

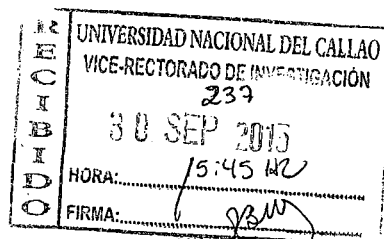
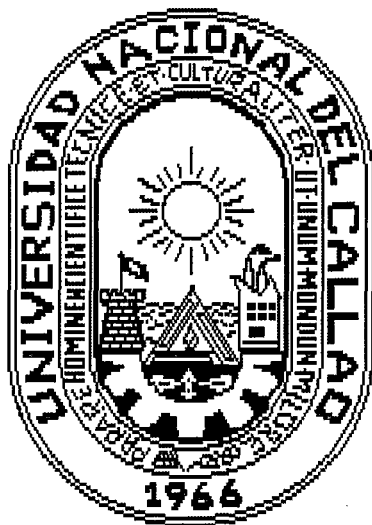
234

# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA – ENERGÍA

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE

INGENIERÍA MECÁNICA - ENERGÍA



INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

## “CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR PULSORREACTOR CON VALVULAS TIPO MARGARITA Y EVALUACIÓN DEL EMPUJE”

AUTOR: NELSON ALBERTO DIAZ LEIVA

(PERIODO DE EJECUCIÓN: Del 01 de Agosto del 2013 al 31 de Julio del 2015)

(Resolución de aprobación N<sup>o</sup> 778-2013-R)

Callao, 2015

A large, stylized handwritten signature in black ink, located in the bottom right corner of the page.

## I. INDICE

II. RESUMEN .....	4
ABSTRACT .....	5
III. INTRODUCCIÓN .....	6
IV. MARCO TEÓRICO .....	7
4.1. ANTECEDENTES RELACIONADOS CON LA INVESTIGACIÓN.....	7
4.2. BASES TEÓRICAS .....	18
4.2.1. EL CICLO DEL MOTOR PULSORREACTOR.....	21
4.3.2. REPRESENTACIÓN DE TIPOS OSCILATORIOS CUALESQUIERA POR MEDIO DE VIBRACIONES ARMÓNICAS. ....	29
4.3.3. LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FUORIER.....	35
4. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL MOTOR PULSORREACTOR.....	36
V. MATERIALES Y METODOS .....	45
5.1. MATERIALES USADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR PULSORREACTOR.....	45
5.1.1. CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR PULSORREACTOR.....	46
5.1.2. ESTRUCTURA METALICA PARA LA MEDIDA DIRECTA DE LA FUERZA DE EMPUJE DE UN MOTOR PULSOREACTOR. ....	53
5.1.3. PARTE ELÉCTRICA .....	56
5.1.4. PARTE NEUMÁTICA.....	56
5.2. FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR PULSORREACTOR .....	57
5.3. PROCESO EXPERIMENTAL DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	59
VI. RESULTADOS .....	61
6.1. CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR PULSORREACTOR.....	61
6.2. EVALUACIÓN DEL EMPUJE DEL MOTOR PULSORREACTOR .....	62
VII. DISCUSIÓN.....	70
VIII. REFERENCIALES .....	73
IX. APENDICE .....	75
VISTAS ISOMETRICAS DEL MOTOR PULSORREACTOR.....	75

<b>X. ANEXO</b> .....	80
10.1. MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	80
10.2. ESQUEMA REFERENCIAL DEL MOTOR PULSORREACTOR CONSTRUIDO.....	81

### 1.1. INDICE DE FIGURAS

Figura 4. 1: Esquema experimental para la determinación de empuje directo de una PDE. _____	10
Figura 4. 2: Mini pulsorreactores. _____	11
Figura 4. 3: Pulsorreactor sin enfriamiento _____	12
Figura 4. 4: Pulsorreactor con enfriamiento _____	12
Figura 4. 5: Pulsorreactor y Eyector. _____	14
Figura 4. 6: Soporte mecánico y accesorios de encendido de una PDE _____	16
Figura 4. 7: Arreglo experimental para medir el empuje. _____	17
Figura 4. 8: Esquema de un pulsorreactor con válvulas _____	19
Figura 4. 9: Ciclo de funcionamiento de un pulsorreactor _____	21
Figura 4. 10: Posiciones de interés dentro del motor pulsorreactor. _____	26
Figura 4.1 1: Ciclo ideal del motor pulsorreactor. _____	26
Figura 4.1 2: Composición de dos movimientos vibratorios armónicos cuyas frecuencias son $\omega_1$ y $\omega_2$ . _____	30
Figura 4.1 3: Composición de tres vibraciones armónicas para componer una vibración modulada. _____	32
Figura 4.1 4: Composición de cuatro funciones armónicas con diferentes frecuencias y diferente amplitud para formar una aproximación de onda cuadrada. _____	34
Figura 4.1 5: Espectro de frecuencias que arroja la transformada de Fourier al aplicarle a la función que es aproximación de la onda cuadrada. _____	35
Figura 4.1 6: El comandante de Flakregiment 155 (W). _____	38
Figura 4.1 7: V-I se deja caer desde un Heinkel ÉI-IIIH-22. _____	38
Figura 4.1 8: Dos hombres inspeccionan un V-I después su lanzamiento fallido en un lugar en Francia. _____	40
Figura 4.1 9: Sumergible impulsado por un pulsorreactor. _____	44
Figura 5. 1: Planos de referencia para la construcción del motor pulsorreactor.....	46
Figura 5. 2: Difusor modificado.....	48
Figura 5. 3: Tabique modificado.....	49

Figura 5. 4: Tabique de acero inoxidable. ....	49
Figura 5. 5: Diseño del cono distribuidor. ....	50
Figura 5. 6: Cono distribuidor de aluminio trefilado. ....	50
Figura 5. 7: Válvula reguladora de combustible. ....	51
Figura 5. 8: Asiento de la válvula margarita y margarita.....	51
Figura 5. 9: Tobera y escape.....	52
Figura 5. 10: Estructura mecánica para el pulsorreactor. ....	54
Figura 5. 11: Detalles de las vistas de la estructura mecánica.....	55
Figura 5. 12: Pulsorreactor construido.....	55
Figura 5. 13: Accesorios de arranque del motor pulsorreactor.....	57
Figura 5. 14: Motor pulsorreactor en pleno funcionamiento. ....	58
Figura 6. 1: Motor pulsorreactor construido.....	61
Figura 6. 2: Arreglo experimental para determinar el empuje del motor pulsorreactor.....	62
Figura 6. 3: Datos experimentales de fuerza versus tiempo del primer ensayo.....	65
Figura 6. 4: Espectro de frecuencias obtenidas con la FFT del primer ensayo.....	66
Figura 6. 5: Datos experimentales de fuerza versus tiempo del segundo ensayo.....	67
Figura 6. 6: Espectro de frecuencias obtenidas con la FFT del segundo ensayo.....	68
Figura A. 1: Dimensiones de la válvula tipo margarita.....	75
Figura A. 2: Vista isométrica 1 del motor pulsorreactor.....	75
Figura A. 3: Vista isométrica 2 del motor pulsorreactor.....	76
Figura A. 4: Vista de planta y lateral derecha del motor pulsorreactor. ....	76
Figura A. 5: Vista frontal del motor pulsorreactor. ....	77
Figura A. 6: Vista isométrica 3 del motor pulsorreactor.....	77
Figura A. 7: Planos del difusor y tabique.....	78
Figura A. 8: Plano de la tobera y tubo de escape.....	79

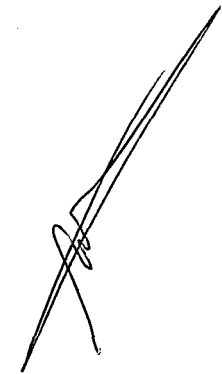
## II. RESUMEN

El presente trabajo muestra la construcción y evaluación del empuje de un motor pulsorreactor, presentando una modificación respecto del diseño original hecha en el difusor la cual dio como resultado una mejor combustión y desempeño del motor.

El prototipo del motor pulsorreactor construido tiene una longitud de 0,85 m con una masa de 2,87 kg y desarrolló en condiciones estables una fuerza de empuje promedio de 21,9 N con una frecuencia de pulsos de combustión comprendido entre 12,0 y 14,0 Hz todos estos resultados determinados con los equipos, software y maquinas herramientas disponibles en los talleres de Ingeniería Mecánica y laboratorio de Física de la Universidad Nacional del Callao.

El motor pulsorreactor construido representa un equipo potencial para futuras investigaciones y aplicaciones en cámaras de combustión, aeromodelismo e industria militar.

**Palabras clave:** motor pulsorreactor, válvulas tipo margarita, difusor, fuerza de empuje.



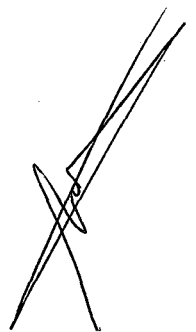
## **ABSTRACT**

The present work shows the construction and evaluation of the thrust force of a pulse-jet engine, presenting a modification I concern of the original design done in the diffuser which gave like proved a better combustion and performance of the engine.

The prototype of the constructed pulse-jet engine has a length of 0,85 m with a mass of 2,87 kg and developed in stable conditions a force of average thrust of 21,9 N with a frequency of pulses of combustion understood between 12,0 and 14,0 Hz all these results determined with the equipments software and you scheme available tools in the workshops of Mechanical Engineering and laboratory of Physics of the National University of the Callao.

The constructed pulse-jet engine represents a potential equipment for future investigations and applications in chambers of combustion, model aircraft flying and military industry.

**Key words:** pulse-jet engine, valves type daisy, diffuser, thrust force.

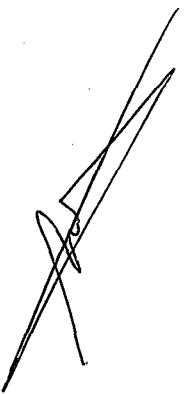
A handwritten signature or mark consisting of several overlapping, diagonal lines that form a stylized, somewhat abstract shape, possibly representing the author's name or initials.

### III. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo principal llevar a la práctica la teoría termodinámica de los motores de combustión interna investigando el encendido y el funcionamiento del motor así como el proceso de construcción del motor pulsorreactor, para familiarizarnos con la tecnología de propulsión de aeronaves y a partir de este trabajo, con los nuevos materiales existentes y los modernos procesos de manufactura diseñemos y construyamos equipos de propulsión con mayor eficiencia, así como una metodología para determinar los parámetros de funcionamiento del motor pulsorreactor como la frecuencia de los pulsos y el empuje desarrollado utilizando los equipos e instrumentos disponibles en los laboratorios de la universidad..

El funcionamiento de este motor se basa en la variación de momento lineal entre el aire que entra al difusor y el que sale por la tobera debido al proceso de combustión de la mezcla de aire y gasolina que se realiza en la cámara de combustión del motor pulsorreactor considerado como un volumen de control definido.

En la actualidad, la atención de los investigadores en el campo de la combustión ha vuelto la mirada en todo el mundo al estudio de los procesos de combustión en las cámaras de combustión usando las máquinas de pulso detonación, (1) comparando su eficiencia y funcionamiento con un motor pulsorreactor, numerosos trabajos se están realizando en la línea de investigación mencionada debido a la fuerte inversión de recursos económicos.



## IV. MARCO TEÓRICO

### 4.1. ANTECEDENTES RELACIONADOS CON LA INVESTIGACIÓN

Recientemente, la atención de los investigadores en el campo de la combustión en todo el mundo ha puesto su atención en las máquinas de pulso detonación, de características similares a un pulsorreactor con la diferencia importante que en el primero se pueden controlar los pulsos de detonación, y esto se ha convertido en su principal objetivo de estudio.

Esto incluye investigadores de los Estados Unidos, Japón Rusia y China. Numerosas publicaciones científicas de estos países se han incrementado significativamente en estas últimas décadas. La principal atracción de la detonación de combustión fue generar ondas de choque que es seguida por las ondas de combustión (2). La onda de choque generada se propaga en frente de la onda de combustión en la cámara de detonación básicamente más rápido que la velocidad del sonido reactante. La ventaja de la formación de la onda de choque en el tubo es que después esta onda de choque puede transformarse en procesos de compresión y expansión en el tubo. La ignición espontánea detrás de la onda de choque forma la onda de combustión. G. D. Roy (3) en su publicación menciona que para generar un empuje casi constante las detonaciones o pulsos deben estar por encima de los 100 Hz. La generación de empuje constante es realmente importante en aplicaciones de propulsión. Las detonaciones o pulsos repetitivos pueden también ser utilizados en generación de potencia (4). El motor pulsorreactor trabaja con un proceso de combustión a volumen constante más que un proceso de combustión a presión constante tal como lo hace una máquina turbina jet.

