herramienta que permita el estudio y caracterización de pulsorreactores.
- Fomentar el estudio y optimización de motores pulse jet, mediante la disposición de un banco de pruebas y de información relevante acerca de este tipo de motores.

1.4. Metodología

El proyecto de tesis fue realizado mediante la siguiente metodología:

1. Se busco un rango adecuado para las dimensiones del motor PJ en pequeño o a escala, que permitiera un tamaño pequeño del banco de pruebas para que este fuera fácilmente manipulable debido a que es un equipo de laboratorio.
2. Se realizo un diseño conceptual de la estructura del BP de acuerdo con el rango de dimensiones permisibles para el motor PJ.
3. Se definió las variables y las magnitudes a medir por el BP.
4. Se definió los elementos del sistema DAQ.
5. Se diseñó el circuito eléctrico del sistema DAQ.
6. Se evaluó la estructura del BP y se analizó los resultados.
7. De acuerdo con los resultados obtenidos se aceptó el diseño.



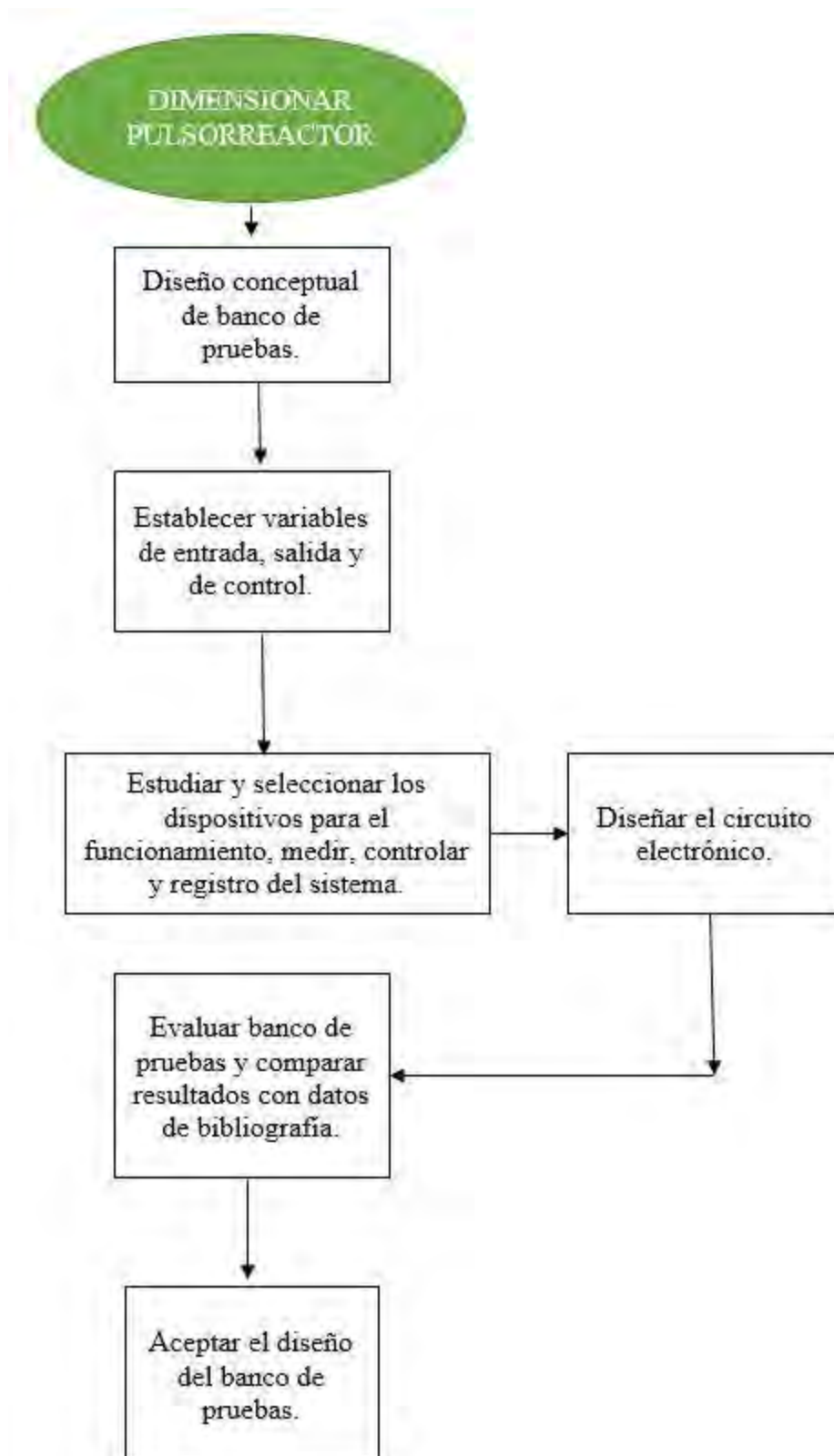


Figura 1. 1.- Metodología.



1.5. Trabajos relacionados con la presente tesis.

A la fecha en la bibliografía revisada, no se ha encontrado mención alguna para la realización de un banco de pruebas para pulse jet. Se tienen muy poco registros sobre caracterizaciones de motores de este tipo, y en ninguno se define con claridad la herramienta utilizada para llevar acabo cada una de las pruebas y la obtención de resultados. Además, en cada uno de los estudios encontrados se puede observar la metodología realizada para la obtención de datos y que solo está dirigida para el motor en cuestión.

Lo anterior apunta a que al presentar un trabajo relacionado a un banco de pruebas para la caracterización de motores de diferentes tamaños y características se hace una contribución al estado del arte.



Capítulo 2 Estado del arte

2.1. Introducción

El Pulsorreactor o Pulse Jet (PJ) es un motor de reacción carente de compresor y turbina, que funciona mediante el ciclo de Lenoir (Figura 2.1) [2]. A diferencia de los motores de combustión continua este funciona con una combustión intermitente [3]. El PJ puede ser considerado como una transición entre los motores de pistón más viejos y las turbinas de gas más nuevas, donde los PJs y los motores de pistón son de ciclo similar debido a la intermitencia de su combustión [3].

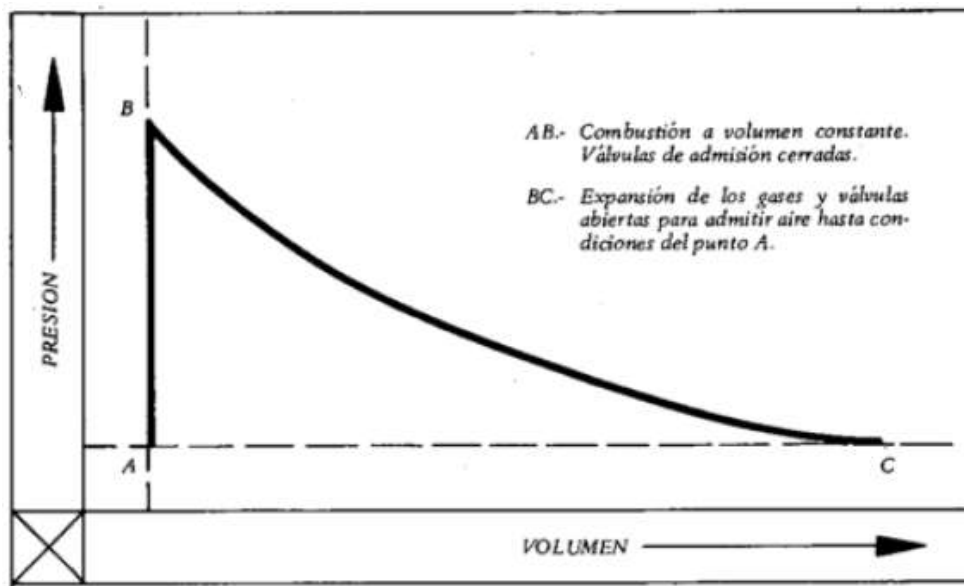


Figura 2. 1.- Ciclo de Lenoir [2].

Los componentes principales del PJ son (Figura 2.2): Difusor de admisión, válvulas de admisión, cámara de combustión con bujía y tobera de escape [2]–[4]. A pesar de tener un diseño simple los pulsorreactores suelen ser muy grandes y aquellos que cuentan con válvulas mecánicas suelen llegar a la falla en muy poco tiempo de operación por fatiga [1]. También existen PJs los cuales no tienen válvulas mecánicas y su funcionamiento está basado meramente al efecto de compresión y vacío del tubo del pulsorreactor [5].



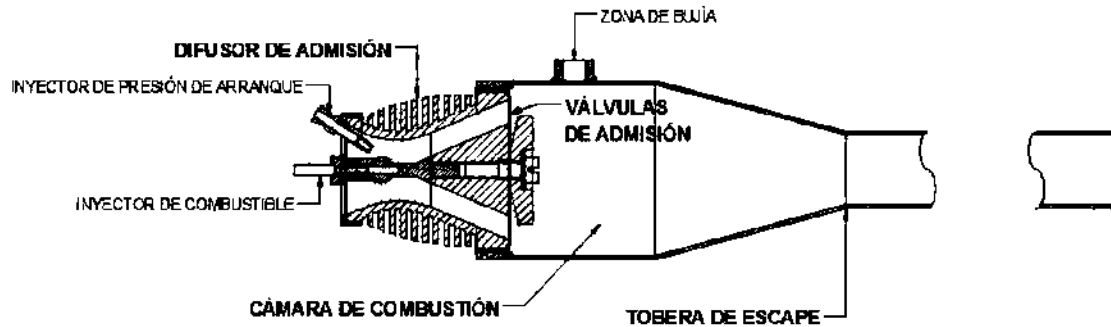


Figura 2. 2.- Partes de Pulsorreactor con válvulas mecánicas [5].

El funcionamiento de un PJ con válvulas mecánicas está basado mediante el ciclo de Lenoir y consta de la inyección de mezcla aire-combustible, detonación de esta mezcla mediante la bujía de arranque en la cámara de combustión, cerrado de las válvulas provocado por el incremento de presión al detonar la mezcla, escape acelerado de gases calientes por la tobera de escape lo cual genera un vacío en la cámara de combustión, provocando la admisión de una nueva mezcla de aire-combustible por la apertura de las válvulas y el retroceso de una parte de gases calientes los cuales provocan la compresión de la mezcla y una nueva detonación, repitiendo el proceso [5].

El funcionamiento de los pulsorreactores sin válvulas mecánicas es exactamente el mismo que al de aquellos que si tienen, la diferencia es que estos por su diseño, permiten la intermitencia del ciclo y la admisión de la mezcla de aire-combustible sin necesidad de válvulas mecánicas (Figura 2.3).

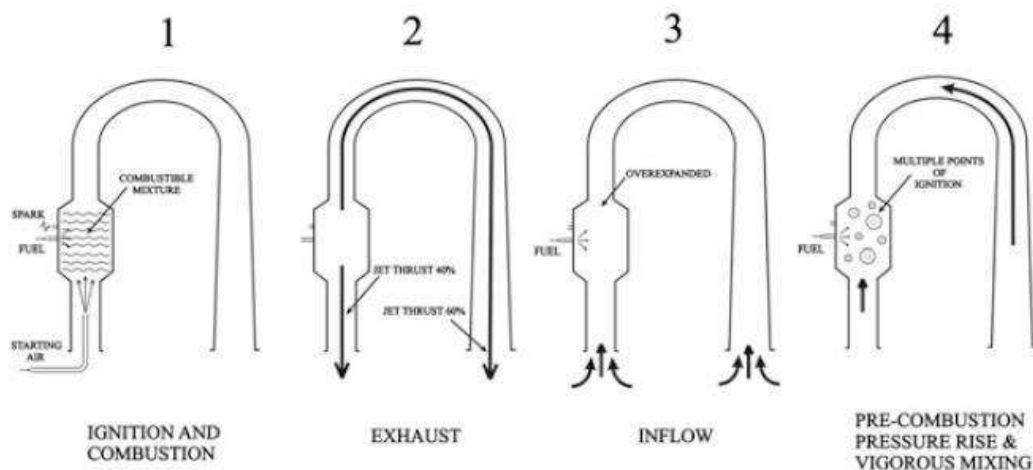


Figura 2. 3.- Funcionamiento de PJ sin válvulas [3].



2.2. Antecedentes

El pulsorreactor más conocido es el Argus el cual fue diseñado por Paul Schmidt en 1941 (Figura 2.8) y fue utilizado por la marina alemana durante la segunda guerra mundial, este motor era el encargado de dar empuje a la bomba voladora V1 [4], [6], [7], el motor Argus era capaz de funcionar con gasolina generando un empuje de 350Kg y una velocidad por encima de 640 Km/h [8]. Aun cuando la marina alemana fue la primera en utilizar un pulsorreactor con fines prácticos y bélicos, existen antecedentes en los cuales existían trabajos con combustión pulsante, el primero de ellos se registró por Byron Higgins cerca de 1800, pero fue hasta después de 100 años cuando este tipo de combustión comenzó a causar interés, en 1906 Esnault-Pelterie (Figura 2.4) patentó un combustor dual con válvulas mecánicas. Marconnet quien era colaborador de Esnault-Pelterie propuso en 1909 válvulas aerodinámicas para propulsión (Figura 2.5) y finalmente en 1910 Esnault-Pelterie patentó las válvulas mecánicas duales para propulsión (Figura 2.6). Karavodine había patentado en 1906 las válvulas mecánicas simples antes de las duales de Esnault-Pelterie [4], [6]. En 1931 Paul Schmidt obtuvo la patente alemana del Combustor pulsante el cual fue el antecesor del motor Argus (Figura 2.7).

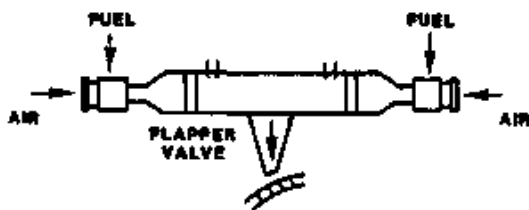


Figura 2. 4.- Esnault-Pelterie Combustor 1906 [4].



Figura 2. 5.- Marconnet Pulse Jet 1909 [4].

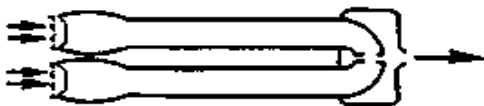


Figura 2. 6.- Esnault-Pelterie Pulse Jet 1910 [4].



Figura 2. 7.- Schmidt Combustor Pulsante 1931 [4].





Figura 2. 8.- Pulsorreactor Argus 1941 [4].

En 1946 Tenney y colaboradores obtuvieron una patente para Dyna-Jet donde se incorporaba un nuevo diseño de válvulas y de sistema de inyección de aire-combustible (Figura 2.9) [4]. Este pulsorreactor se vende hasta la actualidad por Curtis Dyna-Products. El diseño de válvula de Dyna-Jet fue la base para el desarrollo de Tenney del generador de niebla M3A3 del ejército de los EUA y la versión comercial paralela para el nebulizador de insecticida [4].

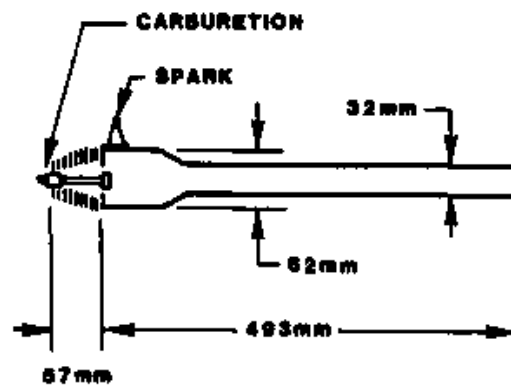


Figura 2. 9.- Curtis Dyna-Jet 1946 [4].

Después de concluir el trabajo de Schmidt y el motor Argus, creció el interés por los pulsorreactores con y sin válvulas mecánicas los pulsorreactores sin válvulas mecánicas aparecieron con Marconnet en 1909. En 1943 SNECMA centro su atención en las aeroválvulas, en 1950 diseñaron el motor Escoppette (Figura 2.12), y en 1953 el SNECMA Ecrevisse ambos sin válvulas mecánicas (Figura 2.10).

En 1957 Logan presento un pulsorreactor de entrada radial sin válvulas (Figura 2.13) y Persechino el pulsorreactor de entrada angular (Figura 2.11).

Para 1971, ya se tenían 40 patentes y muchos reportes acerca de pulsorreactores y combustores pulsantes, la mayoría generados en los 60's, se tenía una gran variedad de diseños y todos dirigidos hacia la propulsión [4].



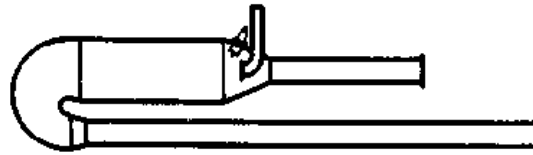


Figura 2. 10.- SNECMA Ecrevisse 1953
[4].

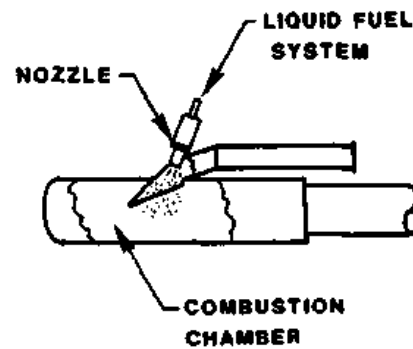


Figura 2. 11.- Persechino Pulse Jet
1957 [4].

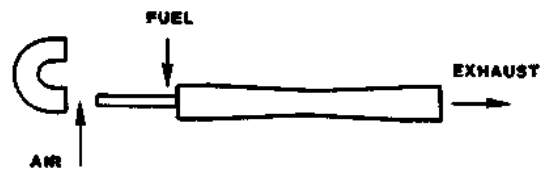


Figura 2. 12.- SNECMA Escopette 1950
[4].

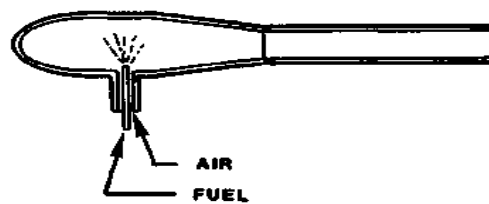


Figura 2. 13.- Logan Pulse Jet 1957
[4].



2.3. Aplicaciones de los Pulsorreactores

Los pulsorreactores en la actualidad pueden utilizarse en diversas aplicaciones, ya sea como motor de reacción o por sus características de funcionamiento. Desde su uso en la II Guerra mundial, el estudio de estos a través de la historia y con la patente PETA (Pulsejet Ejector Thrust Augmentor) [9] se demuestra que puede ser utilizado para aplicaciones militares, con el descubrimiento de válvulas mecánicas e inyección de aire-combustible por DYNA-JET los pulsorreactores que hasta la fecha son vendidos por la misma compañía permiten su uso en drones y prototipos de aeronaves a escala para hobby [5], además las características de funcionamiento (Presión, temperatura, frecuencia, combustión pulsante, etc.) permiten que puedan ser utilizados para procesos industriales como el secado de sustancias en líquidos [7].

Tabla 2. 1.- Aplicaciones de Pulse jet y Combustión Pulsante [10].

Propósito General	Aplicaciones	Nivel de Uso
Generación de Empuje	Propulsión	**
	Producir Torque	*
	Elevación vertical	**
	Limpieza y descalcificación de superficies	
Ganancia de Presión y bombeo de fluidos	Bombeo de niebla e insecticida	**
	Gas-Turbina combustión	*
	Recirculación de flujo de gas	
Calentamiento de líquidos	Calefacción hidroneumática	**
	Calentamiento de agua potable	*
	Elevación de vapor de combustible en gas, liquido o solido	*
	Freidoras de grasa	*
	Proceso químico	
	Procesamiento de petróleo	
	Control de viscosidad en líquidos	
Calentamiento indirecto de aire	Calefacción de vehículos	**
	Calefacción de casas	**
	Calefacción industrial	
Calentamiento directo de aire	Procesos de secado de comida	**
	Procesos de secado de desechos	**
	Calentamiento de huertas	**
	Generador de niebla militar	**
	Generador de insecticida en aerosol	**
	Secado de sangre	*
	Calefactores domésticos	*
	Calefacción de motores y maquinaria	*
	Secado de madera	
	Secado de arena	
	Curado de blocks de cemento	
	Esterilización de suelo	
	Hornos de metalurgia	
	Incineradores de humo y contaminantes	
	Precalentado	
Diferentes usos	Derretido de nieve y hielo	**
	Planchas	*
	Coagulación de materiales	*
	Incineración de basura	
	Gasificación	
	Generación de energía	
	Bombas de calor	
	Boiler de aserrín	
	Quemadores piloto y encendedores para combustibles de bajo grado	

*En desarrollo

**Aplicación en uso



En la tabla 2.1 se muestran las posibles aplicaciones en las cuales se puede usar la combustión pulsante realizada por [4] y actualizada por [10].

2.4. Caracterización y pruebas de funcionamiento de pulse jet

El estudio del funcionamiento de los pulsorreactores se ha hecho mediante simulaciones computacionales y prototipos a escala [1], [11], [12], en estos estudios se han medido el empuje, el flujo de entrada de aire, flujo de entrada de combustible, la frecuencia de la combustión, la presión y la temperatura a través de los diferentes componentes del pulsorreactor.

Algunos estudios se basaron en la construcción y caracterización de un Pulsorreactor Solar PJ32 el cual es un modelo a escala 1:5 del Pulsorreactor Argus V-1 desarrollado por la marina de guerra en 1951 [1], los resultados se muestran en capítulo 3.

En [11], [12] se realizaron simulaciones numéricas acerca del ciclo de trabajo de un motor pulse jet sin válvulas mecánicas (Figuras 2.14 y 2.15), usando un ciclo termodinámico propuesto.

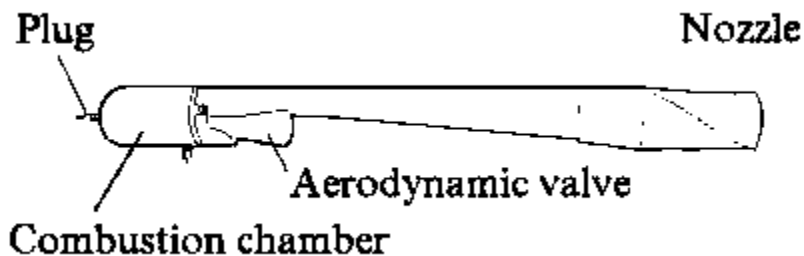


Figura 2. 14.- Pulse jet sin válvulas mecánicas [11].

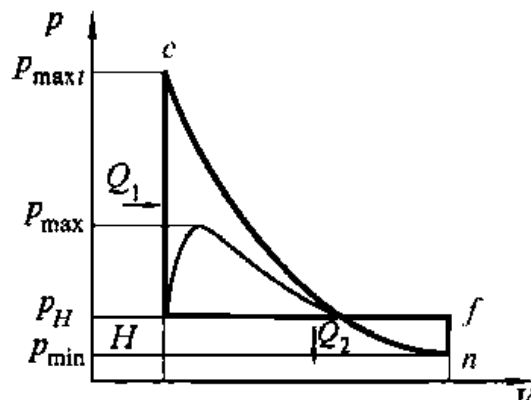


Figura 2. 15.- Ciclo Pulse jet [11].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica



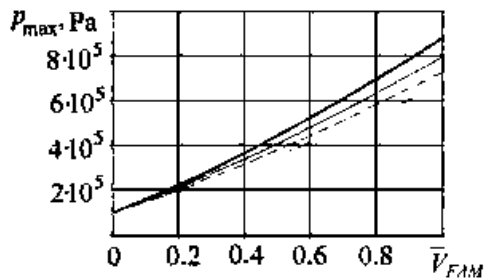


Figura 2. 16.- Presión máx. y Volumen relativo de mezcla aire-combustible que entra [11].

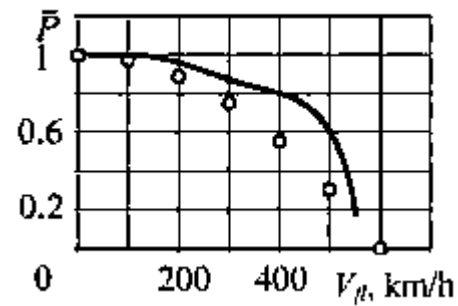


Figura 2. 17.- Empuje relativo y velocidad de vuelo (Experimental o y calculado -) [11].

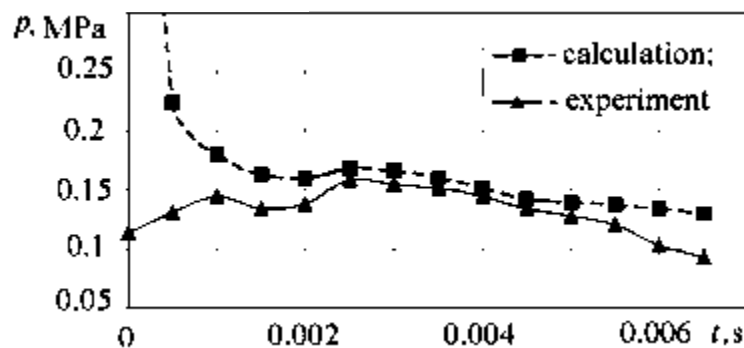


Figura 2. 18.- Presión en cámara de combustión y periodo de tiempo [12].

Se han realizado investigaciones en las cuales se busca el mejoramiento de la eficiencia del pulsorreactor mediante el estudio y modificación de la válvula de entrada, que consta de una válvula giratoria que abre y cierra automáticamente por el torque producido por un perfil al sufrir decremento de presión, permitiendo admisión a volumen constante (Figura 2.19) [13].

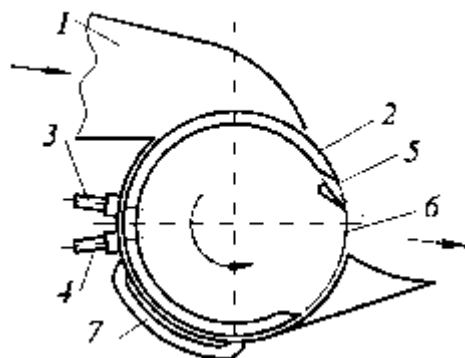


Figura 2. 19.- Cámara de combustión a volumen constante auto-giratoria; 1. Entrada aire, 2. Válvula deslizante, 3. Inyector de combustible, 4. Bugía, 5. Perfil, 6. Salida a tubo de escape, 7. Receptor de gas caliente [13].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica



Se han realizado modelos matemáticas que describen la vibración provocada por la combustión del gas en la sección transversal de la cámara de combustión [14].

Se ha realizado también un estudio en el cual se puso en funcionamiento un motor con válvulas y un motor sin válvulas, para analizar su comportamiento con combustibles alternativos, se obtuvieron las características de funcionamiento de un motor Dyna jet red head funcionando con mezcla de gasolina y etanol al 0%, 10% y al 20% [15].

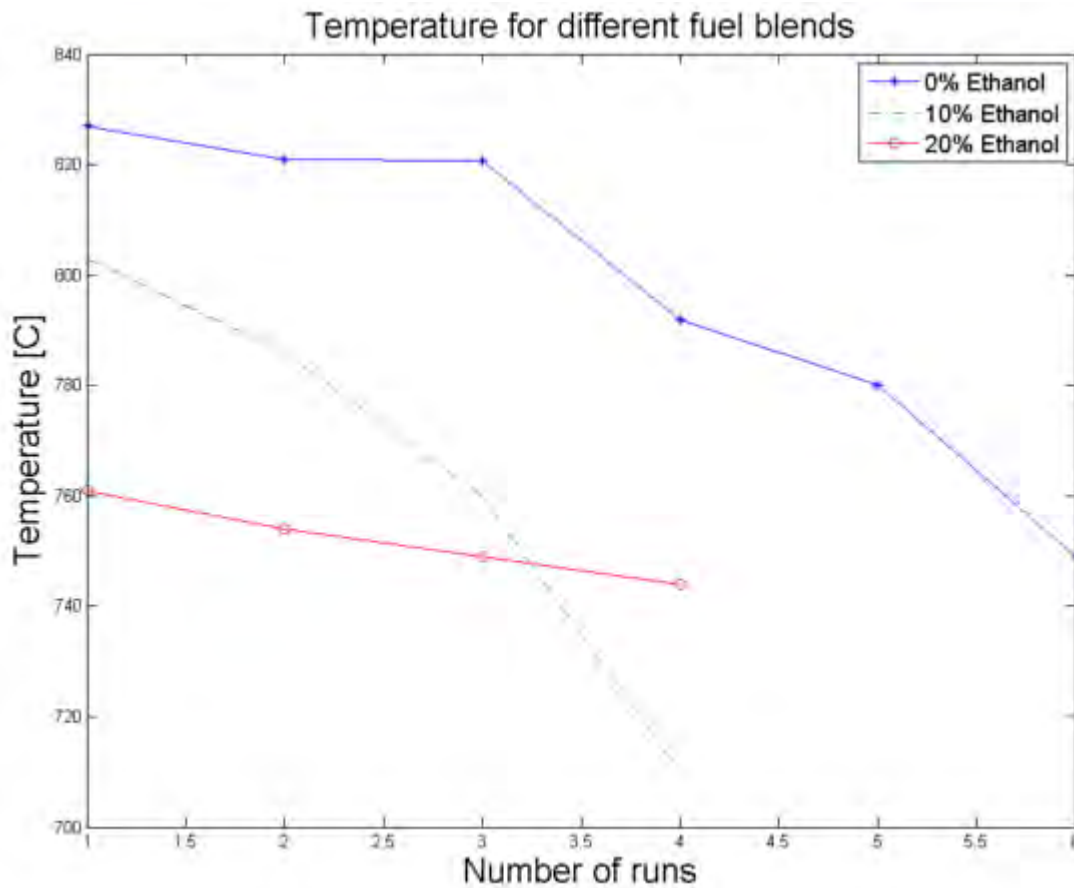


Figura 2. 20.- Temperatura en motor Dyna jet con diferente porcentaje de etanol [15].



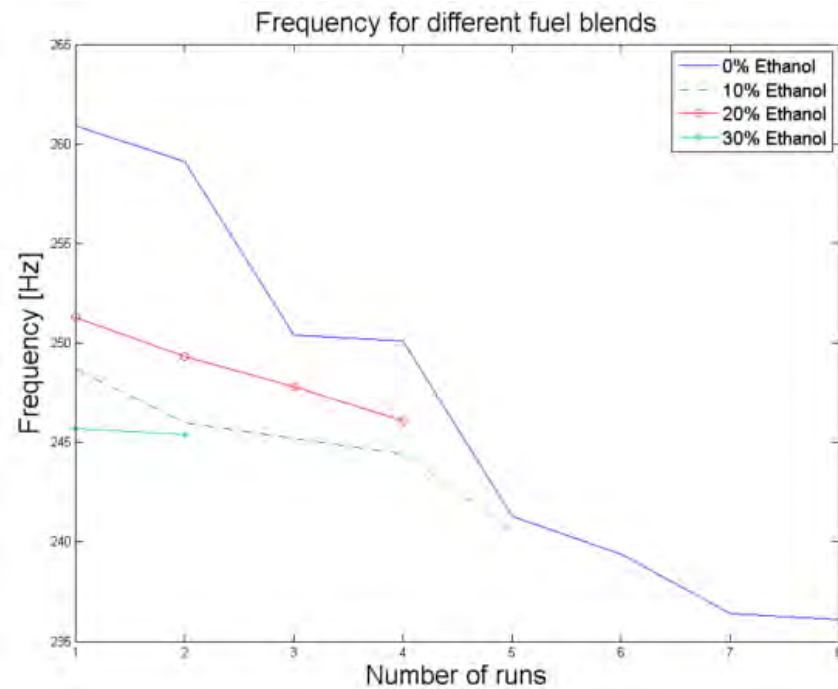


Figura 2. 21.- Frecuencia de combustión Dyna jet [15].

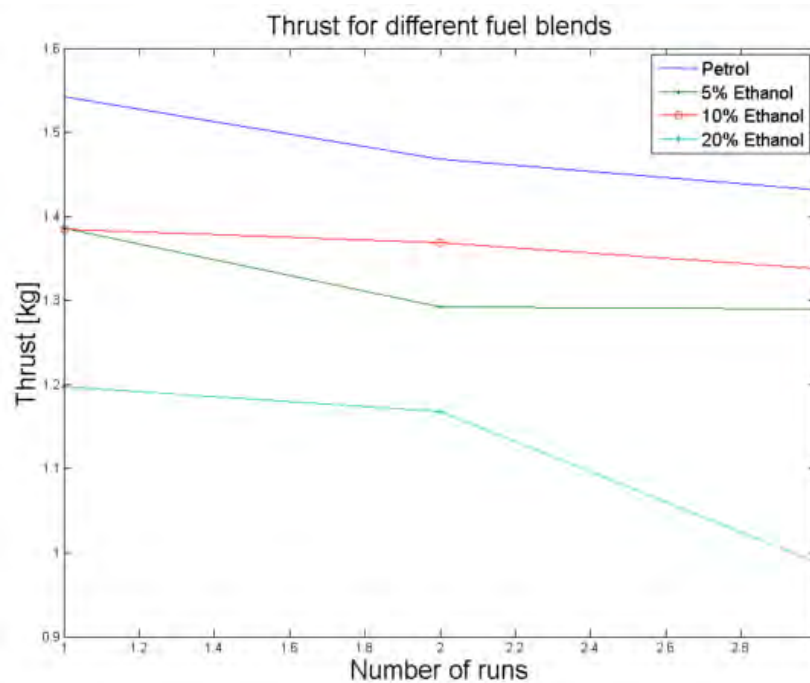


Figura 2. 22.- Fuerza de empuje motor Dyna jet [15].



Capítulo 3 Dimensiones de Pulse Jet admisibles y magnitudes a medir en banco de Pruebas.

3.1. Introducción

Un banco de pruebas para pulsorreactores es un equipo en el cual se pueden ensayar motores PJ con la finalidad de caracterizar el comportamiento de estos bajo ciertas condiciones de funcionamiento, y así estudiar las variables de salida, como objetivo el tener mejoras o variaciones, en el funcionamiento o diseño.

Para especificar las variables de medición aceptables y el rango de medición de las mismas, es necesario definir la capacidad que tiene el banco de pruebas de medición. Por lo que en este capítulo se definen cada una de las variables de medición que el banco de pruebas es capaz de medir y su rango de medición.

3.2. Dimensionamiento de motor

Para cumplir con el objetivo propuesto, en el cual el banco de pruebas debe ser capaz de caracterizar PJs en pequeño o a escala, es necesario definir un rango de medida de largo y diámetro para el motor, el cual puede ser colocado para analizarlo en el BP sin tener fallas o datos erróneos.

Litke et al. Utilizaron un motor Solar PJ32 el cual es un prototipo a escala 1/5 de lo que fue el motor Argus V-1, este motor tiene un largo total aproximado de 1828.8 mm y un diámetro mayor aproximado de 215.9 mm [1], tomando en cuenta un motor con esas dimensiones se decidió reducir aún más las dimensiones del motor admisibles para que esto no generara un BP de dimensiones grandes. Tomando en cuenta las dimensiones de pulsorreactores en pequeño o a escala de los cuales se obtuvo información y la cual nos ayudó a definir un en rango de medida permito, fueron los motores PL 35 con un largo



aproximado de 545 mm y un diámetro mayor de 65 mm, realizado por Peter Lüman [16]; Dyna Jet muy parecido al motor PL 35 solo con algunas variaciones en la tobera de escape; Motor Lady Anne Boleyn con un largo aprox. de 545 mm y un diámetro mayor aprox. de 65 mm, siendo un motor sin válvulas mecánicas y diseñado por Larry Cottrill [15]; Motor escala 1/11 de motor Argus el cual tienen un largo de 831.3 mm aprox. y un diámetro de 98.13 mm aprox. Se presentan planos en Anexo B. Por lo que se decidió que el banco de pruebas diseñado debe ser capaz de caracterizar motores PJ con dimensiones de Largo entre 400 mm a 850 mm y un diámetro entre 20 mm a 160 mm.