El proceso de combustión a volumen constante tiene una eficiencia termodinámica más alta y proporciona mayor energía comparada con un proceso de combustión a presión constante.



La mayoría de investigaciones recientes hechas por los investigadores involucrados en esta área, centran su atención trabajar con combustible gaseoso para estudiar las características de detonación y muy pocos trabajan con combustibles líquidos, nosotros trabajaremos con combustible líquido que previamente antes de ingresar a la cámara de combustión será atomizada por el efecto Venturi. El combustible líquido por lo tanto tiene sus ventajas sobre los combustibles gaseosos (4) por lo que es más adecuado para los sistemas aeroespaciales por el volumen limitado y aplicaciones a grandes altitudes.

Trabajos recientes relacionados con la tecnología de fabricación y parámetros de funcionamiento de los motores pulsorreactores están desarrollándose en el campo de la termodinámica y la mecánica de fluidos como los que a continuación menciono.

**a) Computational Approach in Sizing of Pulsejet Engine, Mohamed Tarmizi Ahmad, Sevda Ahmadian, Amzari Zhahir, O.K. Ariff and Fairuz I. Romli, Applied Mechanics and Materials Vol. 629 (2014) pp 131-136.**

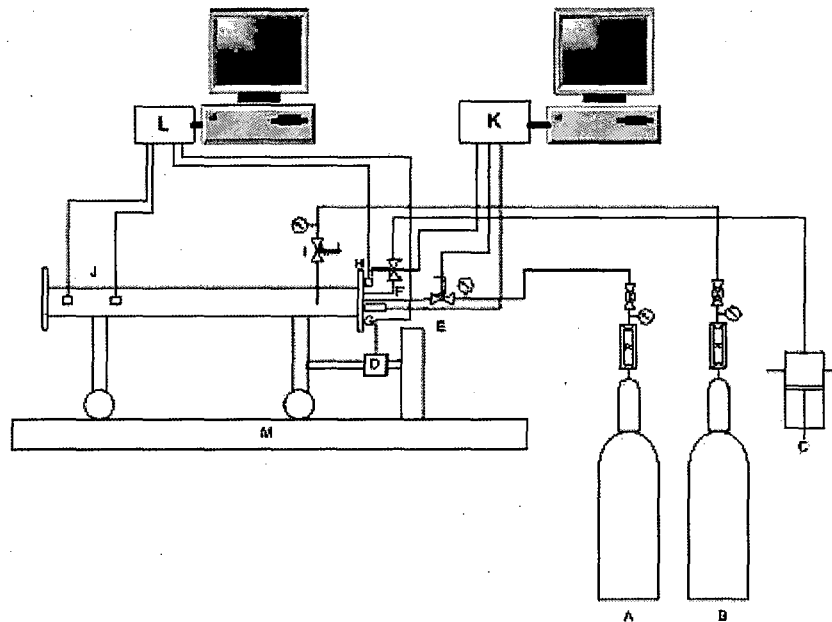
Establecen que las investigaciones en los motores pulsorreactores se han intensificado recientemente debido a la simplicidad de su diseño que puede ser desarrollado en unidades eficientes de propulsión a pequeña escala para nuevas aplicaciones tales como vehículos aéreos no tripulados (UAVs) y vehículos de combate no tripulados (UCAV). El mayor obstáculo para su desarrollo (5) es la baja eficiencia del motor. El trabajo que realizaron tuvo como objetivo investigar la posibilidad de usar el motor pulsorreactor en ciertas aplicaciones donde el pulsorreactor pueda compensar su baja eficiencia con su bajo costo, diseño simple y peso ligero. Utilizaron el análisis numérico para analizar el diseño del motor pulsorreactor. El resultado principal planteado en su investigación es el incremento de la eficiencia y mejora del funcionamiento del motor trabajando con el

dimensionamiento de la máquina, especialmente el diámetro de la cámara de combustión. Los resultados calculados muestran que son coherentes con los registros publicados.

**b) Direct Thrust Force Measurement of Pulse Detonation Engine, Mazlan A. Wahida, M.Z.Ahmad Faizb and Khalid M. Saqrc, American Institute of Physics Conf. Proc. 1440, 1257-1263 (2012)**

En este trabajo presentan los resultados del estudio experimental sobre la medida del empuje directo (6) de una máquina de pulso detonación en el laboratorio de flujos reactantes de alta velocidad. La fuerza de empuje generado por las detonaciones repetitivas en un tubo de 50 mm de diámetro interno y 600 mm de longitud fue directamente medida utilizando celdas de carga. La espiral de Shchelkin fue usado como un acelerador para la transición de deflagración al fenómeno de detonación (DDT). Se usó Oxígeno-Propano en condiciones estequiométricas como combustible en la mezcla aire combustible para la máquina de pulso detonación (PDE). La PDE funcionó a la frecuencia de operación de 3,0 Hz durante la prueba. La intensidad de la fuerza de empuje medida durante la prueba alcanzo hasta los 70 N. Los valores de la fuerza de empuje encontrados fluctúan, en la figura 4.1 se muestra el esquema experimental con el cual analizaron y discutieron el fenómeno de combustión donde A- suministro de combustible B- Suministro de Oxígeno C-Purga de suministro de aire D-Celda de carga E-Inyector de combustible F- Válvula Solenoide G- Puerta de ignición H- Acelerómetro I-Inyector de Oxígeno J- Transductor de presión K- Sistema de control L- Sistema de adquisición de datos M- plataforma de prueba de la máquina de pulso detonación. .

Figura 4. 1: Esquema experimental para la determinación de empuje directo de una PDE.

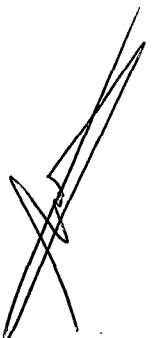


Fuente: Direct Thrust Force Measurement of Pulse Detonation Engine, Mazlan A. Wahida, M.Z.Ahmad Faizb and Khalid M. Saqrc, American Institute of Physics Conf. Proc. 1440, 1257-1263 (2012)

**c) Pulse jet Research at NCSU (Universidad Estatal de Carolina del Norte), William Roberts and Andrey Kuznetsov (2007).**

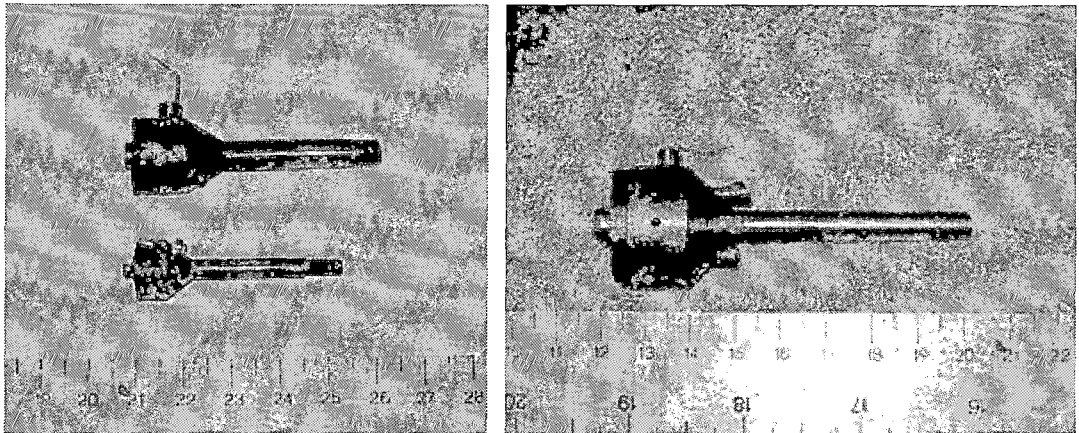
Manifiestan lo siguiente (7) que varias organizaciones, tanto privadas como públicas dejaron de investigar al motor pulsorreactor en el periodo de 1940-1970, los motores de pulso dejaron de recibir la atención debido a las mejoras en la potencia y la eficiencia de los motores turbojets.. Recientemente, sin embargo, con el interés de los Vehículos aéreos no tripulados (UAV'S), varias agencias y contratistas han comenzado a buscar modos de propulsar estos vehículos diminutos con una fuente de poder eficiente, económica y robusta.

Se enfocó en la miniaturización de los motores pulsorreactores y la investigación de los efectos de funcionamiento de motor con cambios



en la geometría, la figura 4.2 muestra los pulsorretores en miniatura de 4, 5 y 8 centímetros de longitud. Más tarde se logró el desarrollo de motores pulsorretores a micro escala y el resultado fue uno de 8cm de longitud, abastecido de aire y con hidrógeno como combustible para el motor.

Figura 4. 2: Mini pulsorretores.



Fuente: <http://www.mae.ncsu.edu/news/article/16442/pulse-jet-research-at->  
Siguiendo con la miniaturización del motor pulsorreactor, el equipo de investigación trabajó el funcionamiento en la escala de aficionados (50cm), tanto con motores con válvulas así como sin válvulas y proponen un modelo analítico donde se podría predecir la frecuencia de operaciones de cualquier motor pulsorreactor. El siguiente paso era diseñar un motor pulsorreactor que funcione con querosene, una alternativa a JP-8 (usado por los militares). También trabajaron con entradas especiales " o entradas de Punto " para un motor sin válvulas que daría una mejor salida de empuje.

Corrientemente el equipo de investigación trabajo en los efectos del funcionamiento del motor con una geometría acampanada y la generación de vórtices en los gases de combustión.

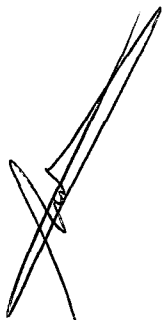
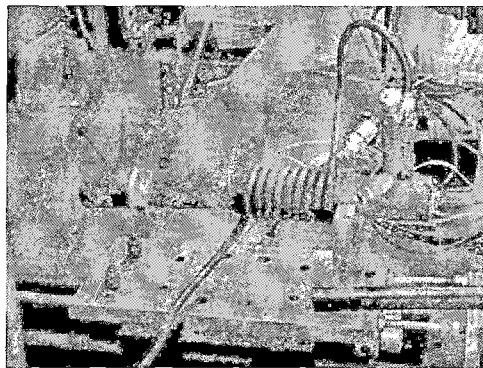


Figura 4. 3: Pulsorreactor sin enfriamiento



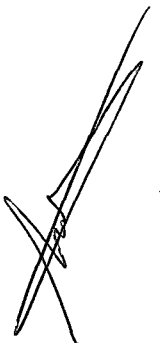
Fuente: <http://www.mae.ncsu.edu/news/article/16442/pulse-jet-research-at-ncsu/>

Figura 4. 4: Pulsorreactor con enfriamiento



Fuente: <http://www.mae.ncsu.edu/news/article/16442/pulse-jet-research-at-ncsu/>

Las figuras 4.3 y 4.4 muestran los motores pulsorreactores en funcionamiento en condiciones estáticas, utilizando como combustible el kerosene sin sistema de enfriamiento y la gasolina con sistema de enfriamiento respectivamente, donde se muestran los soportes mecánicos de fijación, componentes eléctricos y neumáticos del motor pulsorreactor utilizados para realizar el encendido de los mismos.



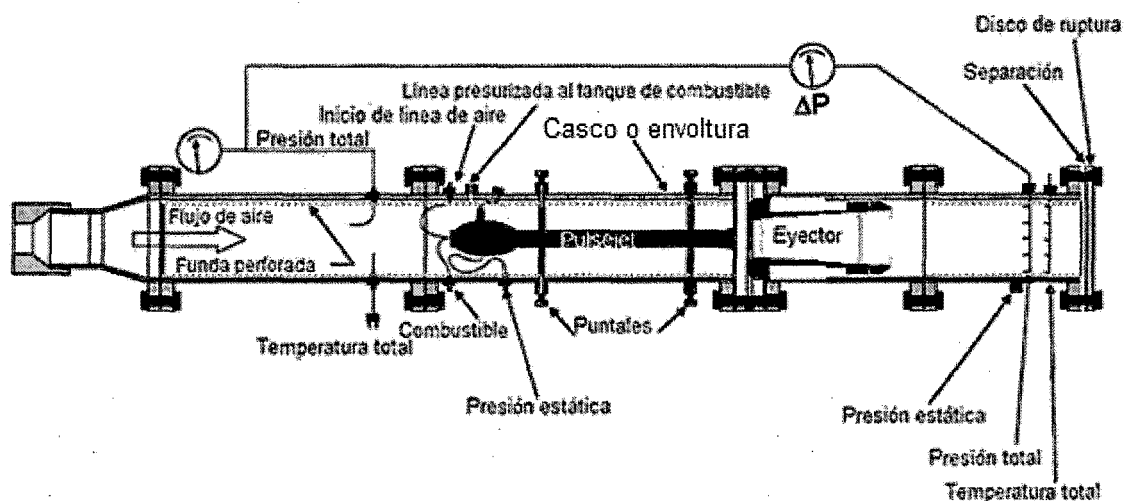
**d) Ejector enhanced pulsejet based pressure gain combustors:  
an old idea with a new twist, Daniel E. Paxson, Kevin T.  
Dougherty, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio,  
NASA/TM—2005-213854.**

Aquí se describe una investigación experimental de combustión con ganancia de presión para una aplicación a turbinas de gas. El equipo de prueba consiste de un pulsorreactor (8) que trabaja con válvulas y un eyector optimizado, ambos ubicados dentro de una cubierta conforme se muestra en la figura 4.5 donde vemos el esquema experimental de Pulsejet-conducido, combustor de ganancia de presión. (el diagrama esta aproximadamente a escala.)