3.3. Características de funcionamiento motor Argus escala 1/5.

Para obtener un rango de medición de las variables a medir por el banco de pruebas, nos apoyamos en el estudio realizado por Litke et al. [1] en el cual se caracterizó el motor Argus 1/5, con la finalidad de que el banco de pruebas tuviera la capacidad de medir magnitudes semejantes a las de un motor PJ32.

El motor PJ32 funciona bajo las siguientes características de interés para nuestro estudio:

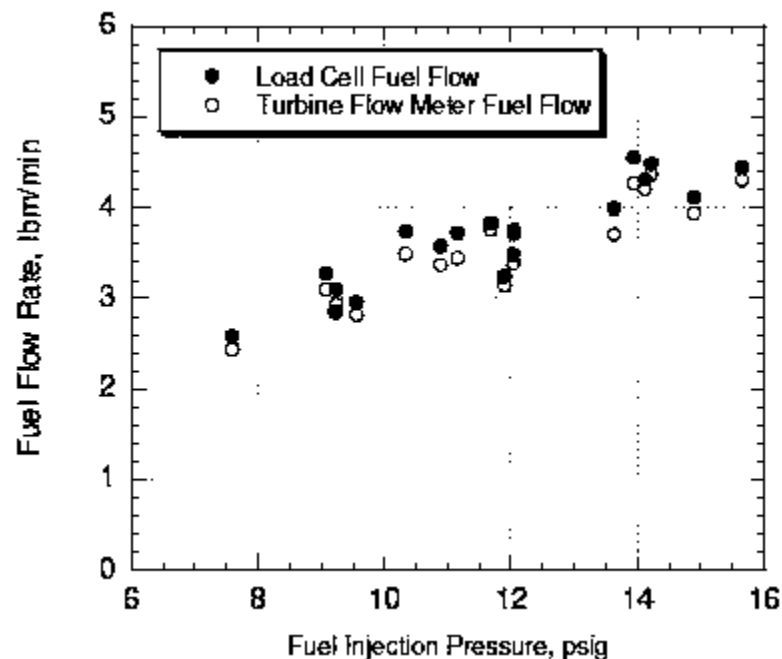


Figura 3. 1.- Flujo de combustible vs Presión de inyección de combustible [1].



En la figura 3.1 se puede observar como incrementa el flujo de combustible conforme aumenta la presión de inyección del mismo.

Tabla 3. 1.- Flujo de Combustible PJ32.

Rango de Flujo de Combustible		
	<i>lbm/min</i>	<i>kg/min</i>
Mínimo	2.4	1.089
Máximo	4.6	2.087

Tabla 3. 2.- Presión de Inyección PJ32.

Rango Presión de Inyección		
	<i>psi</i>	<i>kPa</i>
Mínimo	7.5	51.71
Máximo	15.75	108.6

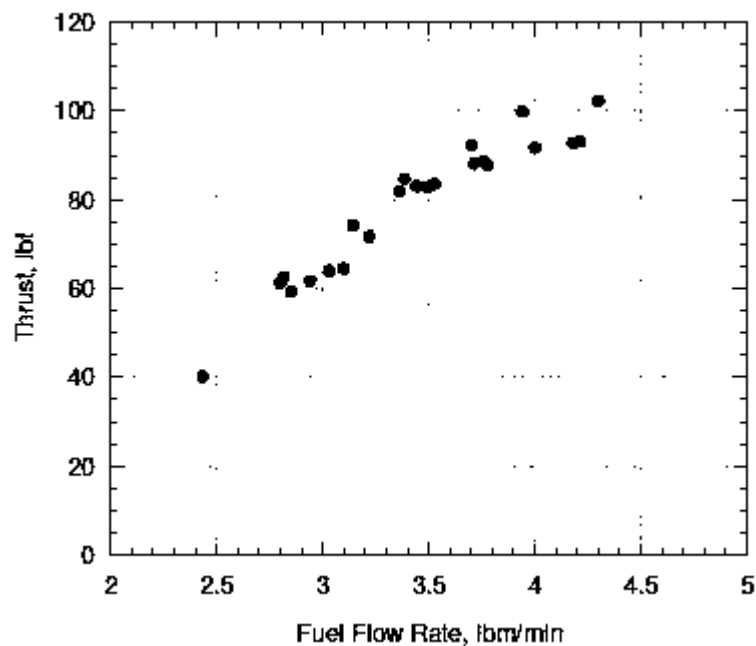


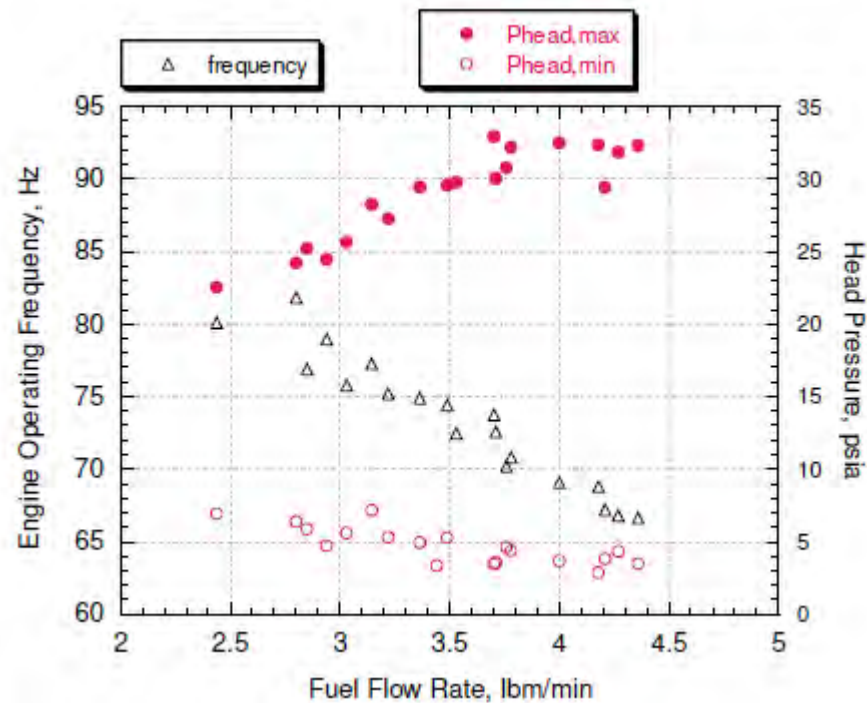
Figura 3. 2.- Empuje vs Flujo de combustible [1].

A medida que el flujo de combustible a la cámara de combustión aumenta, incrementa la fuerza de empuje de motor (Figura 3.2)



Tabla 3. 3.- Fuerza de Empuje PJ32.

Rango Fuerza de Empuje			
	<i>lbf</i>	<i>kgf</i>	<i>kN</i>
Mínimo	40	18.15	0.1779
Máximo	103	46.73	0.4582

**Figura 3. 3.- Frecuencia, Presión cámara de combustión vs Flujo de combustible [1].**

En la figura 3.3 se puede observar el comportamiento de la presión en la cámara de combustión, frecuencia y flujo de combustible, donde queda claro que a medida que incrementa el flujo de combustible a la cámara de combustión la presión máx. incrementa, generando incremento en la velocidad de gases de escape y la presión min disminuye ligeramente debido al decremento de presión generado por el incremento de velocidad con la que los gases escapan del tubo de escape. La frecuencia disminuye con forme el flujo de combustible aumenta.

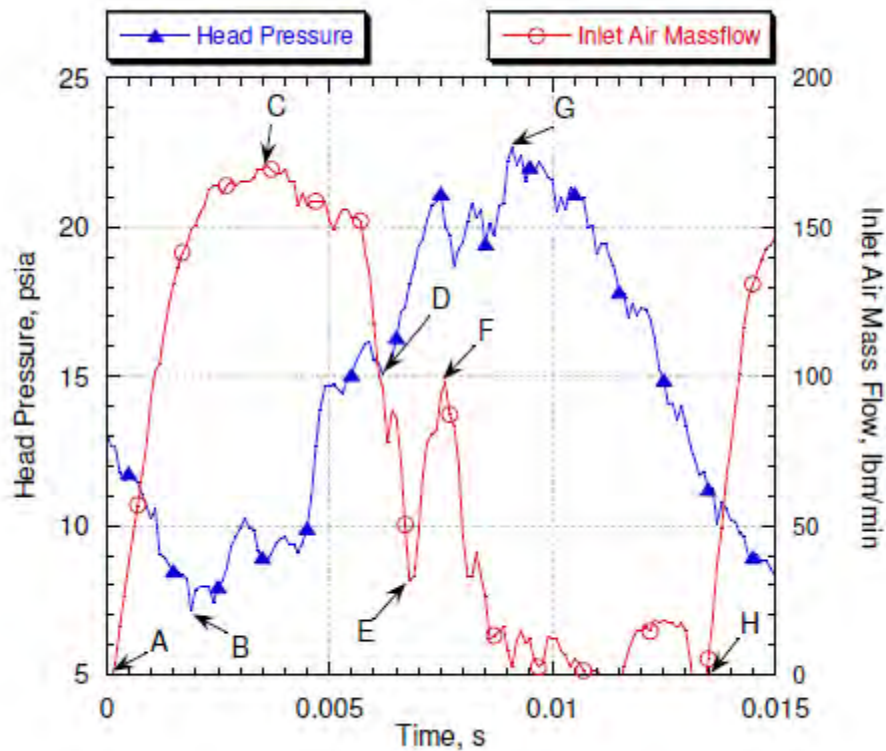
Tabla 3. 4.- Frecuencia del Ciclo.

Frecuencia	
	<i>Hz</i>
Mínimo	66
Máximo	82



Tabla 3. 5.- Presión Cámara de Combustión.

Rango Presión de Cámara		
	<i>psi</i>	<i>kPa</i>
Mínimo	3	20.68
Máximo	34.5	237.9

**Figura 3. 4.- Presión en cámara y Flujo de aire de entrada en un ciclo [1].**

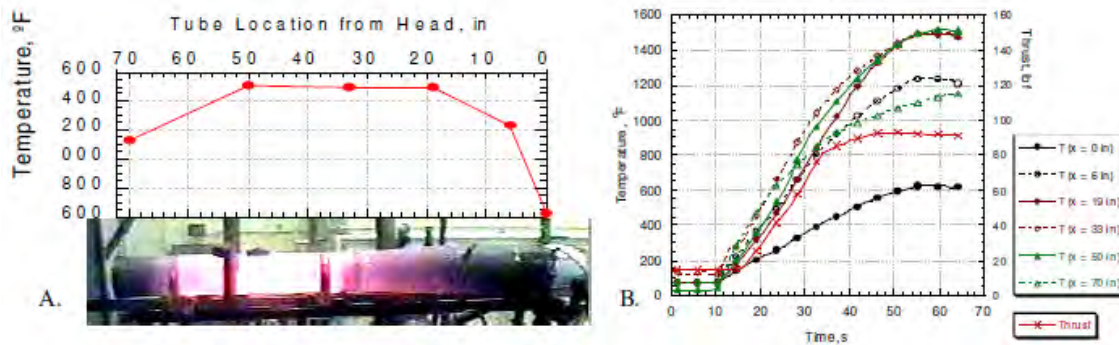
El ciclo comienza en el punto A (Figura 3.4) cuando las válvulas abren por el decremento de presión en la cámara de combustión, generando un incremento acelerado en el flujo de aire, cuando la presión en la cámara alcanza su valor mínimo (Punto B) tiempo después, el flujo de aire alcanza su valor máximo (Punto C), comenzando a decrementar el flujo de aire y aumentando la presión, cuando el valor de presión está cercano a la atmosférica (Punto D), el flujo de aire disminuye significativamente por el cierre de válvulas (Punto H), la combustión hace que la presión aumente hasta el punto G, acelerando el escape de gases y estos a su vez generando decremento de presión para repetir el ciclo. Los puntos E y F no significan que ingrese aire a la cámara, más bien es el flujo de gases calientes que salen por las válvulas al momento de la detonación (Por el diseño que tienen las válvulas del motor Solar PJ32).



Tabla 3. 6.- Rango flujo de aire de entrada.

Flujo de aire		
	<i>lbm/min</i>	<i>kg/min</i>
Mínimo	0	0
Máximo	170	77.11

La temperatura local en la parte exterior del motor Solar PJ32 momento después de su arranque se pueden visualizar en la figura 3.5 A, conforme el tiempo de operación del motor aumenta, la temperatura incrementa hasta alcanzar un valor máximo de 1500 °F aproximadamente (Figura 3.5 B).

**Figura 3. 5.- Temperatura en tubo [1].**

- A. Temperatura Local.
- B. Temperatura local vs Rango de tiempo.

Tabla 3. 7.- Rango de temperatura en tubo de PJ.

Temperatura en Tubo		
	$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{C}$
Mínimo	600	315.6
Máximo	1500	815.6

3.4. Variables y Magnitudes que medir en Banco de Pruebas

Algunas características de un motor en pequeño o a escala, se pueden comportar de una forma similar a un motor de dimensiones más grandes, como ejemplo un motor en pequeño como puede ser el PL 35 y un motor de dimensiones más grandes como el PJ32. Se puede observar en los datos obtenidos en las bibliografías [1], [15] que la temperatura en ambos motores alcanza valores semejantes. Y para el caso de la presión, fuerza de empuje,



frecuencia de operación, flujo de aire y combustible son diferentes, lo cual queda claro debido a que se trata de dos motores de dimensiones completamente diferentes.

Para definir el rango de medición de cada una de las variables medibles en el BP nos basamos en las Características de funcionamiento del motor PJ32 debido a que son mayores, si bien se pudo caer en tener un BP sobrado es aceptable ya que este puede ser utilizado para caracterizar motores en un rango de dimensiones y además para la optimización de ellos.

A continuación, se presentan cada una de las variables que el banco de pruebas puede medir y su rango de medición:

3.4.1. Fuerza de Empuje

La fuerza de empuje o propulsión es aquella fuerza de reacción generada por el pulsorreactor mediante el escape acelerado de los gases y ocasiona el desplazamiento del motor hacia delante. La propulsión es muy importante para los PJs ya que es la encargada de mover el motor, junto con aquello a lo que el PJ este destinado a mover.

La fuerza de empuje en PJs pequeños utilizados para aeromodelismo esta entre 1 kgf y 2 kgf [15], mientras que para PJs más grandes como el caso del PJ32 es de 47 kgf [1] y para motores con aplicaciones militares o comerciales son igual o mayores a 350 kgf [8].

Para obtener mediciones de empuje mediante el banco de pruebas, se pueden analizar fuerzas de propulsión en un rango de 0 a 30 kgf. Cubriendo con fuerzas de motores en pequeño o escala, y con motores que puedan estar dentro de las dimensiones aceptables definidas para el BP. Si quisiéramos saber las dimensiones de longitud, tentativamente hablando, que pudiera tener un PJ que generara 30 kgf de empuje, podríamos partir de los datos obtenidos, donde el Dyna Jet con una longitud de 545 mm genera 2 kgf y el PJ32 con 1829.8 mm de longitud genera 47 kgf, si suponemos que la fuerza de empuje tiene un comportamiento lineal con la longitud del motor, y que los datos anteriores son lineales, por interpolación podemos tener una longitud tentativa para un motor con un empuje de 30 kgf.

$$l_{30kg} = 545 + \frac{1828.8 - 545}{47 - 2} (30 - 2) = 1343.80 \quad (3.1)$$



Por lo tanto, un motor que genera una fuerza de empuje de 30 kgf tiene una longitud tentativa de 1343.80 mm, la cual es mayor al valor máximo de longitud permisible para el BP, por lo que 30 kgf es un límite de empuje suficiente para un motor que pudiera ser analizado en el banco de pruebas. Se debe tener en cuenta que este análisis es suposición, ya que no se toma en cuenta las características del motor, linealidad de los puntos y que sean puntos aproximados, solo se hace con la finalidad de demostrar por qué se toma como magnitud máxima de medición un valor de 30 kgf.

Tabla 3. 8.- Magnitudes de Fuerza de Empuje.

Rango Fuerza de Empuje			
	<i>lbf</i>	<i>kgf</i>	<i>N</i>
Mínimo	0	0	0
Máximo	66.14	30	294.2

3.4.2. Flujo de Combustible

El combustible es el responsable de aportar la energía necesaria para obligar a salir el aire contenido en la cámara de combustión de forma acelerada, esto se logra mediante la detonación de mezcla aire-combustible dentro de la cámara.

El flujo de combustible en el motor Dyna Jet Red Head es de 0.09 kg/min a 0.138 kg/min [15] y para el motor PJ32 es de 1.089 a 2.087 kg/min [1]. Para saber la cantidad de L/min, Suponiendo que el combustible es gasolina y tomando como referencia una densidad de 720 kg/L [17]:

$$\text{Flujo vol. de Gasolina} \left(\frac{L}{min} \right) = \frac{\text{Flujo másico de Combustible} \left(\frac{kg}{min} \right)}{\text{Densidad de Combustible} \left(\frac{kg}{L} \right)} \quad (3.2)$$

Utilizando la ecuación (3.2) transformamos el flujo másico en flujo volumétrico, esto con la finalidad de obtener el rango de magnitudes a medir en el BP.



Tabla 3. 9.- Magnitudes de flujo de combustible.

Rango de Flujo de Combustible			
	<i>lbm/min</i>	<i>kg/min</i>	<i>L/min</i>
Mínimo	0	0	0
Máximo	4.6	2.087	2.9×10^{-3}

3.4.3. Temperatura

Como se mencionó anteriormente la temperatura a lo largo del motor PJ alcanzan valores similares en el motor Dyna Jet Red Head como en el PJ32, esto independientemente del tamaño que tiene cada uno de ellos. Como se pudo observar en la figura 3.5 (A) la temperatura se mide en puntos locales a lo largo del motor, donde se demuestra que el motor tiene partes con temperatura más alta que otras. Y en la figura 3.5 (B) se observa como la temperatura va incrementando conforme el tiempo de operación aumenta, hasta llegar a los 815.6°C aprox. en zonas con mayor temperatura. Por lo que las magnitudes de temperatura a medir en el BP son:

Tabla 3. 10.- Magnitudes de Temperatura.

Rango de Temperatura en Tubo		
	<i>°F</i>	<i>°C</i>
Mínimo	60.8	16
Máximo	1500	815.6

Donde se supone que la temperatura mínima a medir es una temperatura ambiente de 16°C cuando el motor no está operando, la cual no es obligación, ya que las temperaturas mínimas registradas son mayores cuando el motor está en operación.

3.4.4. Presión en cámara de combustión

La cámara de combustión registra diferentes valores de presión, esto es debido al funcionamiento del motor, donde en el arranque se necesita inyectar a presión el aire y combustible, después de la detonación de arranque al escapar los gases de forma acelerada, se genera un decremento de presión por debajo de la presión atmosférica, permitiendo la succión de nuevo aire y combustible hasta alcanzar una presión mayor a la atmosférica, permitido por el taponamiento del tubo de escape por los gases calientes y el retorno de



una pequeña cantidad de estos a la cámara. Debido al efecto anterior la medición de presión en la cámara de combustión en el BP debe ser medida como presión absoluta.

Tabla 3. 11.- Magnitudes de presión.

Rango Presión de Cámara		
	<i>psi</i>	<i>kPa</i>
Mínimo	0	0
Máximo	34.5	237.9

3.4.5. Frecuencia

La frecuencia es la encargada de indicar la cantidad de veces que se repite el ciclo, es decir la cantidad de veces que se repite la combustión en un periodo de tiempo. Para un motor Red Head la frecuencia esta de 237 a 262 Hz [15], mientras que para un motor PJ32 es de 66 a 82 Hz [1].

Tabla 3. 12.- Magnitudes de Frecuencia.

Frecuencia	
	<i>Hz</i>
Mínimo	66
Máximo	262

3.4.6. Flujo de Aire

El aire entrante en la cámara de combustión no deja de ser importante, ya que es el encargado de proporcionar el oxígeno necesario para la combustión, además de ser el encargado junto con el combustible de generar toda la energía de empuje, y el fenómeno de apertura y cierre de las válvulas de admisión. En el caso del motor Red Head el flujo de aire es el encargado de succionar el combustible, entrando a la cámara como mezcla aire-combustible.

No se tiene registro de la cantidad de flujo de aire entrante en otros PJ por lo que solo se refiere a los obtenidos del motor PJ32.

Tabla 3. 13.- Magnitudes de Flujo de aire.

Flujo de aire		
	<i>lbm/min</i>	<i>kg/min</i>
Mínimo	0	0
Máximo	170	77.11



Capítulo 4 Diseño Estructural Banco de Pruebas.

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta el diseño de toda la estructura que compone el banco de pruebas, cada una de las partes y los materiales que son usados, para obtener un buen funcionamiento de BP para la caracterización de motores PJ. Partiendo de lo descrito en el capítulo 3, donde se define las dimensiones de los motores aceptables y que se pueden caracterizar en el BP, además de las características de funcionamiento que pueden afectar en la estructura, como son Empuje, temperatura y vibración.

4.2. Estructura inferior de Banco de Pruebas

La estructura inferior del Banco de Pruebas (Figura 4.1) es la encargada de soportar la estructura superior del BP mediante la placa superior, además de alojar en la placa inferior lo necesario para el funcionamiento y caracterización del motor, como es: el tanque de combustible y la parte de electrónica utilizada. También debe proporcionar estabilidad estática al BP para evitar un mal funcionamiento como puede ser el volcamiento o movimiento del mismo, cuando un motor PJ se encuentre en estudio.

La estructura inferior está compuesta por perfiles PTR y placas de acero estructural definidos, además de tener llantas con freno, esto para proporcionar el fácil desplazamiento del banco de pruebas y el freno permite que el banco se mantenga estático cuando se tenga en operación. Además, la placa superior tiene el soporte fijo para la celda de carga tipo S que nos permite la medición de la fuerza de empuje.

Los planos se encuentran en el Anexo A.



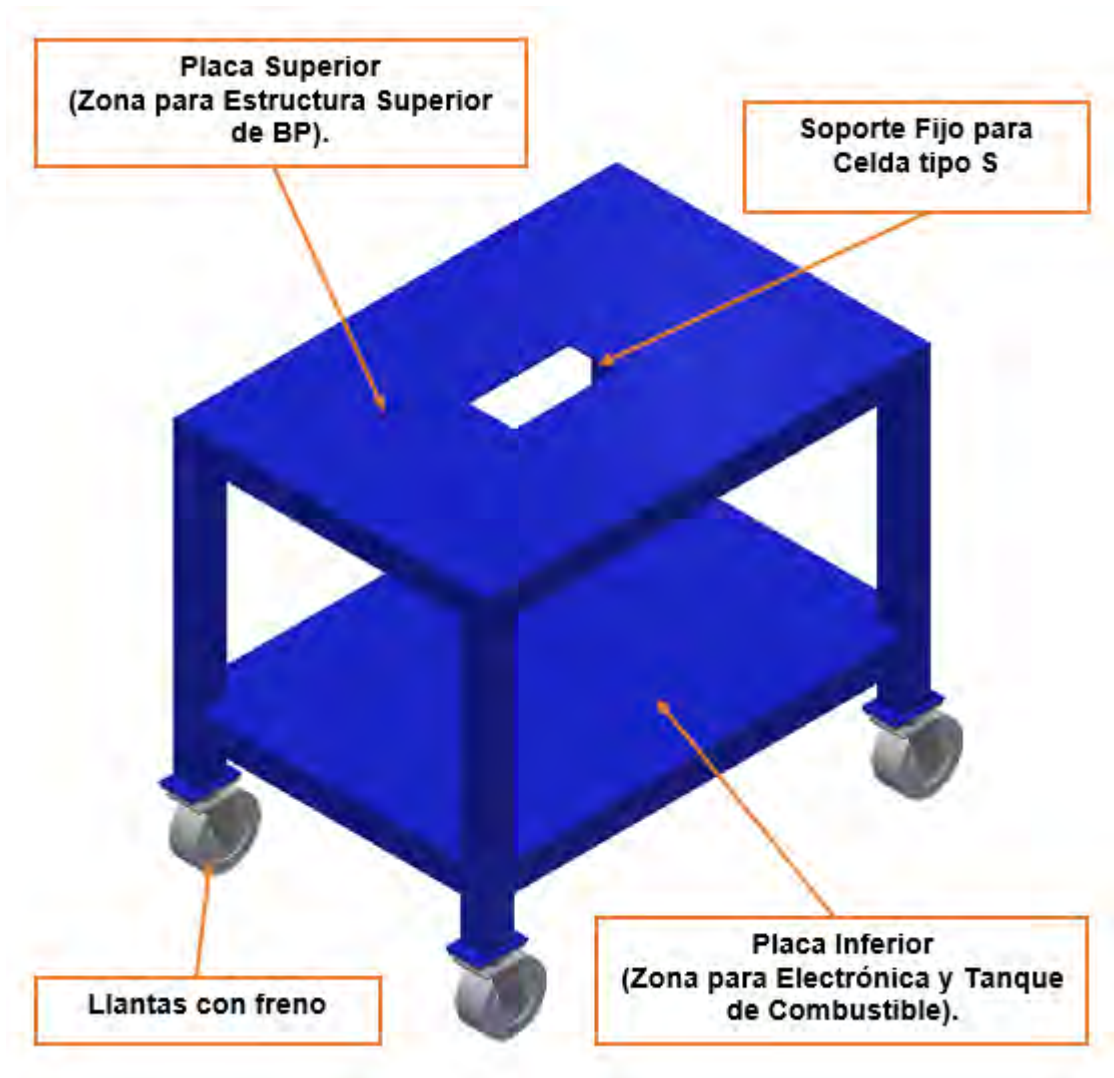


Figura 4. 1.- Partes de estructura inferior de BP.

4.3. Estructura Superior de Banco de Pruebas.

La Estructura Superior del Banco de Pruebas (Figura 4.2) es la encargada de alojar el motor PJ y además nos ayuda a medir mediante una celda de carga la fuerza de empuje del motor. En esta parte del BP se tiene partes móviles y además un soporte para PJ el cual está sometido a altas temperaturas por contacto, cuando el PJ se encuentra en funcionamiento. Además, debe soportar el peso del motor. Está conformada por ejes de acero inoxidable soportados mediante soportes guía, en los cuales se deslizan rodamientos lineales de



aluminio que sujetan la placa deslizante, donde se encuentra el soporte móvil de la celda de carga y sujetados los soportes tipo V que se encargan de alojar el motor.

Los planos se encuentran en Anexo A.

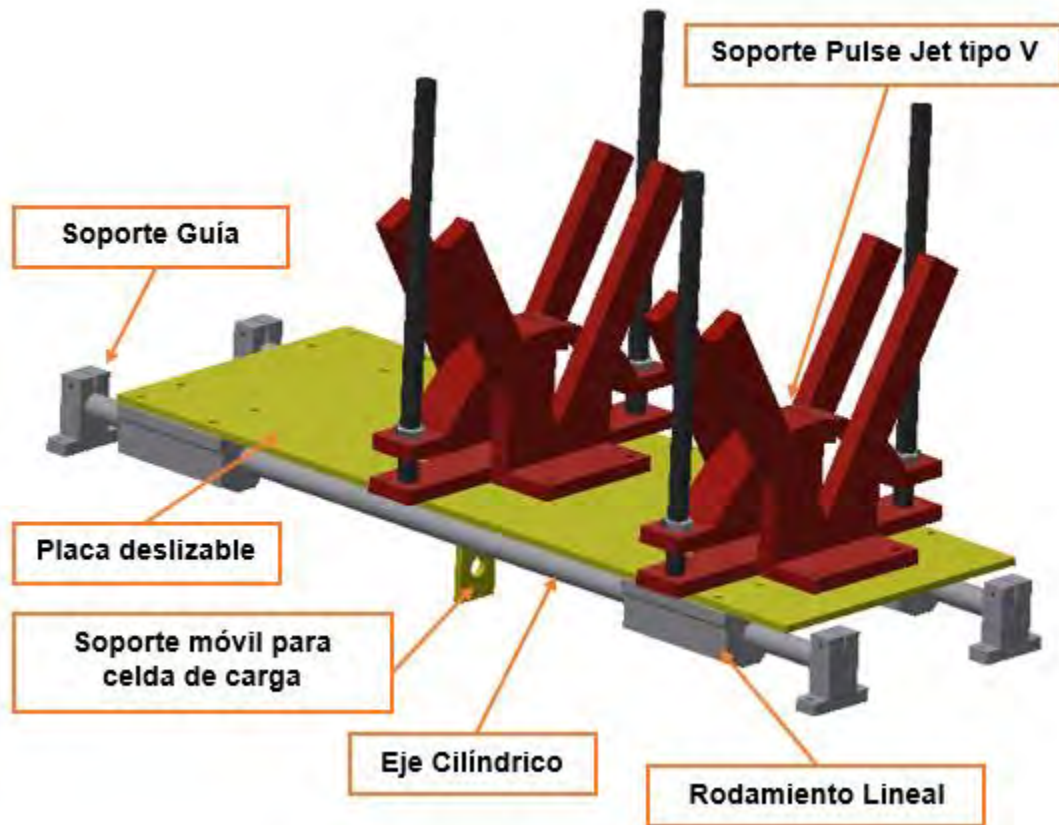


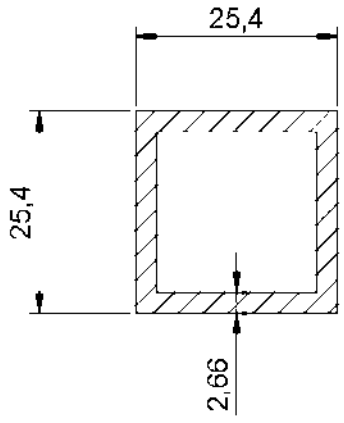
Figura 4. 2.- Partes Estructura Superior.

4.4. Materiales

Tabla 4. 1.- Materiales necesarios para Banco de Pruebas.

Material	Descripción
	PTR Acero Estructural 2" x 2" (50.8 x 50.8 mm), Cal.12 (2.66 mm) Espesor, peso de 4.05 kgf/m. Se requieren: 5.5 m.



	PTR Acero Estructural 1" x 1" (25.4 x 25.4 mm), Cal. 12 (2.66 mm) Espesor, peso 1.83 kgf/m. Se requieren: 3 m
	Placa Acero estructural, 4.8 mm de espesor, peso 37.39 kgf/m². Se requiere 1.16 m².
	Placa Acero Estructural, 9.5 mm de espesor, peso 74.77 kgf/m². Se requiere: 0.06 m².
	Placa Acero Estructural, 12.7 mm de espesor, 99.69 kgf/m². Se requiere: 0.16 m².
	Placa Acero Estructural, 31.7 mm de espesor, 249.24 kgf/m². Se requiere: 0.03 m².
	Barra circular de Acero, diámetro mínimo 13 mm. Se requiere: 1.5 m.
	Rodamiento de bolas de movimiento lineal SCS16LUU. Carga estática 1180 kgf y Dinámica 774 kgf. Se requiere: 4 unidades.

	Ruedas de poliuretano con freno, 5" de diámetro, soportan 590 kgf Se requiere: 4 unidades.
	Soporte guía eje lineal SK16. Se requiere: 4 unidades.
	Eje cilíndrico de diámetro exterior de 16 mm x 500 mm de largo, Acero Inoxidable. Se requiere: 2 unidades
	Rondana para tornillo M8. Se requiere 16 Unidades.
	Tuerca M13, paso 1.5, Acero. Se requiere: 4 unidades.
	Tuerca M8, Acero. Se requiere: 16 unidades.
	Tuerca M5, Acero. Se requiere: 8 unidades.
	Tornillo cabeza hexagonal, M5 x 25 mm, Acero. Se requiere: 8 unidades. Tornillo cabeza hexagonal, M5 x 12 mm, Acero. Se requiere: 16 unidades.
	



	Tornillo cabeza hexagonal, M12 x 40 mm, Acero. Se requiere: 2 unidades.
	Tornillo cabeza hexagonal, M8 x 16 mm, Acero. Se requiere: 16 unidades.
	Tornillo cabeza hexagonal, M6 x 16 mm, Acero. Se requiere: 8 unidades.

Softwares:

- AutoCAD: Elaboración de Planos y Esquemas.
- Inventor: Elaboración de diseño en 3D.

4.5. Ensamble Banco de Pruebas

4.5.1. Ensamble Estructura Inferior

En los planos de la estructura del BP se tiene definido las medidas y la forma en como está conformada la estructura de PTR, así como las placas superior e inferior.

En la figura 4.3 se muestran los componentes faltantes y sus ensambles para completar la estructura inferior, estos componentes son: placa superior e inferior, llantas con freno y soportes guía para los ejes de acero inoxidable, además, se muestra cómo están sujetos en caso de requerir tornillos o soldadura.



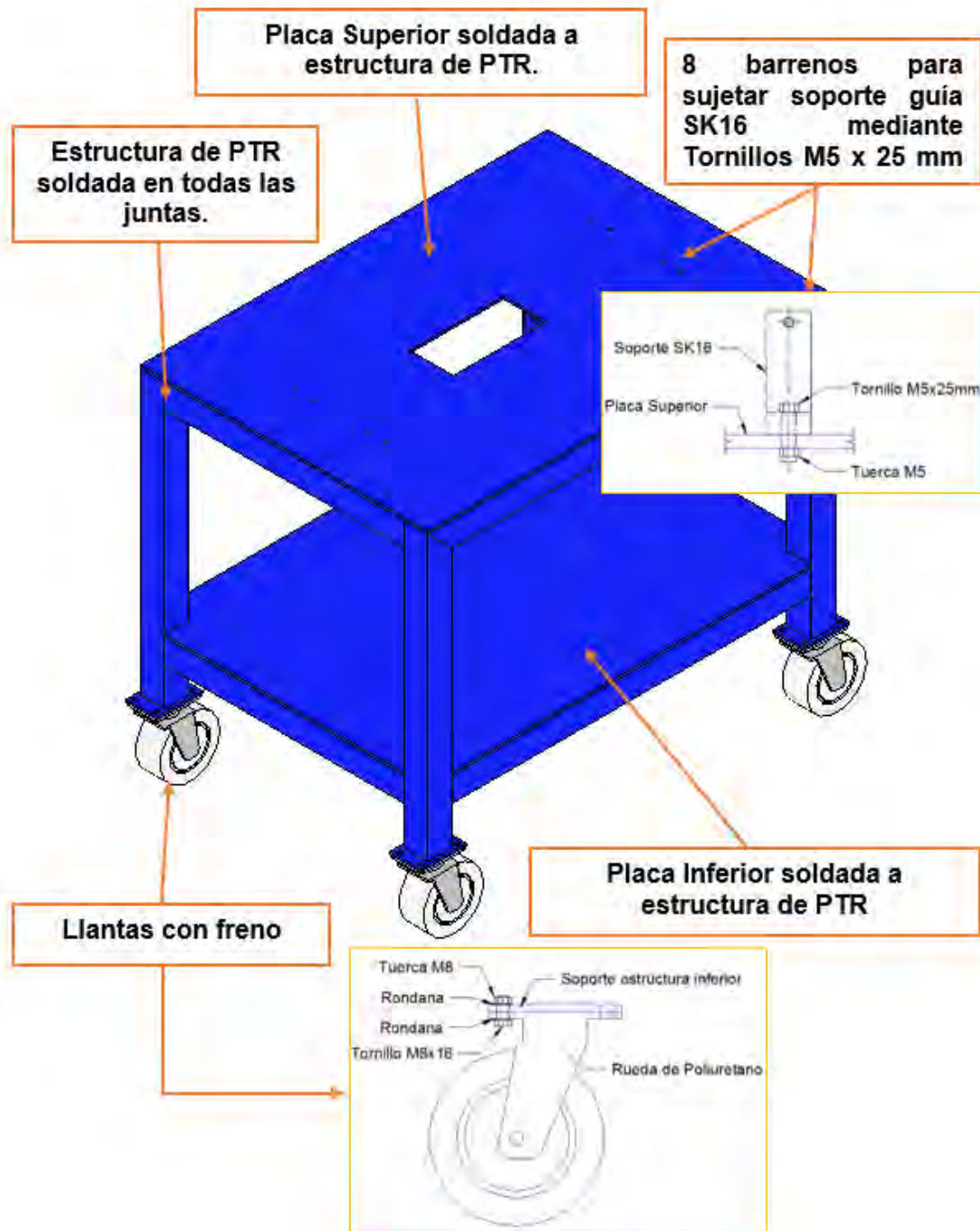


Figura 4. 3.- Ensamble Estructura Inferior.