La combinación forma un eficaz combustor que 'puede' proporcionar una subida de presión total modesta a diferencia de la pérdida habitual encontrada en combustores convencionales. Aunque el concepto de usar un pulsorreactor para afectar el volumen semi constante (p. ej., la ganancia de presión) de la combustión no es nueva, como la de combinar eficientemente la mezcla del flujo que pasa con un eyector bien diseñado. El resultado es un dispositivo que hasta el momento ha demostrado un aumento de presión total aproximadamente del 3.5 por ciento en una proporción total de temperaturas comparadas con turbinas modernas de gas. Este porcentaje de presión es considerablemente más alta que lo que antes ha sido reportado en experimentos de combustión basados en el motor pulsorreactor. También se muestran flujos no uniformes en la parte posterior del dispositivo que son sustancialmente reducidos comparado a aquellos dentro del pulsorreactor mismo. La desviación estándar de fluctuaciones de presión totales, medidas justo en el extremo final del eyector era sólo de 5,0 por ciento del valor medio.

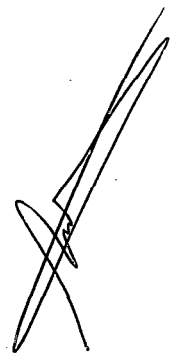
Este aspecto de suavizado del dispositivo es crítico para usos de turbo maquinaria ya que el funcionamiento de turbina, en general, es afectado negativamente por flujos no uniformes e inestables. Se describe el esquema experimental utilizado y los detalles de las medidas de los resultados presentados. Los análisis muestran las ventajas termodinámicas de este nivel de funcionamiento con ganancia de presión en una turbina de gas que también son evaluados para varios tipos de motor. Las publicaciones en cuanto al desarrollo práctico de tales dispositivo son discutidos, como son las potenciales reducciones de emisiones que son resultado de la naturaleza explosiva del pulsorreactor y la mezcla rápida (que no combustiona) asociado con eyectores inestables.

Figura 4. 5: Pulsorreactor y Ejector.



Fuente: Ejector enhanced pulsejet based pressure gain combustors: an old idea with a new twist, Daniel E. Paxson, Kevin T. Dougherty, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, NASA/TM—2005-213854.

- e) **Assessment of the Performance of a Pulsejet and Comparison with a Pulsed-Detonation Engine**, Paul J. Litke and Frederick R. Schauer, Daniel E. Paxson\*, Royce P. Bradley and John L. Hoke, 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 10-13, 2005, Reno, Nevada



En este trabajo evalúan el funcionamiento de un motor pulsorreactor Solar PJ32, la cual está a una escala de 1/5- del modelo del motor pulsorreactor Argus V-1 desarrollado por la naval en 1951 bajo condiciones estáticas (9) y comparadas con una máquina de detonación pulsada (PDE) con encendido y condiciones de funcionamiento similares a la entrada, en la figura 4.6 se muestra el arreglo experimental para la máquina de pulso detonación PDE.

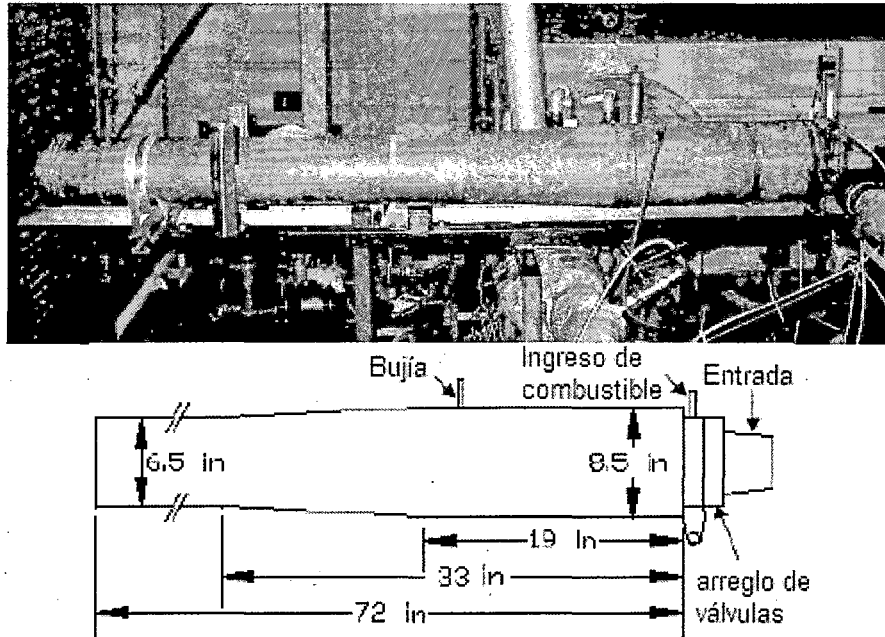
El pulsorreactor tiene un rango de flujo de combustible en operación de 2.5-4.5 lbm/min, la cual corresponde a un rango de empuje de 40 lbf (mínimo) a 102 lbf (máximo). El empuje es calculado con los registros de presión en la cámara de combustión y está de acuerdo con el empuje medido dentro de 5-10%. El pico de la cabeza de presión en la cámara de combustión está en el rango de 8 a 20 psig, mientras presiones significativamente más altas (80-120 psig) son obtenidas en una PDE. El flujo de aire en la entrada del pulsorreactor es medido y usado para calcular el empuje específico y la razón de equivalencia. Los rangos de empuje específico son de 40-100 lbf-s/lbm sobre el rango de flujo de combustible que va de condiciones de mezcla pobre a rica.

Una máquina de pulso detonación operando en condiciones similares tiene un empuje específico de alrededor de 120 lbf-s/lbm, haciendo la PDE más eficiente en términos de flujo de aire. La razón de equivalencia del motor pulsorreactor con rangos entre 0,6 – 1,0, con tasa/empuje pico ocurren en condiciones ricas. Impulsos típicos con combustible específico ( $I_{sp}$ ) para el pulsorreactor están entre 1400-1500 s para condiciones de empuje nominales, mientras el funcionamiento de la PDE (con una fracción de la unidad 1) es alrededor de 1800 s. Para la operación de la PDE en el mismo rango de fracción completa como el pulsorreactor ( $\sim 0.1$ ), el  $I_{sp}$  de la PDE se estimó entre 6000-8000 s haciendo el ciclo de



la PDE mucho más eficiente y deseable en condiciones comparables.

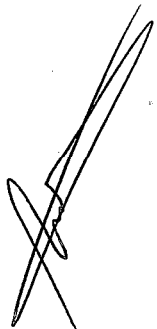
Figura 4. 6: Soporte mecánico y accesorios de encendido de una PDE



Fuente: Assessment of the Performance of a Pulsejet and Comparison with a Pulsed-Detonation Engine, Paul J. Litke and Frederick R. Schauer, Daniel E. Paxson\*, Royce P. Bradley and John L. Hoke, 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 10-13, 2005, Reno, Nevada.

**f) Unsteady ejector performance: an experimental investigation using a pulsejet driver, Daniel E. Paxson, Jack Wilson, Kevin T. Dougherty, National Aeronautics and Space Administration, June 2002, NASA/TM-2002-211711.**

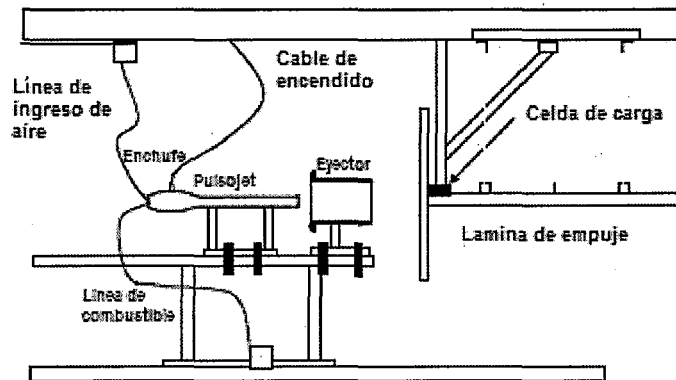
Este trabajo describe una investigación experimental en la cual se midió el aumento del empuje (10) y el ingreso de masa por una variedad de eyectores simples cilíndricos alimentados por un motor pulsorreactor a gasolina. Los eyectores fueron de longitudes, diámetro y radio de admisión variables.



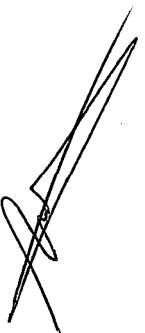
Las medidas también fueron tomadas para determinar el efecto en el comportamiento de la distancia entre la salida del pulsorreactor y la admisión del eyector. Las pruebas limitadas también fueron conducidas para determinar el efecto de la forma de la sección transversal del conductor. Se encontraron valores óptimos fueron encontrados para los tres parámetros de eyector en lo que concierne al aumento de empuje. Este no fue el caso con el ingreso de la masa, que aumentó monótonamente con el diámetro del eyector. Así, fue encontrado que el aumento del empuje no está directamente relacionada necesariamente con el ingreso de la masa, como es a menudo suponer para lo eyectores. Se obtuvieron valores pico de 1,8 de aumento de empuje.

Los valores pico de ingreso de masa de 30 veces el flujo de masa conducido también fueron observados. Detalles del arreglo experimental y resultados son presentados en la figura 4.7. Análisis preliminares de los resultados indican una mejora del funcionamiento obtenido con un jet no estacionario (fuente primaria) de modo análogo eyectores clasificados conducidos con motores estables se deben principalmente a la estructura del flujo de inicio tipo vórtice asociado con el antiguo.

Figura 4. 7: Arreglo experimental para medir el empuje.



Fuente: Unsteady ejector performance: an experimental investigation using a pulsejet driver, Daniel E. Paxson, Jack Wilson, Kevin T. Dougherty, National Aeronautics and Space Administration, June 2002, NASA/TM-2002-211711.



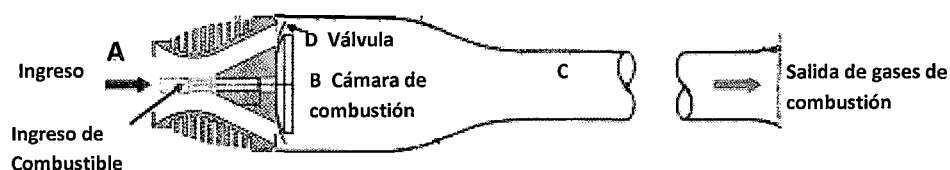
Todos estos trabajos mencionados no hacen sino ratificar la importancia del estudio de los motores pulsorreactores combinándolas y comparándolos con otras máquinas térmicas con la finalidad de generar nuevas tecnologías en los procesos de combustión, control de ruido y empuje que es muy importante en la tecnología de aviación civil y militar remarcando que si es una tecnología usada en los primeros años de los 1940 no han perdido vigencia en el campo de la investigación de la actualidad.

#### 4.2. BASES TEÓRICAS

Los motores a reacción o Pulsorreactores son una familia muy simple de motor de combustión interna que tienen muy pocas partes móviles o ninguna. Ellos se inventaron a principios de 1900's, y fueron la ciencia de vanguardia hasta después de la Segunda Guerra Mundial, usados para impulsar bombas voladoras o misiles. Sin embargo pasaron a ser máquinas obsoletas después de su apogeo en dicha guerra, pues su propósito no era mantener un impulso constante durante largos periodos de tiempo, sino simplemente ser eficaz para la propulsión de armas bélicas.

Hay dos tipos básicos de motores de propulsión a chorro, motores con válvulas y motores sin válvulas. Ambos tipos operan bajo los mismos principios, y puede funcionar con una amplia gama de combustibles, se puede escalar a tamaños muy pequeños o muy grandes, y son sorprendentemente poderosos por su simplicidad, obviando el hecho de que generan gran cantidad de ruido también.