4.5.2. Ensamble Estructura Superior

En los planos se definen las dimensiones y como se conforman, la placa deslizante y soporte tipo V. En la figura 4.4 se muestra el ensamble de la estructura superior del banco de pruebas con los componentes faltantes: ejes de acero inoxidable y rodamientos lineales.

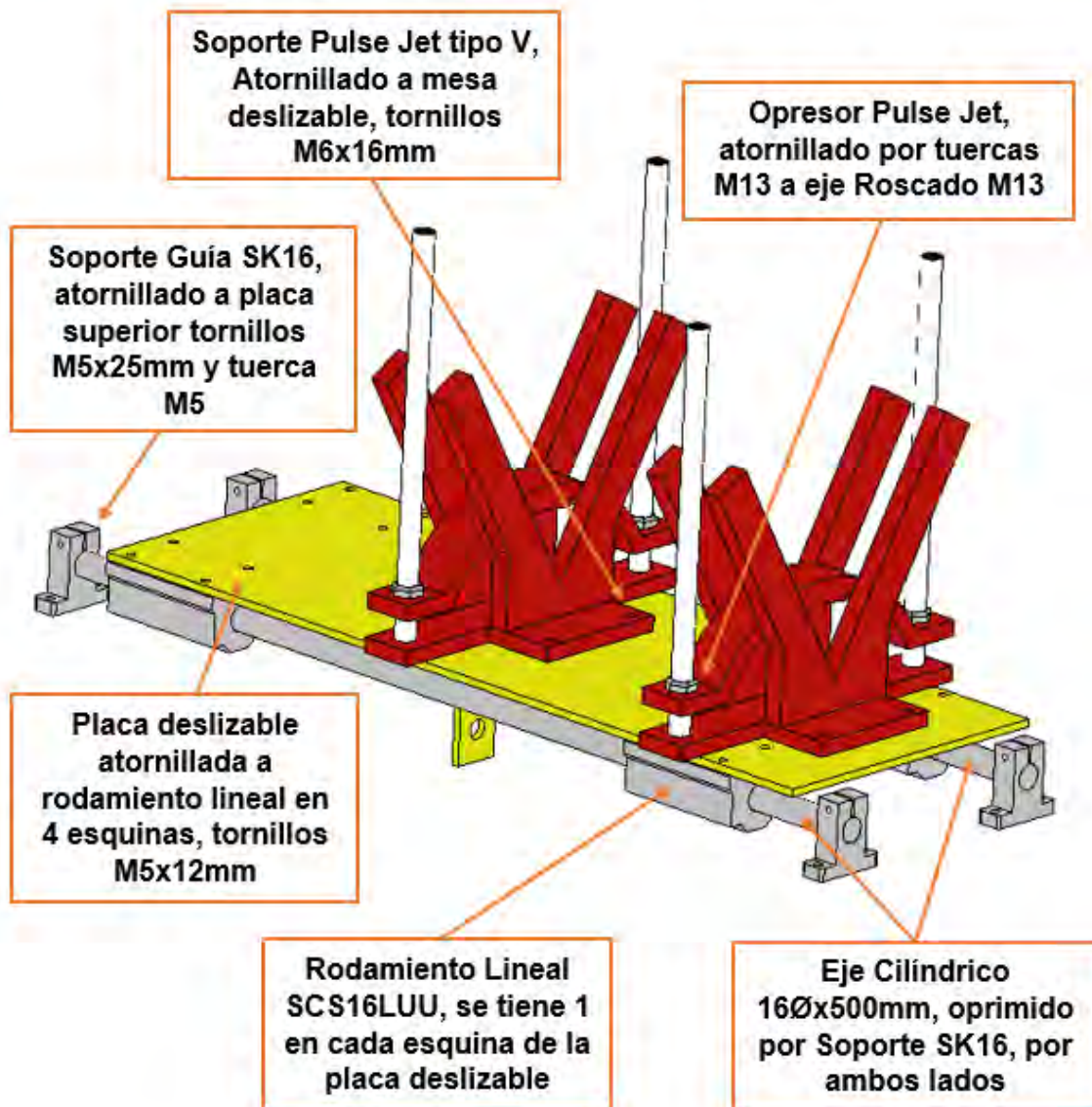


Figura 4. 4.- Ensamble Estructura Superior.



Se debe de tener cuidado a la hora de la colocación y apriete de los rodamientos lineales SCS16LUU ya que estos deben de tener fricción muy baja, es decir no deben presentar resistencia al movimiento de la placa deslizante.

El soporte móvil de la celda de carga debe ser contrario al soporte fijo, dejando un espacio para la colocación de la celda de carga ver figura 4. 5.

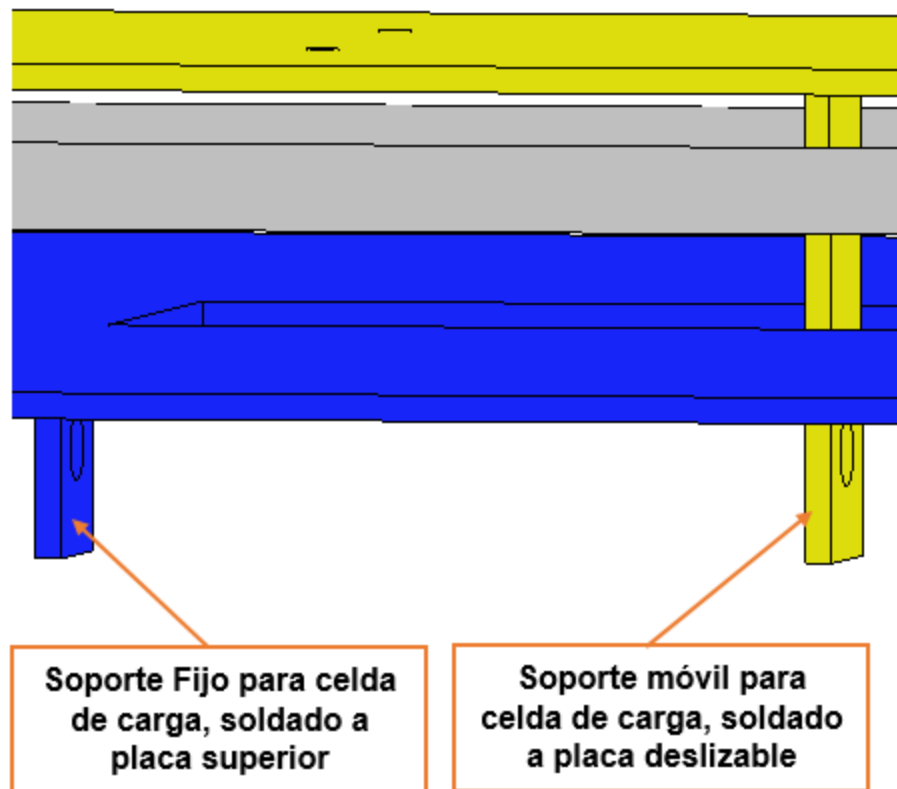


Figura 4. 5.- Posición de soportes para celda de carga.



Capítulo 5 Análisis de Diseño estructural y Resultados

5.1. Introducción

Un banco de pruebas es un equipo utilizado para la experimentación de proyectos, por lo que debe de proporcionar datos confiables y repetibles, para poder lograrlo se debe tener un buen funcionamiento de todo lo que conforma el banco de pruebas, desde lo estructural hasta los dispositivos electrónicos. En este capítulo nos referimos únicamente en analizar la estructura del BP y los resultados obtenidos, para tener un buen funcionamiento y evitar resultados erróneos a la hora de caracterizar un motor PJ.

Como se mencionó en capítulos anteriores, el BP está sometido a fuerzas de empuje en la zona de colocación del motor y a altas temperaturas en el soporte V, siendo estas las características que pueden alterar el funcionamiento adecuado de la estructura del BP, es decir la fuerza de empuje del motor puede provocar un volcamiento de la estructura inferior del BP y también puede generar deformaciones y altos esfuerzos en la estructura superior. Las altas temperaturas pueden provocar alteración en las propiedades del soporte V, debido a la temperatura y los esfuerzos de contacto. Por lo anterior, en este capítulo se demuestra y se aprueba el funcionamiento de la parte estructural del BP teniendo cambios aceptables, referidos a las propiedades de los materiales y al diseño estructural definidos para el BP.

5.2. Análisis estático estructura inferior

5.2.1. Metodología

La estructura inferior del BP es capaz de soportar una fuerza de empuje máxima de 28 kgf generada por un motor PJ, sin sufrir volcamiento, y despreciando que haya un movimiento, es decir, se supone para el análisis que las ruedas de poliuretano con freno no permiten el movimiento o deslizamiento en la zona de contacto de estas, con la superficie de apoyo.



Para demostrar que el BP no sufre un volteo al operar un motor con un empuje de 28 kgf, se realizó un estudio estático donde se supone no desplazamiento en los puntos A y B, además de que se trata la estructura como un cuerpo rígido en su totalidad. La fuerza P está posicionada a una distancia donde se supone un motor con un diámetro de 160 mm que es el diámetro máximo admitido y esta actúa en la parte central del tubo, y sabiendo que esta distancia es menor debido a que la fuerza P realmente actúa sobre el banco de pruebas en la zona de contacto con el soporte V.

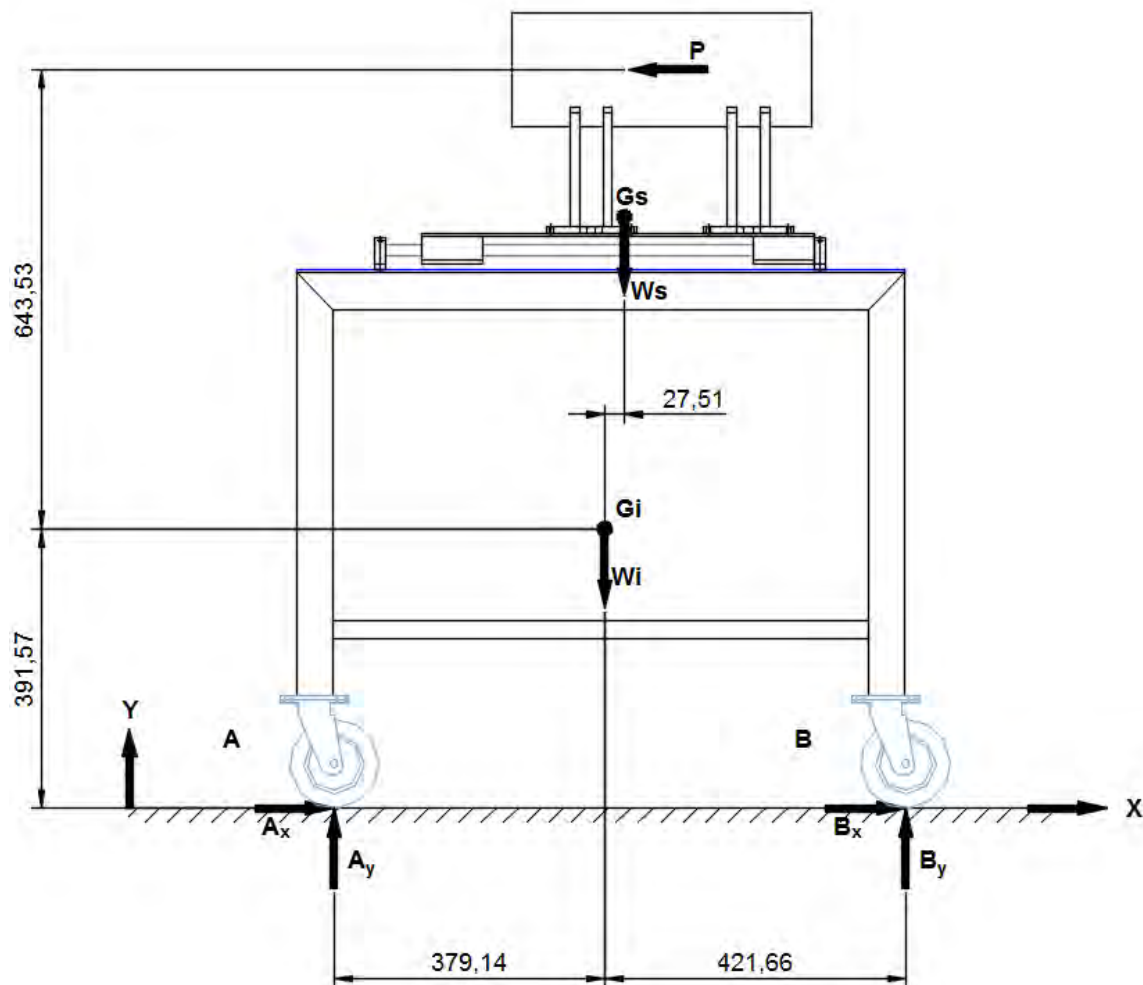


Figura 5. 1.- Diagrama de cuerpo libre Banco de Pruebas (Unidades en mm).



Para determinar W_s y W_i , se calcula el peso de la estructura superior y de la estructura inferior respectivamente:

Tabla 5. 1.- Total peso aproximado de estructura inferior Banco de Pruebas (W_i).

Peso total aproximado de W_i			
<i>Pieza</i>	<i>Cantidad de Material</i>	<i>Peso Especificado</i>	<i>Peso Total Pieza</i>
PTR 2" x 2"	5.2752 m	24.30 kgf/6m	21.365 kgf
PTR 1" x 1"	2.5 m	11.22 kgf/6m	4.675 kgf
Placa 4.8mm	1.002 m ²	37.39 kgf/m ²	37.47 kgf
Ruedas con freno	4 unidades	No especificado	1.5 kgf
		Total	65.01 kgf

Tabla 5. 2.- Peso total aproximado estructura superior Banco de Pruebas.

Peso total aproximado de W_s			
<i>Pieza</i>	<i>Cantidad de Material</i>	<i>Peso Especificado</i>	<i>Peso Total Pieza</i>
Placa 4.8mm	0.1128 m ²	37.39 kgf/m ²	4.2148 kgf
Placa 9.5mm	0.0316 m ²	74.77 kgf/m ²	2.3614 kgf
Placa 12.7mm	0.04136 m ²	99.69 kgf/m ²	4.1232 kgf
Placa 31.7	0.005755 m ²	249.24 kgf/m ²	1.4343 kgf
Eje Roscado	N/A	No especificado	.5 kgf
Soporte y deslizamiento	N/A	No especificado	1.5 kgf
		Total	12.6994 kgf



Ya que se conocen W_i y W_s se realizó sumatoria de fuerzas y momentos para un cuerpo estático en el punto G_i :

$$\overset{+}{\rightarrow} \sum F_x = 0 \quad (5.1)$$

$$\overset{+}{\uparrow} \sum F_y = 0 \quad (5.2)$$

$$\overset{+}{\curvearrowright} \sum M_{Gi} = 0 \quad (5.3)$$

$$\text{De Ec. (5.1): } A_x + B_x - P = 0 \quad (5.4)$$

$$\text{De Ec. (5.2): } A_y + B_y - W_i - W_s = 0 \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \text{De Ec. (5.3): } & A_x(0.391)m - A_y(0.379)m + B_x(0.391)m + B_y(0.421)m \\ & + P(0.643)m - W_s(0.0275)m = 0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Donde: A_x, B_x, A_y, B_y y P son incógnitas.

P se trata como desconocida, con la finalidad de saber cuál es su magnitud en el momento exacto para volcar el BP. Y en el entendido de que P debe ser igual o mayor que 28 kgf. En el momento exacto antes de que la estructura tienda a volcarse por efecto de la fuerza P , la reacción $B_y = 0$ esto es debido a que en el punto B la estructura inferior va a tender a levantarse por el efecto de volteo, y como consecuencia la normal para el punto B es 0.

Si $N_B = (\text{Normal en B}) = 0$ y $\mu_s = \text{Coef. de fricción estática} \therefore B_x = \mu_s * N = 0$
Sustituyendo B_y, B_x en ecuaciones (5.4), (5.5) y (5.6):

$$A_x - P = 0 \quad (5.7)$$

$$A_y - W_i - W_s = 0 \quad (5.8)$$



$$A_x(0.391)m - A_y(0.379)m + P(0.643)m - Ws(0.0275)m = 0 \quad (5.9)$$

Despejando A_x y A_y de ecuaciones (5.7) y (5.8):

$$A_x = P \quad (5.10)$$

$$A_y = Wi + Ws \quad (5.11)$$

Sustituyendo ecuaciones (5.10) y (5.11) en Ec. (5.6):

$$P(0.391)m - (Wi + Ws)(0.379)m + P(0.643)m - Ws(0.0275)m = 0 \quad (5.12)$$

Reduciendo Ec. (5.12):

$$P(1.034)m - Wi(0.379)m - Ws(0.4065)m = 0 \quad (5.13)$$

Despejando P de Ec. (5.13):

$$P = \frac{Wi(0.379)m + Ws(0.4065)m}{(1.034)m} \quad (5.14)$$

Sustituyendo en Ec. (5.14), $Wi = 65.01 \text{ kgf}$ y $Ws = 12.6994 \text{ kgf}$:

$$P = \frac{(65.01)(0.379)\text{kgf} * m + (12.6994)(0.4065)\text{kgf} * m}{(1.034)m} = 28.82 \text{ kgf} \quad (5.15)$$

Se puede observar del análisis anterior que se necesita una fuerza de empuje de 28.82 kgf o mayor para generar un volteo en el banco de pruebas, en el capítulo 3 se definió que el empuje máximo a medir por el BP es de 30 kgf, se necesita asegurar que la estructura no se va a voltear con la fuerza de empuje. Para saber el peso de la placa SP necesaria para que el BP se mantenga sin volteo, se repite el método anterior pero ahora $P=36 \text{ kgf}$ con un factor de diseño de 1.2.

$$\text{Factor de diseño} = \frac{P_{max}}{P_{perm}} = \frac{36}{30} = 1.2 \quad (5.16)$$



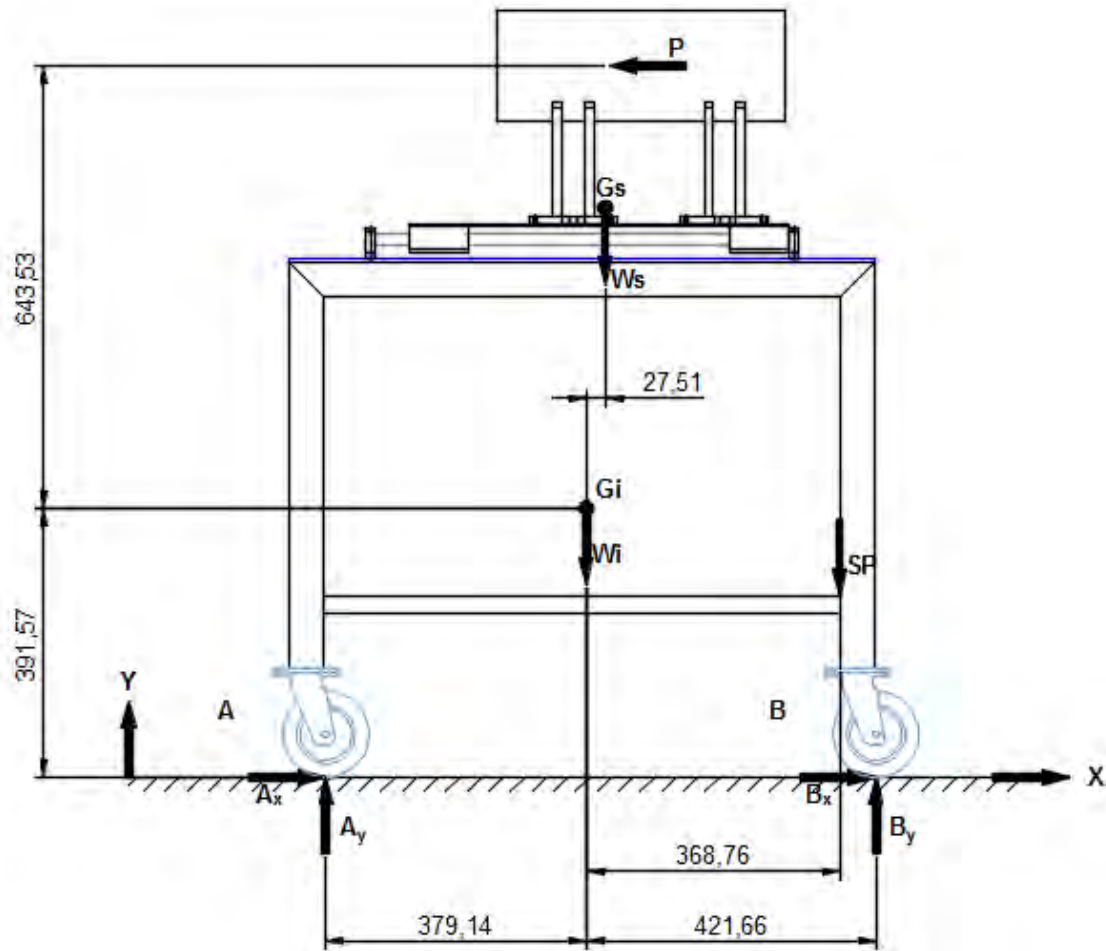


Figura 5. 2.- Diagrama de cuerpo libre (SP) mm.

Partiendo de ecuaciones (5.1), (5.2) y (5.3):

$$\text{De Ec. (5.1): } A_x + B_x - P = 0 \quad (5.17)$$

$$\text{De Ec. (5.2): } A_y + B_y - W_i - W_s - SP = 0 \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} \text{De Ec. (5.3): } & A_x(0.391)m - A_y(0.379)m + B_x(0.391)m + B_y(0.421)m \\ & + P(0.643)m - W_s(0.0275) - SP(.368)m = 0 \end{aligned} \quad (5.19)$$

Donde: $B_x = 0$, $B_y = 0$ y $P = 36 \text{ kgf}$.

Reduciendo las ecuaciones (5.16), (5.17) y (5.18):

$$A_x = P \quad (5.10)$$

$$A_y = W_i + W_s + SP \quad (5.20)$$



$$SP = \frac{P(1.034)m - Wi(0.379)m - Ws(0.4065)m}{(0.747)m} \quad (5.21)$$

$$SP = \frac{(36)(1.034) - (65.01)(0.379) - (12.6994)(0.4065)}{(0.747)} \text{ kgf} \quad (5.22)$$

$$SP = 9.94 \text{ kgf} \quad (5.23)$$

Por lo tanto, el sobrepeso SP que debe agregarse es de 9.94 kgf para evitar el volteo cuando se esté en estudio un motor con fuerza de empuje de 30 kgf.

5.2.2. Resultados

En los resultados obtenidos del análisis estático de la estructura inferior, nos dimos cuenta que, es necesaria una fuerza de 28.82 kgf o mayor, para generar que el BP vuelque. Teniendo en cuenta la fuerza de empuje generada por motores en pequeño con una longitud de 545 mm, es de 2 kgf, consideramos que en el diseño estructural del BP propuesto se pueden estudiar una amplia variedad de motores PJ de diferentes dimensiones que estén dentro de las dimensiones permisibles definidas y donde la fuerza de propulsión máxima sea de 25 kgf, dejando un factor de seguridad de 3.82 kgf.

Ahora bien, si se pretende estudiar un motor cuyas dimensiones se encuentren dentro de las permisibles por el BP y que genere más de 25 kgf, hasta 30 kgf de empuje sin que el BP vuelque, es necesario poner un sobrepeso (SP) para asegurar el equilibrio estático.

Sabemos que el sobrepeso SP necesario es de 9.94 kgf. La placa SP es una placa de acero de 38.1 mm, dimensiones de 500x70mm, con un área de 0.035 m² y un peso específico de 299.08 Kg/m², aportando una fuerza SP = 10.4678 kgf, la cual cumple con la fuerza requerida.

5.3. Análisis de Esfuerzos y deformación estructura superior.

La zona crítica, donde los esfuerzos y las deformaciones toman importancia, es la estructura superior, debido a que se tienen cargas sobre ejes, soportes y placas, que son elementos que pueden tener una deformación considerable o rebasar su límite de esfuerzo a la tensión si no se tiene cuidado a la hora del diseño. En el análisis realizado en ANSYS



se demuestra que el diseño para la estructura superior es aceptable referido a los resultados obtenidos.

5.3.1. Metodología

Para analizar los esfuerzos y deformaciones en la estructura superior del banco de pruebas, se apoyó del software ANSYS Workbench, Static Structural, mediante las siguientes suposiciones:

- No fricción en los rodamientos lineales (Eficiencia de 100%).
- Que la fuerza de empuje es de 30 kgf (294.2 N) y se encuentra uniformemente distribuida en los dos soportes V.
- Un peso de Motor de 15 kgf (147.09 N) soportado solamente por el soporte V central. Esta suposición tiene fundamento en que el peso del motor debe ser menor a la mitad del empuje máximo que puede generar, por ejemplo, el motor Dyna Jet tiene un peso de .460 kgf [16], mientras que el motor Argus tenía un peso de 153 kgf [8].
- En las superficies de contacto del soporte V con el motor se tiene 800°C. Esto se debe a que la temperatura después de un tiempo de operación puede llegar a tener estas magnitudes (ver subcapítulos 3.3 y 3.4.3). Esto se realizó mediante el contacto del soporte V con un tubo de Ø16 mm y espesor de 1 mm, a 800°C.

El mallado se hizo mediante las siguientes características:

- Tamaño de malla 0.005 m.
- Método de mallado hexaedro dominante.
- Relevance de 100.
- Para el estudio del soporte V: el tamaño de malla fue de 0.008 m, debido a la alta temperatura y si se reducía la malla el cálculo fallaba por los recursos del CPU. Ver figuras 5. 3 y 5. 4.



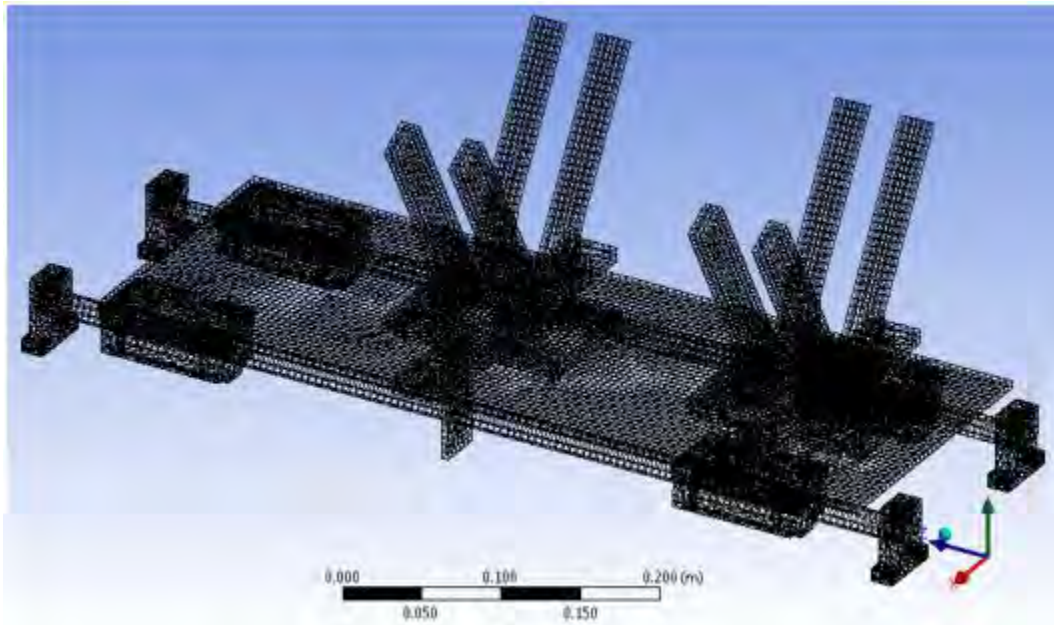


Figura 5. 3.- Mallado Estructura Superior.

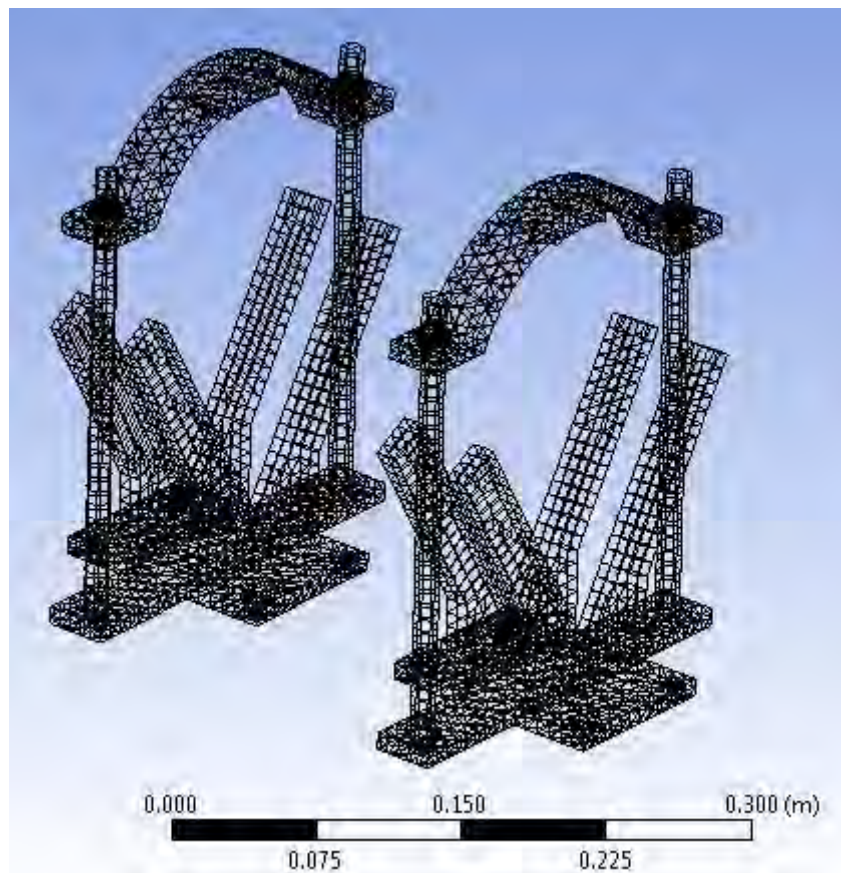


Figura 5. 4.- Mallado soporte V.



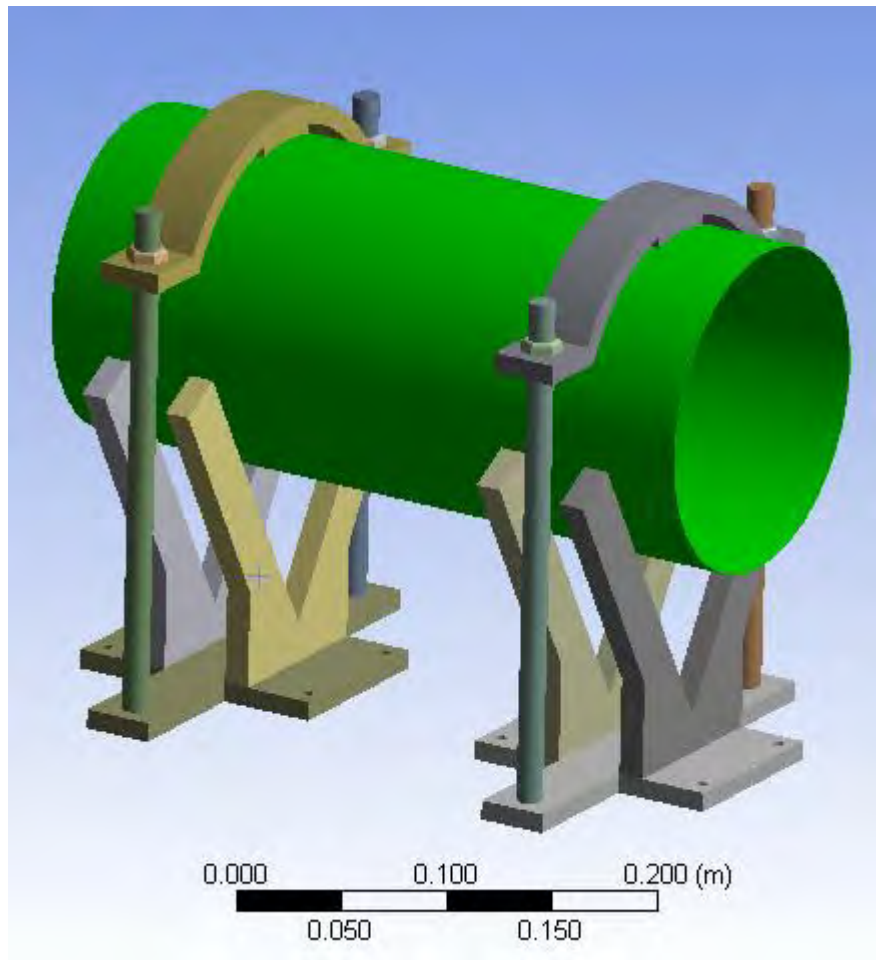


Figura 5. 5.- Soporte V con tubo a 800°C.

Para visualizar de forma adecuada, las áreas de estudio, todas las imágenes se presentan sin el tubo soportado, ya que este solo se usa para proporcionar una temperatura de 800°C en la zona de contacto.

5.3.2. Resultados

En los resultados obtenidos mediante ANSYS Workbench, se tiene una deformación máx. de 0.000111 m en la zona del soporte V y de 7.4117×10^{-5} m en la placa deslizante, eje y rodamientos lineales (Figura 5. 6). Para el análisis de esfuerzos (Figura 5.7) se obtuvo un registro máx. de 2.7647×10^8 Pa, el cual no se visualizó en la estructura y se atribuyó al mallado del análisis. En las zonas críticas que son, el contacto de ejes con rodamientos lineales, se registró un esfuerzo máx. de 2.150×10^8 Pa, en una zona donde se presenta aluminio y acero inoxidable con una resistencia a la tensión de 9.653×10^8 Pa (14 ksi) y 5.171×10^8 Pa (75ksi) [18], por lo que no se rebasa el límite de resistencia a tensión y no se



tiene deformación plástica, presentando un factor de seguridad de 4.49 en aluminio y 2.4 en acero inoxidable. La placa deslizante presenta esfuerzos inferiores a 6.1439×10^7 Pa, mientras que para el acero estructural se presenta una resistencia a la tensión de 2.482×10^8 Pa (36Ksi) [18], quedando claro que la placa deslizante presenta un factor de seguridad de 4.0.