Figura 4. 8: Esquema de un pulsorreactor con válvulas

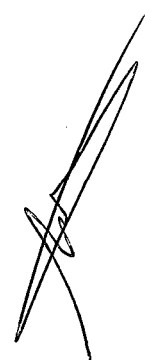


Fuente : P.J. Litke, F. R. Schauer, D. E. Paxson, R.P. Bradley, J. L. Hoke, Assessment of the Performance of a Pulsejet and Comparison with a Pulse – Detonation Engine, 43<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 10-13, 2005.

Los pulsorreactores se diferencian de otros tipos de máquinas de combustión interna por ser máquinas muy simples conforme se muestra en la figura 4.8, además de otras características tales como su operación, su base teórica y práctica en puntos clave de su funcionamiento. Como una de las más resaltantes podemos mencionar que mientras otras máquinas generadoras de impulsos tratan de aproximar la combustión a volumen constante, los pulsorreactores lo hacen de forma marginal. Es decir, el ciclo del pulsorreactor básicamente es una deflagración relativamente lenta durante todo el evento de combustión. El confinamiento que se consigue con cada flujo combinado con el modo relativamente lento de combustión nos da como resultado la liberación de calor antes y después que la mezcla aire -combustible alcance un volumen mínimo.

Estos aspectos y otros factores más hacen que el pulsorreactor sea de cierta forma ineficiente como dispositivo de empuje o impulso, pero aun así funcional.

La oscilación producida por la combustión del pulsorreactor a menudo crea el sonido de zumbido, a parte del diseño de las condiciones de operación y fallas de la estructura de combustión. Tales inestabilidades realzan la transferencia térmica, mientras mejoran la intensidad de combustión y reducen contaminaciones  $NO_x$ . La combustión del motor



pulsorreactor es un empleo positivo de oscilaciones producidas por combustión, que es la combustión intermitente (periódica) de combustible gaseoso, líquido y sólido depurado y pulverizado. El motor pulsorreactor puede usar varios tipos de combustible como gaseoso, líquido y combustibles sólidos. Las siguientes son ventajas conocidas del motor pulsorreactor:

- Teóricamente, el motor pulsorreactor tiene la eficiencia más alta de combustión comparada al motor de turbina normal turbojet de gas (GTE). La combustión intermitente de combustible es un factor clave en la obtención de la eficiencia de combustión del pulsorreactor mejor que el turbojet.
- Los motores pueden ser producidos en muchos tamaños con muchas salidas de empuje diferentes desde unas pocas libras a unos miles de libras de empuje.
- Ellos tienen una muy alta razón de empuje-a-peso (también la razón de potencia-a-peso), que quiere decir un motor ligero que produce más libras de empuje que su peso.
- Ellos son mecánicamente muy simples y tienen muy pocas partes móviles, de ahí que son fáciles de fabricar.

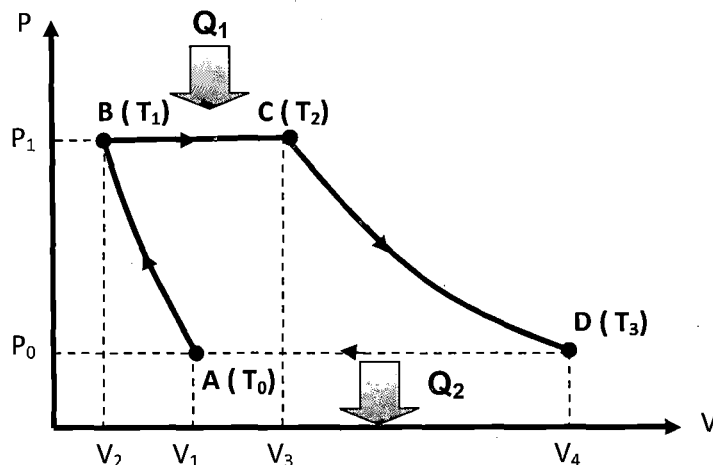
A pesar de la cantidad considerable de investigación en el desarrollo de varios tipos de pulsorreactores que fueron realizados, la comprensión fundamental de la operación de estos motores todavía es muy limitada. El diseño del motor y la comprensión de los pulsos de combustión serán realizados por el uso de ecuaciones probadas y referencias para la comprensión teórica del diseño del motor pulsorreactor. Es importante escoger ecuaciones exactas y referencias para el diseño del motor pulsorreactor ya que puede ser fabricado para los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), que requiere la rentabilidad y la operación segura. El desafío y la motivación de estudio del motor pulsorreactor deben optimizar

el diseño usando ecuaciones fundamentales y programación para aclarar la comprensión teórica importante del motor pulsorreactor y mejorar su eficiencia optimizando el consumo de combustible, que también maximizará la capacidad de empuje del motor pulsorreactor.

#### 4.2.1. EL CICLO DEL MOTOR PULSORREACTOR

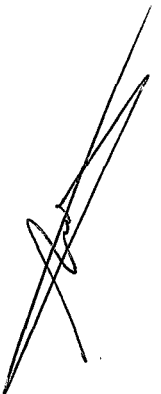
El funcionamiento de este motor también puede equipararse a un ciclo determinado (figura 4.9). El aire que entra por el difusor A, véase la figura 4.8 pasa por la parte delantera, que es más estrecha, a otra que es más ancha, con lo cual disminuye su velocidad. Al ocurrir esto de acuerdo con la ecuación de Bernoulli, la presión del aire aumenta desde su valor inicial  $P_0$  hasta un cierto valor final  $P_1$ . Así se produce la compresión del aire representada en la figura 4.9 por la adiabática (o más exactamente por la politrópica) AB.

Figura 4. 9: Ciclo de funcionamiento de un pulsorreactor



Fuente: Frish, Timoreva, A. Timoreva, Curso de física General, Tomo I, Mir, Moscú, 1973.

En la cámara de combustión la mezcla activa se calienta a presión constante  $P_1$  (línea BC), adquiriendo una cantidad de calor  $Q_1$ ; la temperatura de esta mezcla se eleva desde  $T_1$  hasta  $T_2$ , y su volumen aumenta de  $V_2$  a  $V_3$ . En la tobera C continua la expansión



adiabática y los gases son lanzados al exterior a mayor velocidad, lo que origina una fuerza de reacción. Prácticamente este ciclo no se cierra, pero el esquema puede considerarse cerrado, suponiendo que la sustancia que transporta el calor (el aire) vuelve a comprimirse hasta ocupar el volumen  $V_1$ , a la presión constante  $P_0$  (segmento DA), cediendo al foco frío una cantidad de calor  $Q_2$ . El rendimiento de este ciclo será:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (4.1)$$

Tanto la combustión como el enfriamiento de la mezcla se realizan presión constante, de donde tendremos que:

$$Q_1 = mC_p(T_2 - T_1)$$

$$Q_2 = mC_p(T_3 - T_0)$$

De donde

$$\eta = 1 - \frac{T_3 - T_0}{T_2 - T_1}$$

De las ecuaciones de las adiabáticas AB y CD, tenemos:

$$\frac{T_1}{T_0} = \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_2}{T_3} = \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}};$$

De donde

$$\frac{T_3}{T_0} = \frac{T_2}{T_1}$$

Empleando estas correlaciones entre las temperaturas podemos expresar el rendimiento de la forma siguiente:

$$\eta = 1 - \frac{T_3 - T_0}{T_2 - T_1} = 1 - \frac{T_0}{T_1} \quad (4.2)$$

Es decir, las temperaturas intermedias  $T_3$  y  $T_2$  no representan ningún papel y el rendimiento depende exclusivamente de los valores que tengan las temperaturas  $T_0$  y  $T_1$ .

La relación entre las temperaturas  $\frac{T_0}{T_1}$  puede sustituirse por la relación de los volúmenes  $\frac{V_1}{V_2}$ , partiendo de la ecuación de la adiabática AB:

$$\frac{T_1}{T_0} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1},$$

de donde

$$\eta = 1 - \frac{1}{\left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}} \quad (4.3)$$

Esta última expresión nos muestra que el rendimiento del motor pulsorreactor depende únicamente de la razón de compresión  $\frac{V_1}{V_2}$  y del exponente politrópico  $\gamma$ . Como la razón de compresión de los reactores construidos según este esquema no es muy grande, su rendimiento es pequeño.

El empuje desarrollado (11) por un motor pulsorreactor es la fuerza no balanceada que está causada por la diferencia en la cantidad de movimiento con que el aire a baja velocidad entra al motor y con que los gases de escape de alta velocidad salen de él; esto se



determina de la segunda ley de Newton. Las presiones en la entrada y la salida del pulsorreactor son idénticas (la presión ambiente) por lo tanto el empuje neto desarrollado por el motor es:

$$F = \left( \dot{m} v \right)_{Salida} - \left( \dot{m} v \right)_{Entrada} = \dot{m} (v_{Salida} - v_{Entrada}) \quad (N) \quad (4.4)$$

Donde  $v_{Salida}$  es la velocidad de salida de los gases de escape y  $v_{Entrada}$  es la velocidad de entrada del aire, ambas relativas al avión. Así para una aeronave que vuele en un aire sin corrientes,  $v_{Entrada}$  es la velocidad de la aeronave. En realidad, los flujos másicos de los gases a la salida y a la entrada del motor son diferentes, y la diferencia es igual a la rapidez de combustión del combustible. Sin embargo, la relación de masa de aire y combustible utilizada en los motores de propulsión por reacción usualmente es muy alta, lo que hace muy pequeña esta diferencia. Así,  $\dot{m}$  en la ecuación (4.4) se toma como el flujo másico del aire en el motor. Un avión que vuela a una velocidad constante utiliza el empuje para superar el arrastre del aire, y la fuerza neta que actúa sobre el cuerpo del avión es cero.

La potencia desarrollada a partir del empuje de una maquina recibe el nombre de potencia de propulsión  $\dot{W}_P$ , que es la fuerza de propulsión (empuje) para la distancia en que esta fuerza actúa sobre el avión por unidad de tiempo; es decir, el empuje multiplicado por la velocidad del avión:

$$\dot{W}_P = F v_{avión} = \dot{m} (v_{Salida} - v_{Entrada}) v_{avión} \quad (kW)$$

El trabajo neto desarrollado por el pulsorreactor es cero. Por lo tanto no es posible definir la eficiencia de un pulsorreactor de la misma manera que para máquinas de turbinas de gas estacionaria.

En lugar de eso se debe usar la definición general de eficiencia, la cual es la relación de la salida deseada y la entrada requerida. La salida deseada es la potencia producida para impulsar el avión  $\dot{W}_P$  y la entrada requerida es el calor liberado por el combustible  $\dot{Q}_{Entrada}$ . La relación de estas dos cantidades se llama eficiencia de propulsión y está dada por:

$$\eta_p = \frac{\text{Potencia de propulsión}}{\text{Relación de entrada de energía}} = \frac{\dot{W}_P}{\dot{Q}_P} \quad (4.5)$$

La eficiencia de propulsión es una medida de que tan eficiente la energía térmica liberada durante el proceso de combustión se convierte en energía de propulsión. La parte remanente de la energía liberada se mostrara como la energía cinética de los gases de escape relativa a un punto fijo sobre el suelo y como un incremento de la entalpia que sale del motor.

Otro tratamiento teórico en el análisis del motor pulsorreactor es del texto de Ahmed El Sayed (12), que se refiere a condiciones dentro del motor en las posiciones como se estipula en la figura 1. Para reducir la complejidad del análisis, las suposiciones hechas para este motor pulsorreactor son establecidas a continuación:

- El flujo es cuasi unidimensional con propiedades uniformes sobre cualquier corte transversal.
- El aire es un gas ideal
- Condiciones atmosféricas en la entrada del pulsorreactor y en la salida de los gases de combustión.
- Las curvas en la geometría pulsorreactor fueron simplificadas como secciones rectas.
- Las condiciones atmosféricas fueron constantes.

Consideremos el flujo de masa de combustible  $\dot{m}_f$ , controlado al ser introducido para determinar el empuje del pulsorreactor. Asumiendo la combustión completa en la cámara de combustión, para la gasolina como combustible, la razón de mezcla estequiometrica airea/combustible es de aproximadamente 14.7 (por lo tanto  $\dot{m}_a = 14,7 \dot{m}_f$ ).

$$\dot{m} = \dot{m}_a + \dot{m}_f \quad (4.6)$$

Donde  $\dot{m}_f$  es la razon de flujo de masa de combustible ( $\text{kgs}^{-1}$ ),  $\dot{m}_a$  es la razon de flujo masico del aire ( $\text{kgs}^{-1}$ ),  $\dot{m}$  es la razon de flujo de masa total ( $\text{kgs}^{-1}$ ). El número de Mach de vuelo puede ser definido como:

$$M = \frac{v_0}{\sqrt{\gamma_c R T_0}} \quad (4.7)$$

Donde  $v_0$  es la velocidad de la corriente libre (m/s),  $T_0$  es la temperatura ambiente (K),  $\gamma_c$  es la razón de calores específicos (frio),  $\gamma_c = 1,4$ , R es la constante universal de los gases  $R = 287 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  Ahmed El-Sayed idealiza el ciclo del motor pulsorreactor conforme se ilustra en el diagrama T-S en la figura 4.11

Figura 4. 10: Posiciones de interés dentro del motor pulsorreactor.