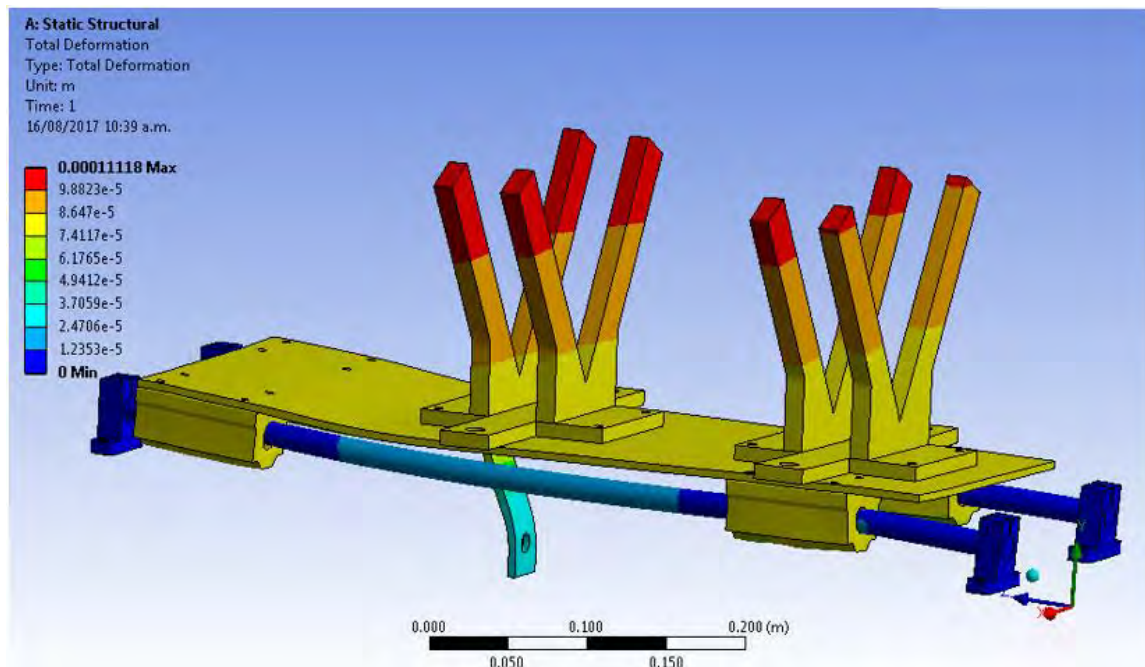


Figura 5. 6.- Deformación total estructura superior.



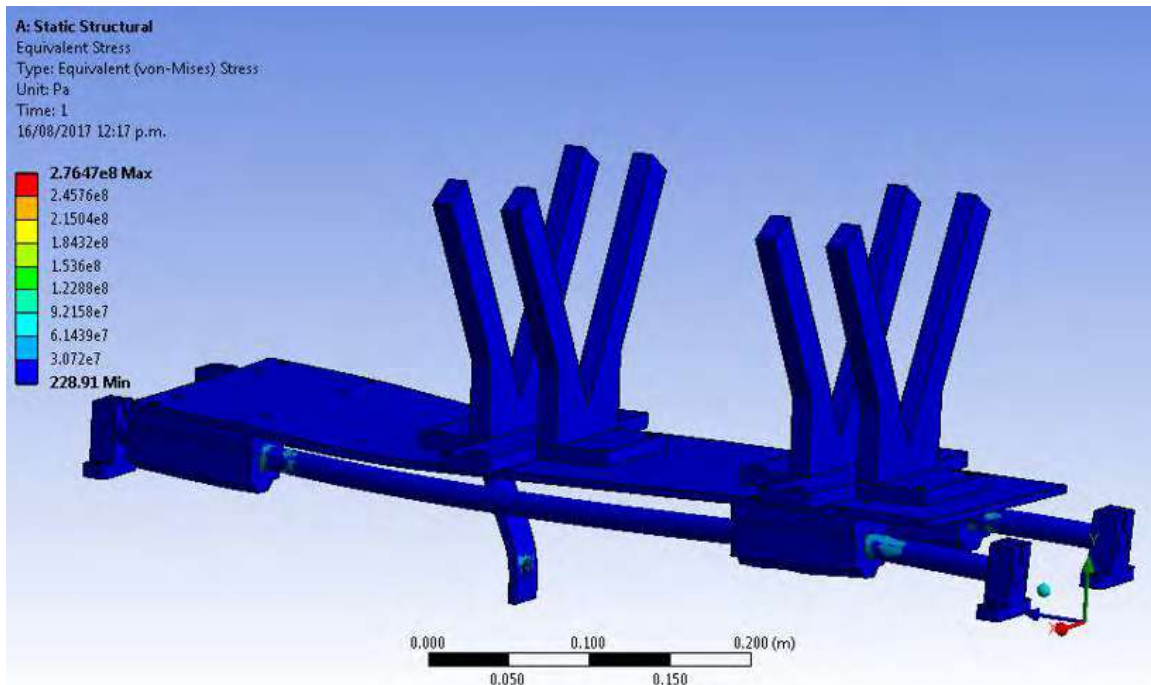


Figura 5. 7.- Esfuerzos equivalentes (von-Mises) estructura superior.

Se mencionó anteriormente que en la zona de contacto entre el soporte V y el pulsorreactor se tienen condiciones donde la temperatura puede llegar hasta los 800°C, modificando el comportamiento de las características del material del soporte, en esta zona de contacto se obtuvieron registros de deformación total menores a 0.0016712 m y esfuerzos menores a 3.6249×10^8 Pa (Figuras 5. 8 y 5. 9), por lo que en esta zona se debe de usar un material de acero estructural ASTM-A913 grado 65, que presenta una resistencia a la tensión de 4.482×10^8 Pa (65 ksi) [18], con factor de seguridad de 1.23. Se debe mencionar que, para obtener y analizar estos resultados, se hizo mediante condiciones de funcionamiento del BP críticas, lo cual puede generar resultados muy por encima de lo que puede ser un funcionamiento real.



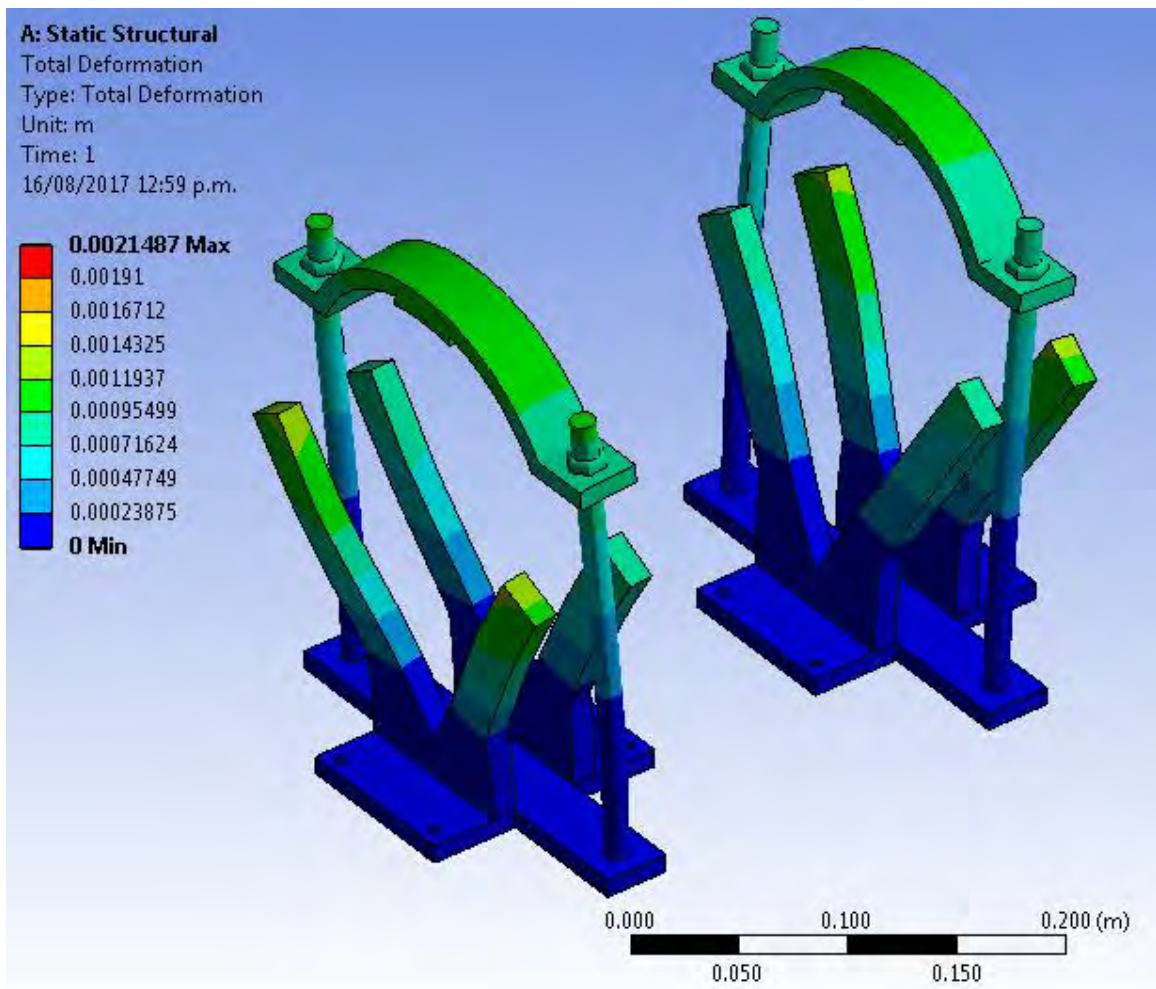


Figura 5. 8.- Deformación total soporte V.



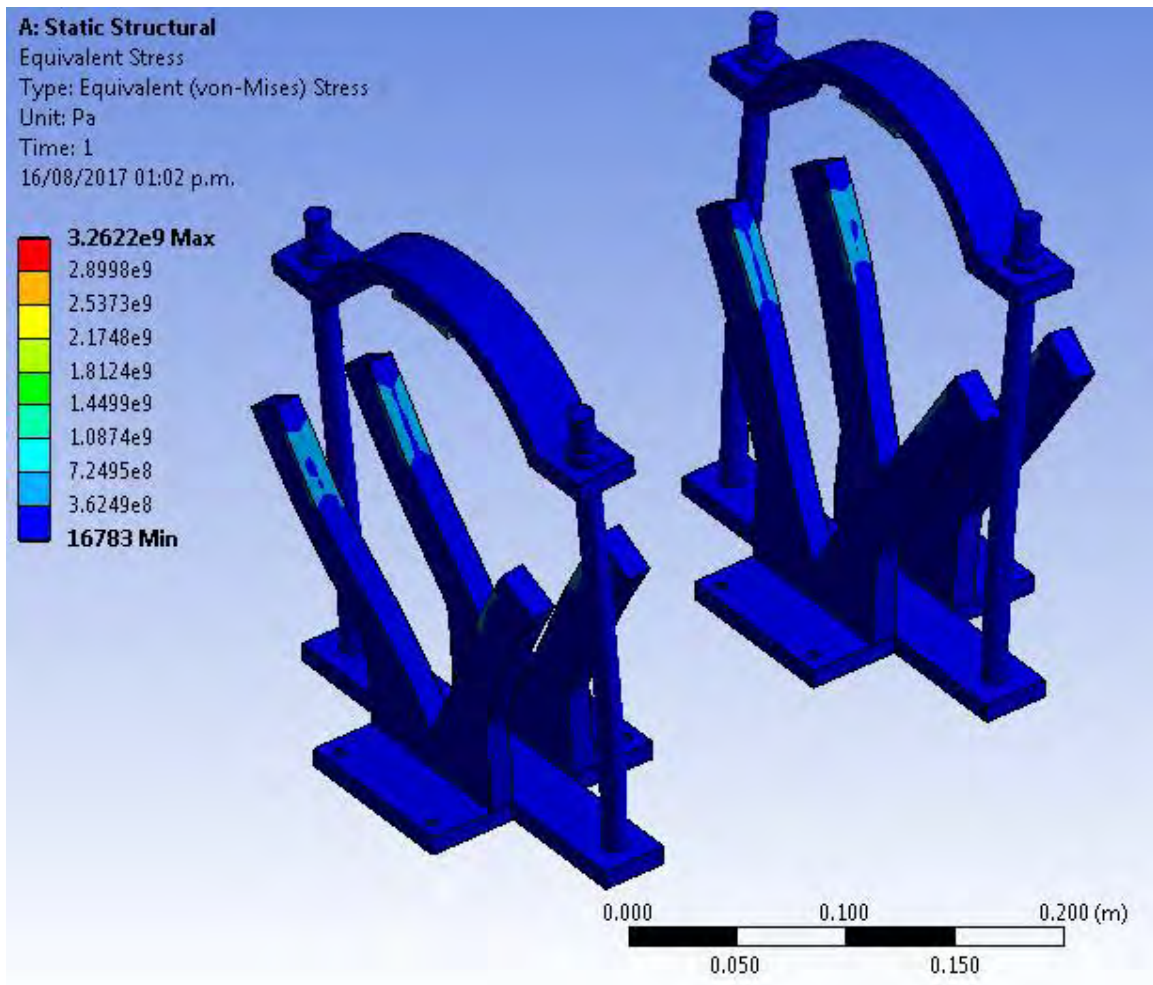


Figura 5. 9.- Esfuerzo equivalente (von-Mises) soporte V.

5.4. Materiales

- ANSYS 17.0: Análisis de esfuerzos y deformaciones.
- Inventor: Generación del diseño sólido del BP para el análisis en ANSYS.
- AutoCAD: Dibujos para análisis estático de la estructura inferior.



Capítulo 6 Adquisición de Datos

6.1. Introducción

Un sistema de adquisición de datos es el encargado de recoger señales de voltaje o corriente, provenientes de un dispositivo encargado de medir un fenómeno físico, convirtiendo estas señales en valores digitales que pueden ser manipulados por un software. Los sistemas DAQ son instrumentos muy utilizados para realizar investigación de laboratorio, como pueden ser pruebas y mediciones, automatización, etc. [19]. En este capítulo se describe cada uno de los componentes necesarios para la medición de las variables de interés del BP y convertir estas variables en valores que puedan ser interpretados por un usuario.

6.2. Metodología

Para que el BP funcione como una herramienta para la caracterización de motores PJ, se necesita hacer pruebas y mediciones de las características de funcionamiento que interesan y que se encuentran descritas en el capítulo 3, estas mediciones se realizan mediante un sistema de adquisición de datos, el cual se va a encargar de transformar las variables físicas del motor PJ en variables que el usuario pueda interpretar y manipular.

Un sistema DAQ se compone por cinco elementos básicos (Figura 6. 1), estos elementos son [19]:

- Sensores.
- Cableado eléctrico.
- Acondicionamiento de señal.
- DAQ hardware.
- DAQ software.



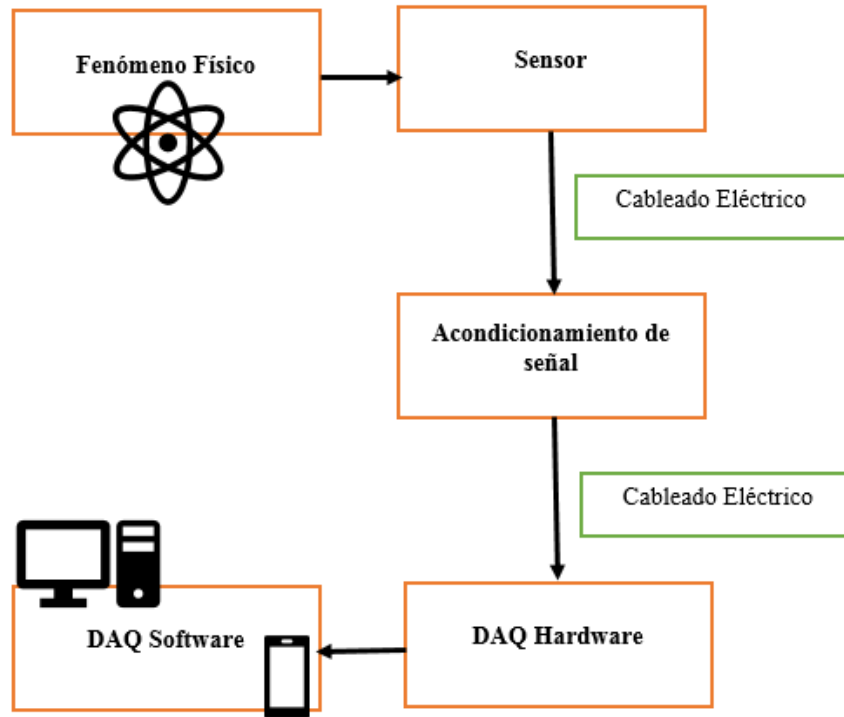


Figura 6. 1.- Elementos de sistema DAQ.

6.3. Selección de Sensores

La selección de sensores se realizó cumpliendo con las características de funcionamiento y las magnitudes a medir, descritas en el capítulo 3. Además, se tomaron otros factores a la hora de seleccionar un sensor como fueron costo, condiciones de funcionamiento, compatibilidad y practicidad al montaje. En la siguiente tabla se muestra cada uno de los sensores y sus características:

Tabla 6. 1.- Sensores.

	Celda de carga tipo S (LCM101-50) • Capacidad de Carga: 50 kgf. • Excitación: 10 Vcc. • Salida: $3\text{mV/V} \pm 0.0075\text{mV/V}$. • Linealidad: $\pm 0.03\%$. • Histéresis: $\pm 0.02\%$. • Repetibilidad: $\pm 0.01\%$.
---	---



	Termopar de Contacto (XCIB) Tipo 4 • Hasta 1038°C. • Sonda tipo K. • Cables aislados con fibra cerámica. • Flexibles, resistencia a la abrasión.
	Sensor de Presión Absoluta (PX309) • Capacidad: 0 a 3.4 bar. • Excitación: 10 Vcc. • Salida: 100mV. • Span: ±0.03%/°C. • Acero Inoxidable.
	Caudalímetro de Combustible • Capacidad: 0 a 10 L/min. • Alimentación: 10 Vcc. • Exactitud: ±0.5%.