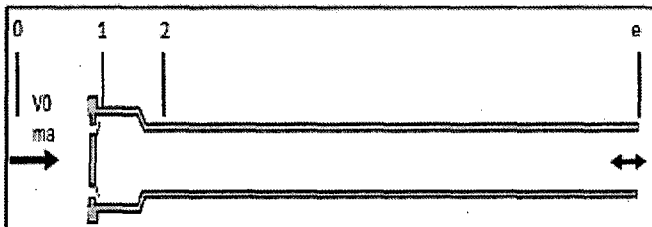
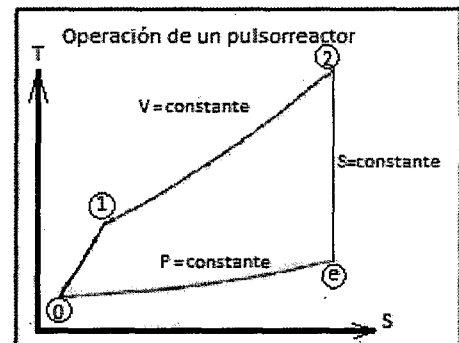


Figura 4.1 1: Ciclo ideal del motor pulsorreactor.



Fuente: Computational Approach in Sizing of Pulsejet Engine, Mohamed Tarmizi Ahmad, Sevda Ahmadian, Amzari Zhahir, O.K. Ariff and Fairuz I. Romli, Applied Mechanics and Materials Vol. 629 (2014) pp 131-136.

La presión y temperatura en el punto 1 son la presión de estancamiento y temperatura en el punto 0, por lo tanto  $P_1$  y  $T_1$  pueden ser definidos de la manera siguiente (donde  $P_0$  es la presión atmosférica libre (kPa)):

$$P_1 = P_0 \left(1 + \frac{\gamma_C - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma_C}{\gamma_C - 1}} \quad (4.8)$$

$$T_1 = T_0 \left(1 + \frac{\gamma_C - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma_C}{\gamma_C - 1}} \quad (4.9)$$

Si el pulsorreactor está en una posición estática, entonces  $v_0 = 0$  y así  $P_1 = P_0$  y  $T_1 = T_0$ . Asumiendo constante el volumen de combustión, la presión después de la combustión,  $P_2$  es:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad (4.10)$$

Del balance de energía, la  $T_2$  puede ser calculada por:

$$\begin{aligned} \dot{m} C_p T_2 &= \dot{m}_a C_p T_1 + n_b \dot{m}_f LCV \\ T_2 &= \frac{\dot{m}_a T_1}{\dot{m}} + \frac{n_b \dot{m}_f LCV}{\dot{m} C_p} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Donde  $C_p$  es la capacidad de calor específico a presión constante ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  $n_b$  es la combustión o eficiencia de encendido y LCV es el valor más bajo de calor específico (para la gasolina es  $44,4 \text{ MJkg}^{-1}$ ). La expansión de los gases de salida fuera de la tobera de salida a la presión ambiente se asume que es isentrópico y la temperatura de los gases de salida se calcula de la relación isentrópica:

$$P_e = P_0$$

y

$$T_e = T_2 \left( \frac{P_e}{P_2} \right)^{\frac{\gamma_h - 1}{\gamma_h}} \quad (4.12)$$

Donde  $\gamma_h$  es la razón de calores específicos (caliente),  $\gamma_h = 4/3$ . La velocidad de los gases de salida y el empuje son calculados de la siguiente ecuación:

$$v_e = \sqrt{2C_p T_2 \left[ 1 - \left( \frac{P_e}{P_2} \right)^{\frac{\gamma_h - 1}{\gamma_h}} \right]} \quad (4.13)$$

$$F = \dot{m} v_e - \dot{m}_a v_0 \quad (4.14)$$

Donde  $v_0 = 0$ , así  $F = \dot{m} v_e$ . El proceso de calor durante la combustión, para cambios de calor interno,  $Q_{in}$  y entalpia específica,  $h$  es descrito a continuación:

$$Q_{in} = \dot{m} C_p (T_2 - T_1)$$

y

$$h = \frac{Q_{in}}{\dot{m}} \quad (4.15)$$

El consumo de combustible para el empuje específico (TSFC) de un motor jet es una medida de eficiencia. Esta es una razón de masa de combustible usado por kilogramo de empuje producido. Esto permite comparar las eficiencias de diferentes jets como plantas de potencia. Un TSFC más alto significa que el motor es menos eficiente y un TSFC más bajo significa un motor más eficiente el TSFC fue calculado usando la siguiente ecuación:

$$TSFC = \frac{3600 \times \dot{m}_f}{F \div 9.81} \quad (4.16)$$

Considere el pulsorreactor como un tubo, las pulsaciones solo se propagan con los gases de combustión y por lo tanto se asume que los gases salen a través de los gases de combustión, el tubo puede ser considerado cerrado en el ingreso y abierto a la salida. Los pulsos en el tubo pueden considerarse como una oscilación de



un cuarto de longitud de onda con la amplitud de máxima presión con el extremo final cerrado pero amplitud de presión cero con el extremo final abierto. Por lo tanto, la frecuencia de oscilación,  $f$  puede ser descrita como:

$$f = \frac{a}{4L} \quad (4.17)$$

Donde  $a$  es la velocidad del sonido  $a = \sqrt{\gamma_h RT_e}$  y  $L$  es la longitud del motor pulsorreactor.

#### 4.3.2. REPRESENTACIÓN DE TIPOS OSCILATORIOS CUALESQUIERA POR MEDIO DE VIBRACIONES ARMÓNICAS.

Al desarrollar el presente trabajo hicimos uso del análisis básico de señales referentes al uso de la transformada rápida de Fourier, que nos permitió obtener el número de pulsos que realiza el motor pulsorreactor en la cámara de combustión al procesar la información de fuerza en función del tiempo que obtuvimos con el sensor de fuerza conectado al motor pulsorreactor en pleno funcionamiento, la bases teóricas que sustentan lo aplicado en este trabajo se presentan a continuación.

La teoría básica del movimiento armónico simple establece que la elongación  $x$  de la partícula vibrante se expresa por la ecuación armónica de movimiento

$$x = A \text{Cos}(\omega t + \alpha), \quad (4.18)$$

O lo que es lo mismo

$$x = A \text{Sen}(\omega t + \alpha'), \quad (4.18a)$$

donde  $A$  es la amplitud de la vibración,  $\omega$  es la frecuencia angular y  $\alpha$  y  $\alpha'$  son las fases iniciales. Estas vibraciones se representan gráficamente por los armónicos seno o coseno.

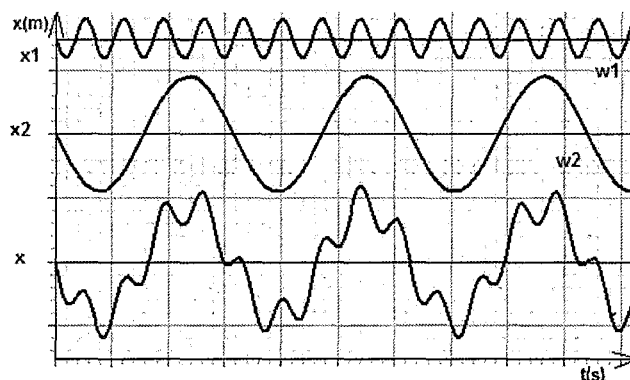
Pero las vibraciones reales solo pueden aproximarse (13) más o menos a las armónicas (seno o coseno) propiamente dichas,

puesto que toda vibración real va acompañada de su amortiguamiento. Además, son muy frecuentes los casos en las que las vibraciones tienen, en general un carácter más complejo. No obstante, el estudio de las vibraciones armónicas tiene mucha importancia, ya que las vibraciones complejas pueden considerarse compuestas de vibraciones armónicas.

Sabemos que cuando se componen dos movimientos vibratorios armónicos  $x_1$  y  $x_2$ , que tienen una misma dirección e igual frecuencia  $\omega$ , la vibración resultante es también un movimiento vibratorio armónico. Pero esto solamente ocurre cuando se componen vibraciones de una misma frecuencia. Si los dos movimientos armónicos que se componen tienen frecuencias diferentes, la oscilación resultante tiene un carácter más complicado.

En la figura 4.12 se representa gráficamente un movimiento vibratorio armónico de frecuencia  $\omega_1$  y amplitud  $A_1$  determinadas (sobre el eje de las ordenadas se toman las elongaciones  $x_1$  y sobre el de las abscisas el tiempo).

Figura 4.1 2: Composición de dos movimientos vibratorios armónicos cuyas frecuencias son  $\omega_1$  y  $\omega_2$ .



Fuente: Frish, Timoreva, A. Timoreva, Curso de física General, Tomo I, Mir, Moscu, 1973.



En el renglón intermedio se representa otra vibración armónica  $x_2$  cuya frecuencia es  $\omega_2$  es 4,50 veces menor que la frecuencia  $\omega_1$  del primer movimiento y cuya amplitud  $A_2 = 3,0 A_1$ . Finalmente, en el renglón de abajo está representada la vibración compuesta de las dos primeras; la elongación  $x$  del punto que realiza esta vibración compuesta es igual en cada momento a

$$x = x_1 + x_2$$

Podríamos plantearnos el problema inverso, es decir, dada una vibración compleja considerarla como una suma de armónicos y determinar cuáles son estas. En el caso de la oscilación compleja representada en el renglón inferior de la figura 4.12 podremos descomponerla en las armónicas representadas en los otros dos renglones de la misma figura.

En el fenómeno conocido con el nombre de pulsación que consiste en que si dos vibraciones  $x_1 = A_1 \cos(\omega_1 t + \alpha)$  y  $x_2 = A_1 \cos(\omega_2 t + \alpha)$ , cuyas frecuencias  $\omega_1$  y  $\omega_2$  se diferencian poco entre sí, sumándolas dan una vibración de frecuencia:

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (4.19)$$

Cuya amplitud  $A$  varía según la ley

$$A = \left| 2A_1 \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t\right) \right| \quad (4.20)$$

Recíprocamente podemos decir, que una vibración compleja cuya amplitud varíe de acuerdo con la ley (4.20) puede descomponerse en dos movimientos vibratorios armónicos puros cuyas frecuencias serán  $\omega_1$  y  $\omega_2$ .

Análogamente podemos imaginar otra vibración compleja cuya amplitud varíe lentamente (en comparación con el periodo de las propias vibraciones) según otra ley cualquiera. Este tipo de



vibraciones se conoce con el nombre de vibraciones moduladas. Estas vibraciones moduladas no son armónicas, pero se pueden descomponer en una serie de movimientos de este tipo. Tomemos como ejemplo la vibración

$$x = A \cos(\omega_0 t) \quad (4.21)$$

cuya amplitud varía de acuerdo con la ley

$$A = A_1 + A_2 \cos(\omega t) \quad (4.22)$$

Donde  $A_1$  y  $A_2$  son constantes, con la particularidad de que  $A_2 < A_1$  y  $\omega \ll \omega_0$ . Esta ley significa que la amplitud  $A$  varía con el tiempo entre los valores  $A_1 + A_2$  y  $A_1 - A_2$ . Colocando el valor dado de  $A$  en la expresión de  $x$ , obtenemos:

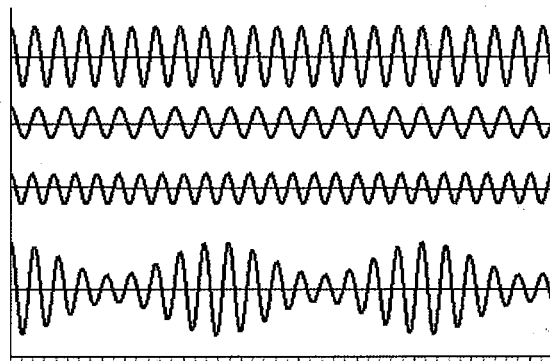
$$x = (A_1 + A_2 \cos(\omega t)) \cdot \cos(\omega_0 t) = A_1 \cos(\omega_0 t) + A_2 \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega_0 t)$$

o

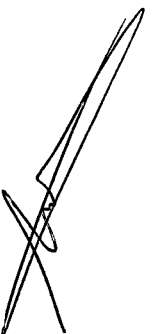
$$x = A_1 \cos(\omega_0 t) + A_2 \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega_0 t)$$

$$x = A_1 \cos \omega_0 t + \frac{A_2}{2} \cos(\omega_0 + \omega) t + \frac{A_2}{2} \cos(\omega_0 - \omega) t \quad (4.23)$$

Figura 4.1 3: Composición de tres vibraciones armónicas para componer una vibración modulada.