Para la medición de flujo de aire se tomó la decisión de hacerlo mediante un indicador de velocidad de aire o mediante un anemómetro de diámetro definido (D), esto debido a que el flujo de aire entra por el difusor de admisión y tiene diámetro variable para cada motor dificultando la colocación de un sensor fijo. Ver tabla 6.2.

$$\text{Flujo Volumétrico} = A * \text{Velocidad} = \frac{\pi D^2}{4} * V_{\text{aire}} \quad (6.1)$$

Tabla 6. 2.- Anemómetro.

	Anemómetro (HHF11) • Velocidad: 0.3 a 35 m/s. • Volumen: 0 a 99.999 m³/min. • Temperatura: -20 a 60 °C. • Resolución: 0.1. • Precisión: ±5%.
---	---



6.4. Acondicionamiento de Señal

La mayoría de señales de salida arrojadas por los sensores, necesitan una preparación antes de que estas puedan ser interpretadas por un dispositivo DAQ. Estas señales pueden tener algunos tipos de acondicionamiento como [19]:

- Amplificación.
- Atenuación.
- Filtrado.
- Aislamiento.
- Excitación.
- Linealización.
- Compensación de la unión fría.

Con la finalidad de facilitar el acondicionamiento de señal para cada uno de los sensores, se realizó mediante un acondicionador de señal universal.

Tabla 6. 3.- Acondicionador de Señal Universal.

	Acondicionador de Señal Universal (Z170REG) • Alimentación: 10 Vcc. • Voltaje de entrada: 0 a 10 V (120kW). • Corriente de entrada: 0 a 20 mA Activa/Pasiva (50W). • Termopar de tipo: J, K, R, S, T, B, E, N. • Voltaje de Salida: 0 a 10 V (20kOhm) Programable. • Corriente de salida: 0 a 20 mA (600W).
---	--



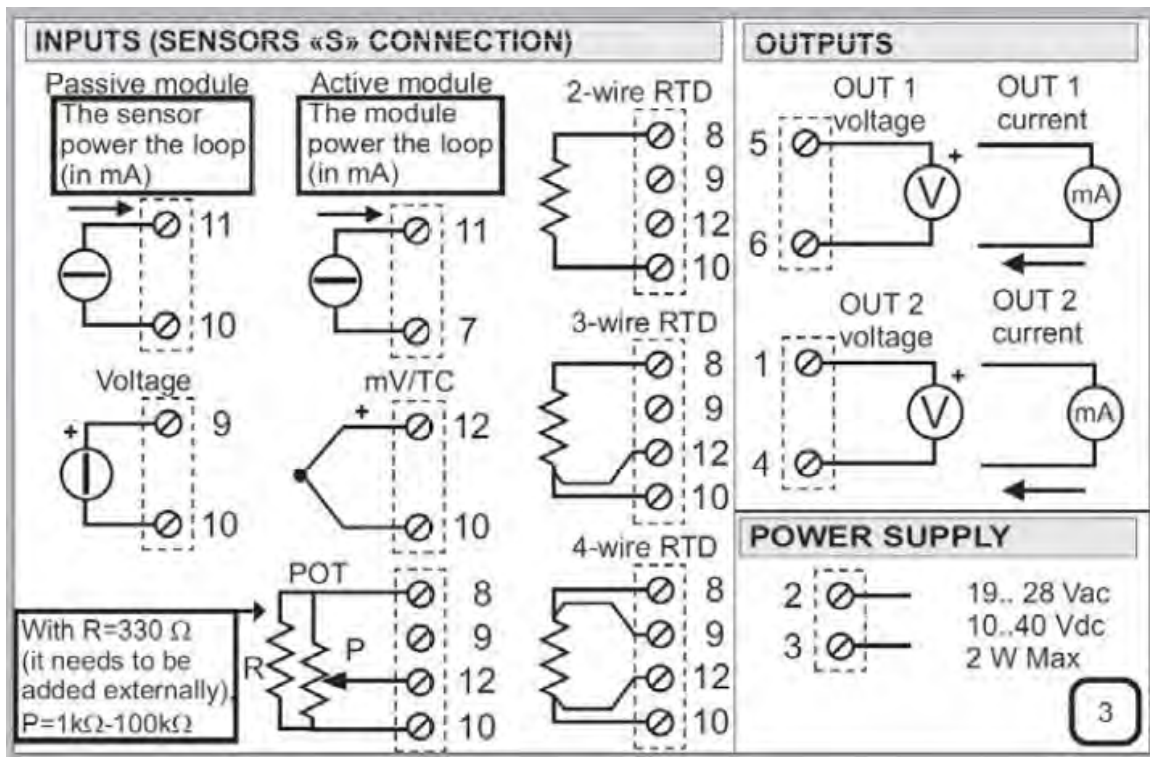


Figura 6. 2.- Entradas, salidas y alimentación de acondicionador de señal.

6.5. DAQ Hardware

El dispositivo DAQ es el encargado de recolectar las señales provenientes de los sensores y que primeramente pasan por un acondicionamiento (de ser necesario), para ser captadas y convertidas en señales digitales, y que estas a su vez sean traducidas por el software DAQ para arrojarlas al usuario en datos que pueda interpretar. Se pueden encontrar diferentes tipos tanto de hardware como de software DAQ.

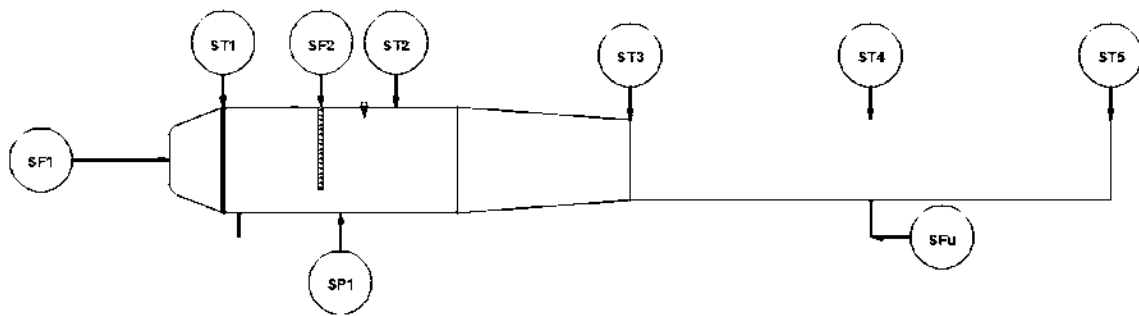
Tabla 6. 4.- Dispositivo DAQ.

	Dispositivo DAQ • 13 líneas de E/S digitales, un contador de 32 bits. • 8 entradas Analógicas (14 bits de resolución, 20ks/s).
---	---



6.6. Montaje de Sensores

Para la medición de las características de funcionamiento del motor PJ como son temperatura, presión en la cámara de combustión y empuje, se necesita la colocación directa de los sensores en contacto con el motor, para que estos puedan tener una medida creíble.



SF1-Sensor de Flujo (Aire Entrada).
SF2-Sensor de Flujo (Combustible).
ST-Sensor de Temperatura.
SP-Sensor de Presión.
SFu-Sensor de Fuerza.

Figura 6. 3.- Esquema de colocación de sensores.

El único sensor que requirió de una colocación dentro del motor fue el sensor de presión, ya que este es el encargado de medir la presión dentro de la cámara de combustión, la colocación de este sensor se realizó mediante la perforación del tubo PJ a la altura de la cámara de combustión y soldar un injerto con rosca hembra que nos permita el roscado del sensor, otra opción es, sujetar el sensor con una tuerca colocada en la parte interna de la cámara pero para ello se debe tener fácil acceso a la cámara para el apriete de esta, como es el caso de los motores red head la cual se puede quitar con facilidad.

Para la colocación de termopares, debido a que son sensores de contacto, su colocación se hizo mediante abrazaderas las cuales fijan los termopares al motor y permiten la colocación de estos en motores con diámetro variable, además que son fabricadas de acero inoxidable el cual soporta las temperaturas registradas (Figura 6. 4).



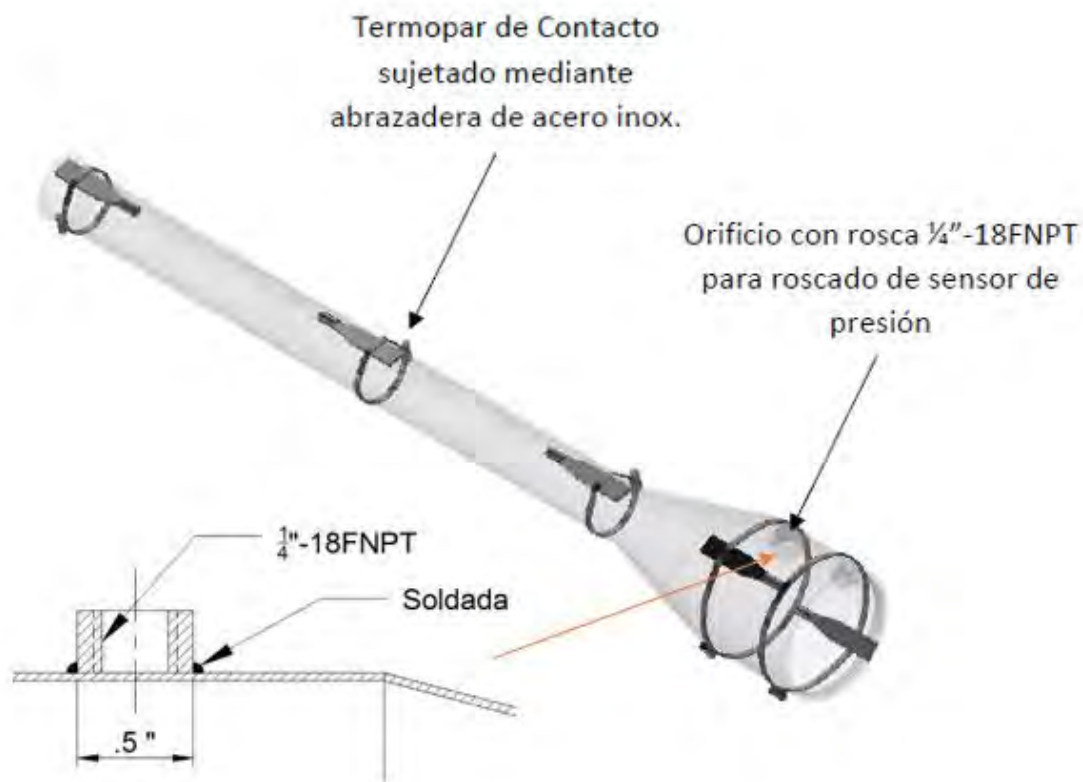


Figura 6. 4.- Montaje de sensor de presión y termopares.

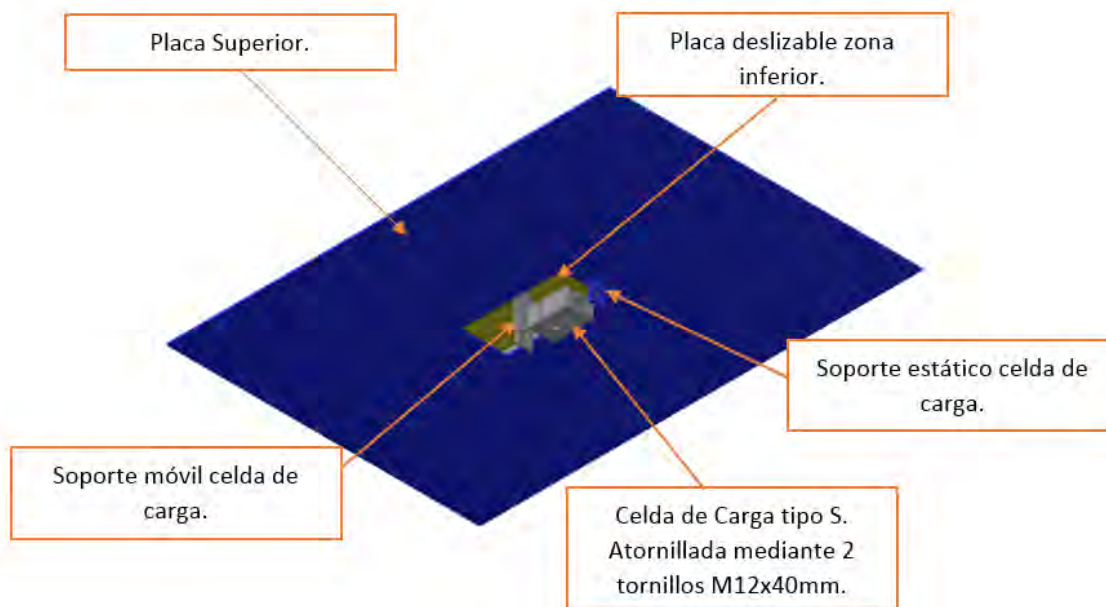


Figura 6. 5.- Montaje celda de carga.



Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

Como conclusiones derivadas del presente trabajo de tesis, se puede decir:

- La temperatura es la única característica de funcionamiento de un pulsorreactor que conserva magnitudes parecidas independientemente del tamaño que este tenga.
- De acuerdo a los resultados de diseño obtenidos, en los cuales no se tuvo factores de diseño o seguridad por debajo de 1.2, y los dispositivos de sistema DAQ seleccionados, el banco de pruebas diseñado está caracterizado para estudiar motores con un diámetro entre 20 mm a 160 mm, largo entre 400 a 850 mm y medir magnitudes de funcionamiento de temperatura 1000°C, presión entre 0 a 3.4 bar, flujo de combustible de 0 a 10 L/min, fuerza de empuje entre 0 a 30 kgf y volumen de aire de 0 a 99 m³/min, además, puede alojar motores cuyo peso neto sea de 15 kgf máx.

7.2. Recomendaciones y/o trabajos futuros

- Construir el banco de pruebas propuesto.
- Realizar la calibración y validación de datos del sistema DAQ.
- Hacer caracterización de motores pulse jet con diferentes combustibles fósiles y/o biocombustibles.
- Hacer pruebas sobre el aprovechamiento de calor desprendido a través del cuerpo del pulsorreactor.
- Diseñar un control de la emisión de gases.
- Hacer un manual de operación y seguridad para el uso del banco de pruebas.

7.3. Publicaciones derivadas del presente proyecto

- Participación en el congreso internacional de investigación Academia Journals Tabasco 2017 con el artículo nombrado “HISTORIA, FUNCIONAMIENTO Y APLICACIONES DE LOS PULSORREACTORES”, que tuvo sede en el Instituto Tecnológico de Villahermosa, Tabasco.



Referencias

- [1] P. Litke, F. Schauer, D. Paxson, R. Bradley, and J. Hoke, "Assessment of the Performance of a Pulsejet and Comparison with a Pulsed-Detonation Engine," in *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [2] M. C. Alvarez, *Motores de Reacción*, Quinta Edi. Madrid, España, 1980.
- [3] D. R. Greatrix, *Powered Flight*. Toronto, Canada, 2012.
- [4] A. A. Putnam, F. E. Belles, and J. A. C. Kentfield, "Pulse combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 43–79, 1986.
- [5] M. Tenorio Guzmán, M. Villagómez Galindo, G. González Avalos, and C. D. Schindler, "HISTORIA, FUNCIONAMIENTO Y APLICACIONES DE LOS PULSORREACTORES," *Acad. Journals*, 2017.
- [6] J. G. O'Brien, *The Pulsejet Engine-A Review of its Development Potential*. Monterey, California, 1974.
- [7] I. Zbicinski, "Equipment, technology, perspectives and modeling of pulse combustion drying," *Chem. Eng. J.*, vol. 86, no. 1–2, pp. 33–46, 2002.
- [8] V. Vitaliev, "Heritage Second World War," *Eng. Technol.*, no. June, pp. 60–64, 2015.
- [9] R. P. Ouellette, "United States Patent Ouellette," US 6,883,304 B2, 2005.
- [10] X. Meng, W. de Jong, and T. Kudra, "A state-of-the-art review of pulse combustion: Principles, modeling, applications and R&D issues," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 73–114, Mar. 2016.
- [11] V. N. Pobezhimov, "Simulation of a working process in the pulsejet engine with an aerodynamic valve on the basis of the thermodynamic cycle analysis," *Russ. Aeronaut. (Iz VUZ)*, vol. 50, no. 1, pp. 60–64, Mar. 2007.
- [12] A. V Borisoglebskii, "Numerical simulation of nonstationary gasodynamic processes in a pulsejet engine," *Russ. Aeronaut. (Iz VUZ)*, vol. 50, no. 2, pp. 172–177, Jun. 2007.
- [13] V. I. Bogdanov and E. A. Tarasova, "Application of GTE cycle with heat supply at constant volume," *Russ. Aeronaut. (Iz VUZ)*, vol. 50, no. 3, pp. 282–286, Sep. 2007.
- [14] O. V Iovleva and V. M. Larionov, "A mathematical model of vibration combustion in a tube with sudden cross-section change," *Russ. Aeronaut. (Iz VUZ)*, vol. 50, no. 3, pp. 303–308, Sep. 2007.
- [15] J. Åstrand, "Performance Prediction of a Valved and Valveless Pulse-jet Engine Running on Alternative Fuel," Luleå University of Technology, 2014.
- [16] "Strahltriebwerk im Eigenbau," *Hobby-Das Magazin der Technik*, Dec-1957.
- [17] P. Castillo-Hernández, A. Mendoza-Domínguez, and P. Caballero-Mata, "Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol," *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 13, pp. 293–306, 2012.
- [18] F. P. Beer, E. Russell Johnston Jr, and J. T. Dewolf, *Mecánica de Materiales*, 3ra. Edici. México: McGraw-Hill Interamericana, 2004.
- [19] M. D. P. Emilio, *Data Acquisition Systems*, 1st ed. Springer-Verlag New York, 2013.