Fuente: Elaborado por el autor.



Es decir, que la vibración modulada que estudiamos puede descomponerse en una suma de tres armónicas cuyas frecuencias serán  $\omega_0$ ,  $\omega_0 + \omega$  y  $\omega_0 - \omega$  y a las cuales corresponderán respectivamente las amplitudes  $A_1$ ,  $A_2/2$  y  $A_2/2$ . Una representación gráfica de la composición de esta señal modulada la vemos en la figura 4.13.

El resultado de la composición de dos vibraciones armónicas depende de sus frecuencias, amplitudes y fases iniciales. Según cuales sean los valores de las frecuencias, fases y amplitudes, las vibraciones compuestas que se obtengan pueden ser muy diversas. Aun es más complejo el carácter de las vibraciones al componer tres o más vibraciones. Y, recíprocamente, una vibración de carácter muy complejo puede descomponerse en un número determinado de vibraciones armónicas de diferentes amplitudes y frecuencias.

En la teoría de las series trigonométricas se demuestra, que toda función periódica de periodo  $2\pi$

$$x = F(\omega t) \quad (4.24)$$

puede representarse en forma de serie trigonométrica ilimitada.

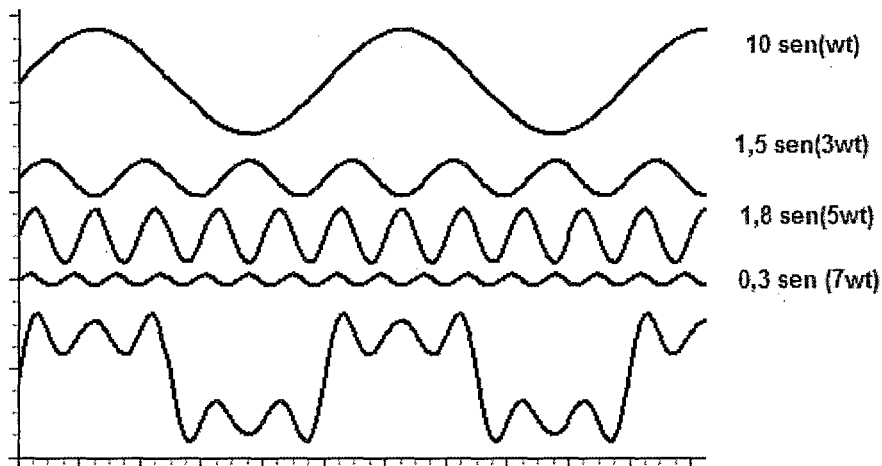
$$x = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)) \quad (4.25)$$

Esta serie se llama serie de Fourier, los coeficientes  $A_i$  y  $B_i$ , para este tipo de  $F(\omega t)$  se calculan por medio de fórmulas determinadas.

Como vemos hablando en términos generales, cualquier vibración periódica puede representarse matemáticamente como una suma de armónicas, cuyas frecuencias son múltiplos de  $\omega$ ,  $2\omega$ ,  $3\omega$ , etc.

En la parte baja de la figura 4.14 está representada una vibración parecida a una onda cuadrada; más arriba se ven las cuatro sinusoides en que pueden descomponerse.

Figura 4.1 4: Composición de cuatro funciones armónicas con diferentes frecuencias y diferente amplitud para formar una aproximación de onda cuadrada.



Fuente: Elaborado por el autor.

El resultado del desarrollo de una oscilación compleja en serie de Fourier puede representarse escribiendo todas aquellas frecuencias cuyas amplitudes son diferentes de cero y los valores de las amplitudes correspondientes. Es preferible hacer esta anotación gráficamente, tomando sobre el eje de las abscisas la escala de las frecuencias y trazando en los sitios correspondientes de este eje líneas verticales cuya longitud, en escala determinada, represente su amplitud. Este diagrama suele llamarse espectro de oscilación. En la figura 4.15 se muestra el espectro de la vibración compleja del renglón inferior de la figura 4.14.

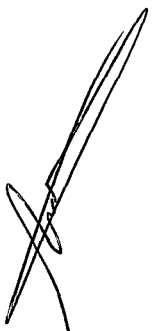
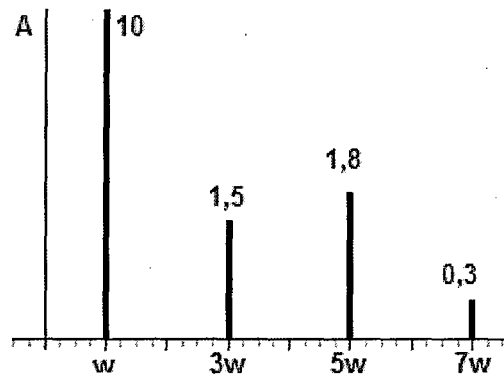


Figura 4.1 5: Espectro de frecuencias que arroja la transformada de Fourier al aplicarle a la función que es aproximación de la onda cuadrada.



Fuente: Elaborado por el autor.

#### 4.3.3. LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FUORIER

La FFT es la abreviatura (14) usual (del inglés Fast Fourier Transform) de un eficiente algoritmo que permite calcular la transformada de Fourier discreta (DFT) y su inversa. La FFT es de gran importancia en una amplia variedad de aplicaciones, desde el tratamiento digital de señales y filtrado digital en general a la resolución de ecuaciones en derivadas parciales o los algoritmos de multiplicación rápida de grandes enteros. El algoritmo pone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante. Por ejemplo: la señal de la que se tomaron muestras y que se va a transformar debe consistir de un número de muestras igual a una potencia de dos. La mayoría de los analizadores TRF permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras. El rango de frecuencias cubierto por el análisis TRF depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo.

Uno de los algoritmos aritméticos más ampliamente utilizados es la transformada rápida de Fourier, un medio eficaz de ejecutar un cálculo matemático básico y de frecuente empleo. La transformada rápida de Fourier es de importancia fundamental en el análisis



matemático y ha sido objeto de numerosos estudios. La aparición de un algoritmo eficaz para esta operación fue una piedra angular en la historia de la informática.

Las aplicaciones de la transformada rápida de Fourier son múltiples. Es la base de muchas operaciones fundamentales del procesamiento de señales, donde tiene amplia utilización. Además, proporciona un medio oportuno para mejorar el rendimiento de los algoritmos para un conjunto de problemas aritméticos comunes, este algoritmo lo tiene instalado el software Data Studio que al registrar la señal con el sensor de fuerza esta tuvo un comportamiento periódico según las pulsaciones de las explosiones al interior de la cámara de combustión, que lo pudimos determinar con ayuda de la transformada rápida de Fourier

#### 4. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL MOTOR PULSORREACTOR

Temprano (15) por la mañana del 13 de junio de 1944, un extraño nuevo sonido fue escuchado sobre Londres, comparado con el rugido de una motocicleta. Este proyectil fue hecho de forma que parezca un pequeño aeroplano viajando muy rápido y dejando un rastro de fuego por detrás. A las 4:20 a.m. exactamente el ruido ceso abruptamente. Después de unos pocos momentos de quietud mortal, la detonación de 1870 libras (847 Kg aproximadamente) de explosivos rompió el aire a 15 millas al este del puente de la torre. Cuando el polvo se asentó, seis civiles murieron y otros nueve quedaron seriamente heridos. Esto fue solo el inicio. Desde aquella primera explosión hasta el primero de setiembre, cerca de 9000 de estos misiles fueron enviados desde lugares al norte de Francia. Los militares británicos fueron simples espectadores del ataque, el nombre en clave "buceador" fue usado para describir estas naves

no tripuladas. Por las fotografías de reconocimiento aéreo tomadas por los aliados se conocía de algunas extrañas idas y venidas en las costas del norte francés desde 1943. Ellos vieron muchas pequeñas instalaciones construidas en los bosques cubriendo un área costera desde la península de Cherbourg hasta el Pasde – Calais y la costa holandesa. Cada uno de estos “sitios de esquí” como fueron ellos denominados, consistieron de un grupo de edificaciones de forma inusual alguno de los cuales fueron largos, delgados y la forma como de esquí. Desde la primera vez que estos lugares fueron descubiertos fueron bombardeados continuamente. Después del día D la real fuerza aérea (RAF) notifico que las rampas habían sido construidas en esos lugares.

Durante los años de 1930, científicos alemanes investigaron el uso de cohetes como un dispositivo de propulsión para autos, aviones así como también de personas.

Antes de que inicie la II guerra mundial en 1939, los científicos trabajaron en máquinas tipo jet para impulsar bombas voladoras.

Eventualmente ellos desarrollaron los motores pulsorreactores (pulse jet) con un concepto que se inició en los años de 1920 por un ingeniero aeronáutico denominado Paul Schmidt.

El frente de un largo tubo fue cubierto por una serie de alas abisagradas o persianas que fueron encerradas con una mezcla de aire / gasolina y se producía la combustión por una simple chispa eléctrica de bujía. Esta explosión empujaba al tubo hacia adelante. Después de la combustión la presión del aire que salía por el tubo reabrió las persianas en el frente, admitiendo más aire y permitiendo otra inyección de gasolina. La secuencia de ignición fue repetida a una razón de 500 pulsos por minuto, causando su característico sonido de motocicleta de dos tiempos y transmitiendo

hacia adelante un empuje constante para cualquier tubo que este a su lado. En la figura 4.16 vemos la fotografía del Coronel de la Luftwaffe Max Watchel quien estuvo a cargo de las instalaciones de lanzamiento de los V-1 construidas en la Francia ocupada y en la figura 4.17 vemos la fotografía de la entrega de los V-1s a través de los bombarderos modificados Heinkel He-111 fue una delicada operación que hizo poco para mejorar la precisión de los misiles.

Figura 4.1 6: El comandante de Flakregiment 155 (W).

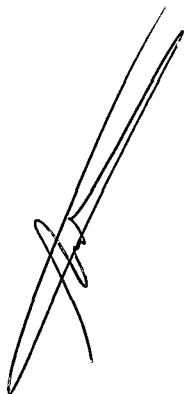


Fuente: *El segundo bombardeo aéreo de Londres*. **Gosling, Peter**. Abril 2005, Revista de la II guerra mundial, pp. 20-24.

Figura 4.1 7: V-1 se deja caer desde un Heinkel He-111H-22.



Fuente: *El segundo bombardeo aéreo de Londres*. **Gosling, Peter**. Abril 2005, Revista de la II guerra mundial, pp. 20-24.



En 1941 el ministro de aeronáutica alemán designó a la compañía aeronáutica Fieseler para diseñar y construir un pequeño avión no tripulado, impulsado por un motor pulsorreactor construido por la compañía Argus, una simple bomba con alas. El resultado fue el Fieseler Fi-103, conocido como el Vergeltungswaffe (arma de represalia) 1 o V-1. La bomba voladora V-1 fue desarrollada con la facilidad de las investigaciones en Peenemunde en las costas del Báltico, el cual fue también el sitio de pruebas para los prototipos cohetes V-2. El primer lanzamiento exitoso del V-1 fue en la víspera de navidad de 1942.

En 1943 la construcción de los misiles fue dada a las fábricas en Nordhausen en las montañas Hartz, la Volkswagen trabajo cerca de Hamburgo y la Stettin en las costas del Báltico. La fábrica Nordhausen fue enterrada profundamente en las montañas y estaba operada casi completamente por trabajadores esclavos.

Una unidad especial, Flakregiment 155 (W) bajo el comando del coronel Max Watchel, este oficial fue entrenado para realizar el mantenimiento y encendido de los V-1s terminados.

Antes de lanzarlos una brújula giroscópica se configuraba para enviar los V-1 a una posición predeterminada. Cualquier desviación del camino de vuelo fueron entonces corregidos por giros realizados a bordo. Un registro de aire que se evacua lentamente por una pequeña hélice en la nariz de la cabeza de la ojiva fue diseñado para enviar el V-1 en picada después de viajar una distancia específica. La ojiva podía ser detonado por cualquiera de estas tres espoletas separadas, una espoleta mecánica para todas las vías, y una espoleta de retardo de reloj. La espoleta eléctrica fue armada por el registro de aire cuando el misil estuviera a 40 millas de su objetivo. Las tres fueron diseñadas de tal manera que





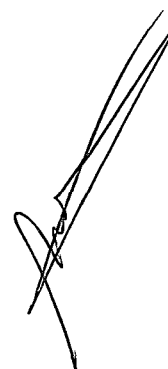
la detonación fuera segura. Cuando el registro de aire indicaba que el objetivo estaba cerca los elevadores y timón fueron ubicados en una posición neutral, y los detonadores fueron lanzados para bloquear un par de alerones por debajo del plano de cola con el fin de obligar a sumergirse al misil y estallar. Esto causaba el cierre de ingreso de combustible y el motor se detenía la cual creaba el silencio mortal que precedía a la explosión. En la figura 4.18 vemos la fotografía dos hombres inspeccionando un V-1 después de su lanzamiento fallido en algún lugar de Francia, los pobladores recordaron que el despido de un misil era ensordecedor, a menudo rompiendo las ventanas de las casas en los pueblos cercanos.

Figura 4.1 8: Bomba V-1 después de su lanzamiento fallido en un lugar en Francia.

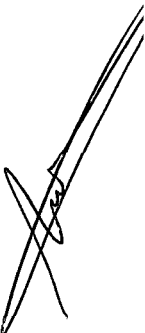


Fuente: *El segundo bombardeo aéreo de Londres*. **Gosling, Peter**. Abril 2005, Revista de la II guerra mundial, pp. 20-24.

Así como completo fue el diseño, el arma no era perfecta. Cuando un V-1 fallaba al salir de la rampa el equipo de lanzamiento alemán corrían como conejos asustados para esconderse detrás de un montículo de tierra. Albert Bruvris, un agricultor que vivió en un



lugar de lanzamiento cerca de la aldea de Les Catlliers, tiene recuerdos vividos de varios fallos que aterrizaron en los alrededores del campo. Afortunadamente no siempre explotaban. El recuerda uno sin embargo, que exploto varios días después del impacto, perjudicando las casas de los alrededores. Cuando otro V-1 aterrizo a lado de una carretera local cerca de una granja, los oficiales alemanes aparecieron pronto y ordenaron que todas las casas sean evacuadas. Ellos detonaron la bomba destruyendo la mayoría de la granja en el proceso, y gritaron en señal de triunfo "Buen trabajo, Inglaterra pronto será destruida" Bruvris También recordó que una anciana mujer murió cuando fue atrapada bajo los escombros de su casa, la cual fue demolida por el estallido del V-1. Flakregiment estuvo operativa en diciembre de 1943 y espero para empezar sus operaciones el 13 de febrero de 1944. Los misiles por lo tanto fueron entregados a los lugares de lanzamiento hasta junio. Los 10 primeros V-1 fueron lanzados el 13 de Junio, la invasión aliada de Francia estaba en curso. De los 10 proyectiles lanzados, cuatro fallaron tan pronto fueron lanzados, y dos se estrellaron en el canal Ingles. Los cuatro restantes cayeron en el área de Londres, pero solo uno de ellos cayó en la misma ciudad. Tres días después, 244 bombas voladoras fueron lanzadas; 153 cayeron en Inglaterra. A finales de Junio, de los misiles lanzados a Londres cada día, solo un tercio llego a su objetivo. La campaña contra la capital británica continúo hasta Julio. Las instalaciones francesas fueron invadidas por las fuerzas aliadas a inicios de setiembre, terminando con la primera fase del ataque. Para ese entonces, un total de 8617 V-1s habían sido lanzados desde las instalaciones francesas. Las instalaciones de las costas francesas, por lo tanto, no fueron los únicos lugares de lanzamiento para los V-1, dirigidos a Inglaterra. Trataron con bombarderos Heinkel He-11H en Pememunde en 1943, que los había llevado a hacer el desarrollo



del lanzamiento V-1 He-11H-22. El 9 de Julio de 1944, la operación Rumpelkammer (habitación de madera) empezó con los He-11H-22s del III grupo *Kampfgeschwader 3* (III/KG.3) con sede en los países bajos, empezando el ataque con bombas voladoras lanzadas desde el aire al menos un tercio de los disparos no tuvieron éxito.

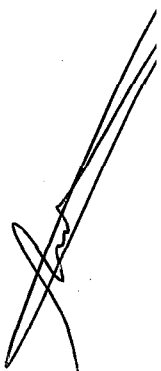
Los lanzamientos desde el aire también dio a los alemanes la ventaja de atacar objetivos terrestres.

La campaña duró hasta setiembre cuando los campos de aviación utilizados por III/KG.3 tenían que moverse hacia tierra adentro. Durante la primera fase de los ataques con lanzamientos desde el aire, los III/KG.3 lanzaron cerca de 300 V-1s. Después de esta operación, la fuerza fue ampliada y rebautizada con I/KG.53 y II y III Gruppen se añadieron a las fuerzas de bombas aéreas con mayor intensidad. El abastecimiento de combustible, por lo tanto se convirtió en un problema, y no fue sino hasta diciembre de 1944 que esta fuerza pudo lanzar 50 V-1s a objetivos en el norte de Inglaterra. Una vez que los sitios de lanzamiento en tierra en Francia habían sido puestos fuera de combate, las operaciones comenzaron desde la Holanda ocupada en Marzo de 1945. Los lanzamientos desde las nuevas posiciones usaron una mejorada V-1 con un alcance más largo, pero la ojiva más pequeña que las versiones anteriores.

Los ataques de los V-1 fueron repelidos de tres formas: con armas antiaéreas, globos de barrera o aviones de combate RAF. El derribo de una bomba voladora fue ya sea por los cañones terrestres o acciones de combate necesarios con considerable precisión ya que el misil viajó con una velocidad de cerca de 400 mph. La RAF destino ocho escuadrones de combatientes de alta

velocidad, como el Supermarine Spitfire, Hawker Tempest y Typhoon, junto con algunos de los primeros combatientes de jet de Gloster Meteor para luchar contra los cohetes. El avión tenía que ser especialmente preparado y sus motores sincronizados porque su velocidad máxima no era mucho mayor que el de sus objetivos. Además, la chapa de acero del cuerpo de un V-1 no podía ser fácilmente penetrado por una bala de ametralladora, por lo que tenían que ser utilizadas proyectiles de cañón. Esto fue un problema para los pilotos de combate como el cañón de 20 mm tenía un alcance mucho más corto que una ametralladora de 0,3 de calibre, un golpe exitoso era probable que inicie una explosión en el aire peligrosamente cerca del avión de combate. Hubo, sin embargo, otra opción. Las únicas superficies de control de los V-1s fueron un timón, que fue dirigido por el giroscopio de trabajo en conjunción con la brújula magnética y ascensores que estaban cerradas con llave cuando el registro se quedó sin aire y los spoilers debajo de la cola fueron desplegados. Si al cohete se le podría dar la vuelta esto desorientaba a los sistemas y enviaba el misil fuera del objetivo a tierra en algún lugar lejos de concentraciones de población. Dado que ala del V-1 no poseía alerones para controlar un giro no había manera de que pudiera recuperarse de tal movimiento.

El 4 de agosto, cuando un piloto de Meteor del Escuadrón No. 616 encontró que sus armas se habían atascado, se las arregló para deslizar su punta del ala bajo la de la V-1, y la presión del aire volcó el misil en giro fatal. Otros pilotos de combate RAF comenzaron pronto a adoptar su método. Una vez que habían dominado las técnicas de "matar" una V-1, los Pilotos de la RAF fueron muy exitosos. El principal anotador de esta nueva especialidad de la guerra aérea era el líder del escuadrón de

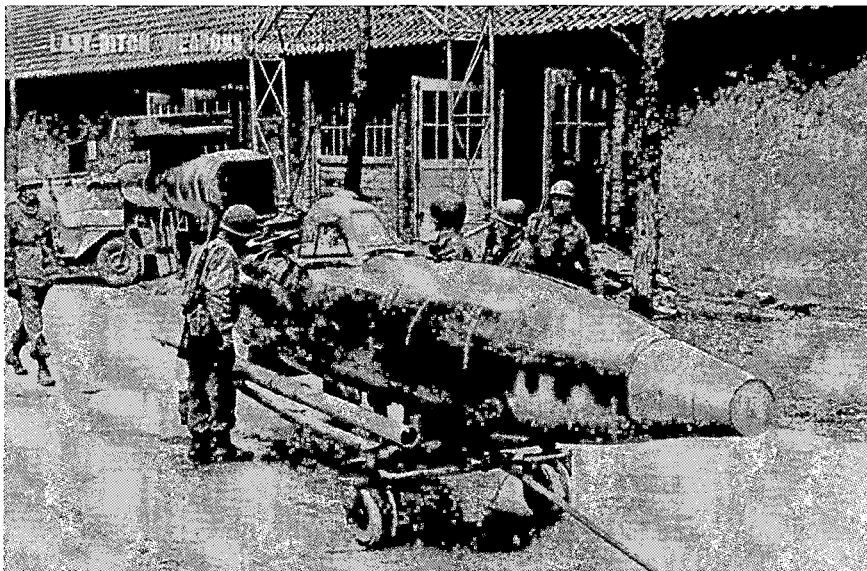


Joseph Berry del Escuadrón No. 501. Flying Tempestad I lawker, destruyó 60 misiles.

El último V-1 fue lanzado el 28 de marzo de 1945. Las Armas antiaéreas las derribaron antes de llegar a Londres, durante toda campaña de los V-1 cerca de 10000 misiles que se pusieron en marcha, la mayoría fueron lanzados desde sitios en tierra. No más del 25 por ciento de aquellos nunca llegaron a Inglaterra. Más del 90 por ciento de las bombas voladoras lanzados del aire fallaron antes de cruzar la costa Inglesa. Sin embargo, las explosiones de las bombas voladoras mataron 6184 personas y 17981 heridos, la gran mayoría eran civiles.

El motor pulsorreactor no solo sirvió para las bombas voladoras V-1 sino también que se elaboraron diferentes máquinas de guerra como el sumergible que muestra la figura 4.19 donde Soldados norteamericanos transportan una nueva arma alemana encontrada sin haberla utilizada, impulsada por un motor pulsorreactor.

Figura 4.1 9: Sumergible impulsado por un pulsorreactor.



Fuente: <https://www.warhistoryonline.com/war-articles/the-kamikazi-v1-meant-to-destroy-london.html/attachment/neu-tramm-us-soldaten-mit-v4>.

## **V. MATERIALES Y METODOS**

El trabajo presentado no hubiese podido realizarse sin el apoyo y asesoría de los profesores y estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica – Energía de la Universidad Nacional del Callao, quienes facilitaron sus conocimientos equipos y maquinas en el proceso de la construcción y pruebas de funcionamiento del motor pulsorreactor.

El trabajo realizado tuvo como base los planos obtenidos de internet del motor pulso yet al cual le hicimos varias modificaciones ya que construido con la propuesta original no llego a funcionar correctamente conforme lo explicaremos más adelante, se hicieron varias pruebas de encendido del motor hasta lograr la metodología adecuada para hacer funcionar el motor pulsorreactor.

Para la obtención de los resultados en el proceso de construcción del motor pulsorreactor y evaluación del empuje hemos considerado dos etapas, la etapa de construcción y funcionamiento del motor pulsorreactor que consta de la construcción misma del motor con su armadura y la estructura metálica adecuada para realizar las pruebas experimentales y la etapa de la obtención experimental del empuje.

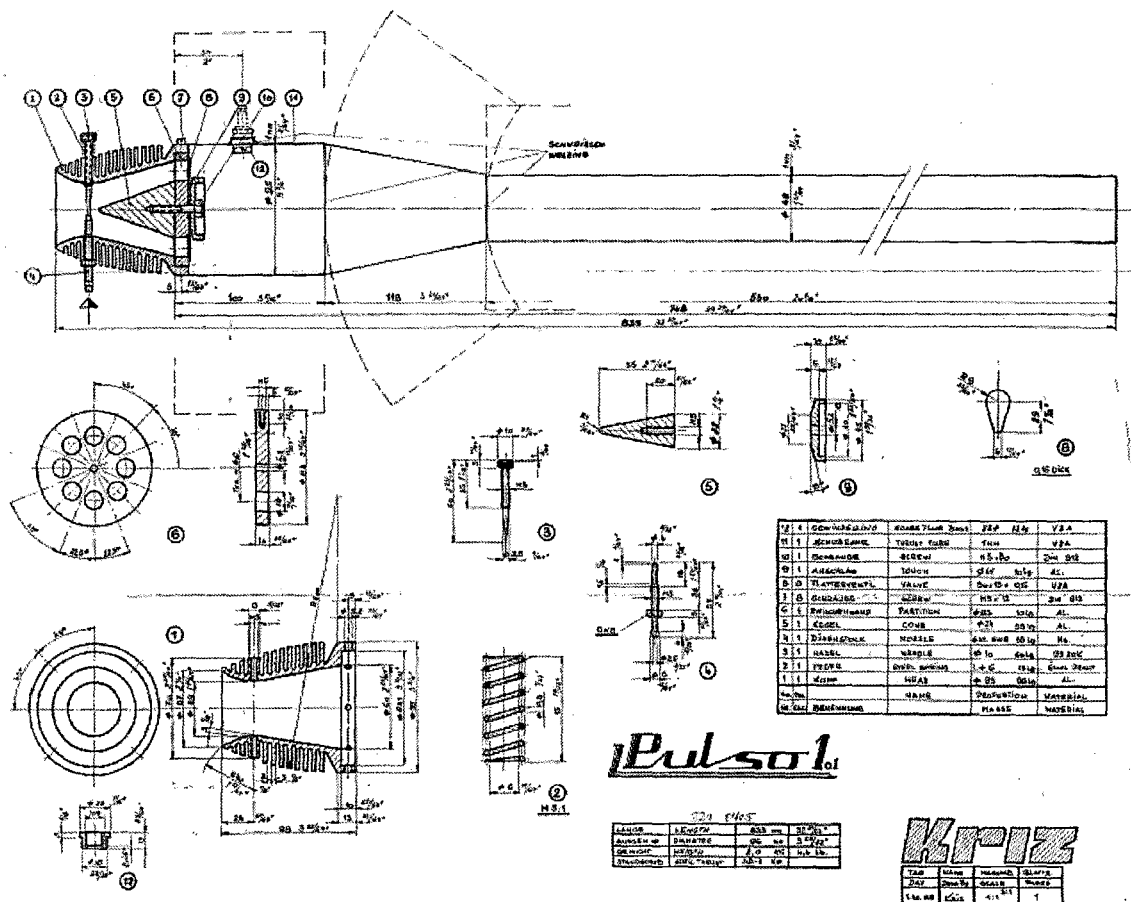
### **5.1. MATERIALES USADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR PULSORREACTOR**

El proceso de construcción y puesta en operación del motor pulsorreactor lo hemos dividido en tres partes, en primer lugar la parte mecánica, en segundo lugar la parte eléctrica y en tercer lugar la parte neumática que a continuación pasamos a detallar.

### 5.1.1. CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR PULSORREACTOR

1. **Parte Mecánica:** Constituido por todas las piezas y estructura tubular metálica que conforma el motor pulsorreactor donde se tomó como referencia para la construcción los planos obtenidos de internet que mostramos en la figura 5.1, para mayor claridad

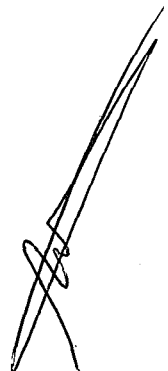
Figura 5. 1: Planos de referencia para la construcción del motor pulsorreactor.



este esquema lo presentamos ampliado en los anexos.

Fuente: <http://huergo.4t.com/dir/proyectos.htm>.

En el proceso de construcción se hicieron varias modificaciones tales como en el difusor que en los planos establece que la unión con la tobera era a través de pernos, situación que tuvimos que cambiar ya

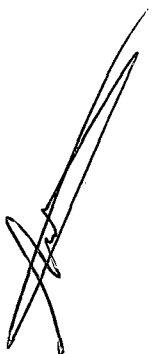


que no se lograba el vacío necesario luego de expulsar los gases de combustión para abrir las válvulas tipo margarita, se adaptó para que esta unión sea roscada, la otra modificación fue en el tabique y cono distribuidor que era un cono simple y los agujeros del tabique eran rectos esto se cambió por un cono con mejor simetría para aprovechar de forma más efectiva el ingreso de aire donde el tabique presenta agujeros con ángulos de inclinación.

## **1.1 Mecanizado**

Para poder armar el motor pulsorreactor, fue necesario construir cada una de las partes según las medidas y tolerancias del plano, usando conocimientos íntimamente relacionados con la escuela académico profesional de Ingeniería Mecánica tales como dibujo mecánico asistido por computador y procesos de manufactura CNC disponibles en la Facultad de Ingeniería Mecánica - Energía de la Universidad Nacional del Callao.

**1.1.1 Difusor:** El difusor regula la cantidad de ingreso de combustible (gasolina) utilizando el principio de Venturi, y por lo tanto controla la mezcla de aire / combustible. También actúa como un atomizador de esta mezcla dentro de la cabeza del pulso; se seleccionó como material el aluminio trefilado para esta parte, este elemento constituye la parte fría pues al ser un elemento sin contacto directo con la cámara de combustión, no es necesario que sea de acero inoxidable, reduciendo así los costos de materia prima además el peso del pulsorreactor. El proceso de maquinado para esta pieza en especial fue realizado con ayuda de una fresa CNC del instituto de control computarizado de la universidad, esta máquina nos permite una mayor precisión en las curvas internas del difusor así como las externas (disipadores de calor). En la propuesta original del plano de E. Brauner, la unión entre la tobera y el difusor era a través de

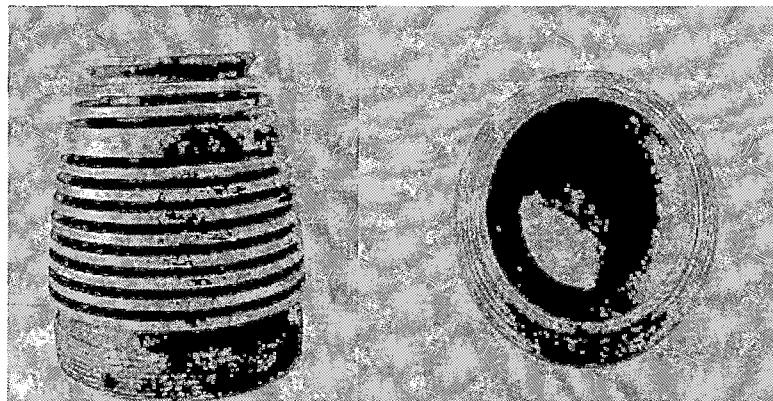




pernos de sujeción, diseño que no fue funcional ya que evitaba la formación de vacío para la absorción del combustible por lo que se le adapto una rosca conforme vemos en la fotografía de la figura 5.2, esta modificación nos permitió hacer funcionar el motor pulsorreactor y facilito el cambio de las válvulas tipo margarita luego de su deterioro con mucha mayor facilidad que cuando lo fijábamos con los tornillos.

Figura 5. 2: Difusor modificado.

Vistas del difusor construido de aluminio trefilado donde apreciamos el roscado en la base de la fotografía a la izquierda.



Fuente: Elaborado por el autor.

**1.1.2 Tabique:** Esta parte es el disco constituido por ocho agujeros externos por donde ingresara la mezcla de aire / combustible sobre la que se asienta y fija el cono distribuidor, este tabique separa el difusor con la cámara de combustión internamente y en la cual se acoplan la válvula margarita y el asiento. En este caso, por ser un elemento que va a estar sometido a fatiga térmica se seleccionó acero inoxidable y el proceso de manufactura se realizó mediante un torno mecánico, fresa y taladro de banco.

En la figura 5.3 y la figura 5.4 mostramos esquemas del diseño y la foto de la pieza construida de acero inoxidable.

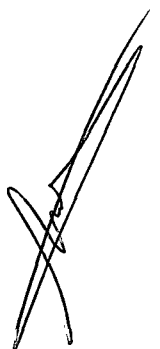
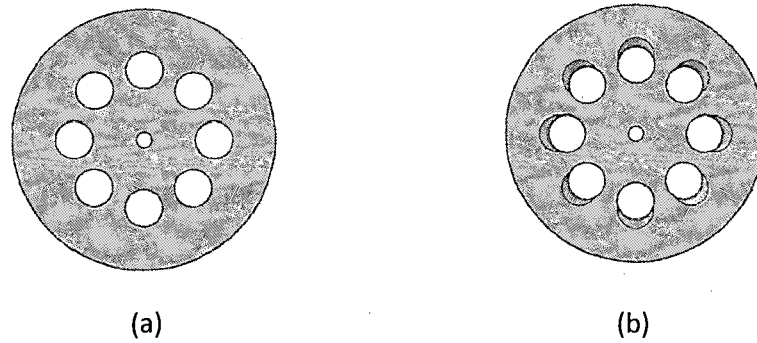


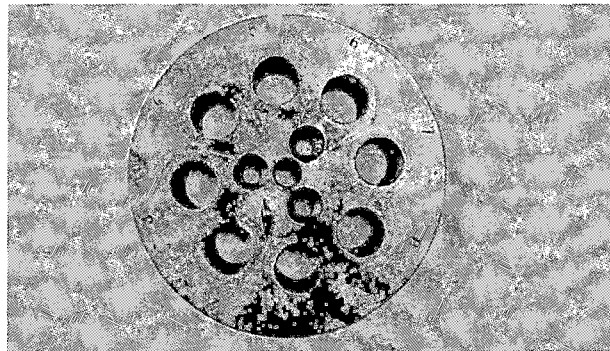
Figura 5. 3: Tabique modificado.

Diseño del Tabique (a) vista superior (b) vista frontal.



Fuente: Elaborado por el estudiante de ingeniería en energía Angel Yacila Alvarado.

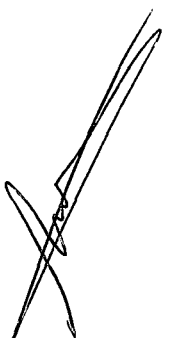
Figura 5. 4: Tabique de acero inoxidable.



Fuente: Elaborado por el autor.

**1.1.3 Cono distribuidor:** Este componente distribuye la mezcla aire combustible de forma uniforme en las ocho válvulas de la margarita, si bien está en contacto con el tabique, no es necesario ser del mismo material, por lo que se fabricó de aluminio trefilado, siendo el maquinado solamente con torno mecánico.

El cono se modificó de tal manera que el aire con combustible llegue directo a los agujeros obteniendo una mejor inyección de



la mezcla de aire combustible en la cámara de combustión, que a diferencia del diseño original una parte considerable de la mezcla de aire combustible quedaba en el tabique y no ingresaba en la cámara de combustión.

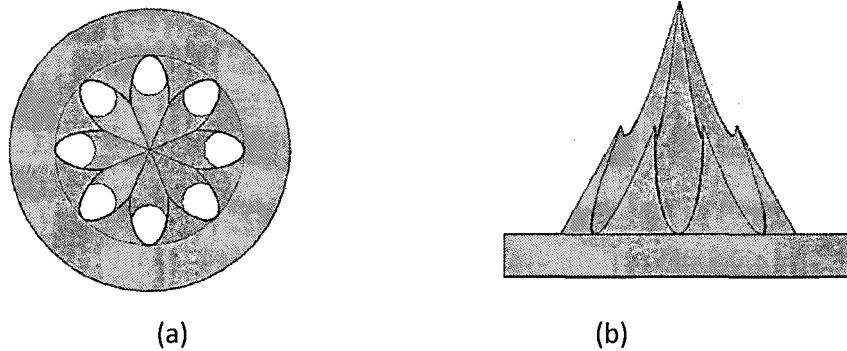
Los agujeros se realizaron sobre la brida y el cono generado por el diámetro exterior a los agujeros tomando en cuenta la misma altura del cono original, con una inclinación de  $73.78^\circ$ .

El tabique y el cono distribuidor en realidad constituyen una sola pieza, están unidas y alineadas con los agujeros por donde pasa la mezcla de aire combustible por tres pernos de sujeción.

A continuación mostramos e las figuras 5.5 y 5.6 los esquemas diseñados del cono distribuidor así como la pieza construida.

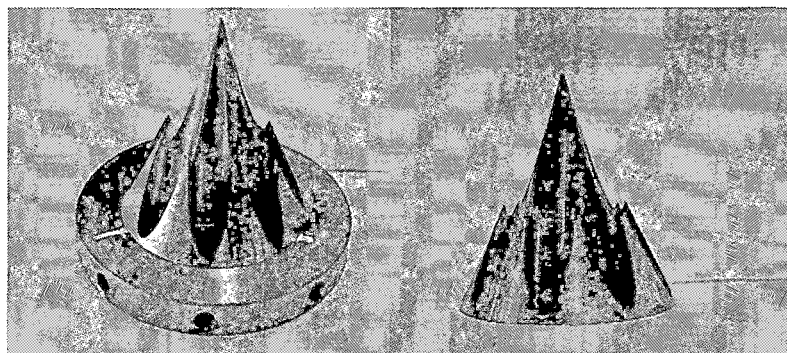
Figura 5. 5: Diseño del cono distribuidor.

Vistas del diseño del Cono distribuidor (a) vista superior (b) vista frontal.

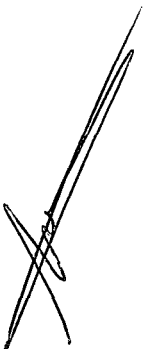


Fuente: Elaborado por el estudiante de ingeniería en energía Angel Yacila Alvarado.

Figura 5. 6: Cono distribuidor de aluminio trefilado.

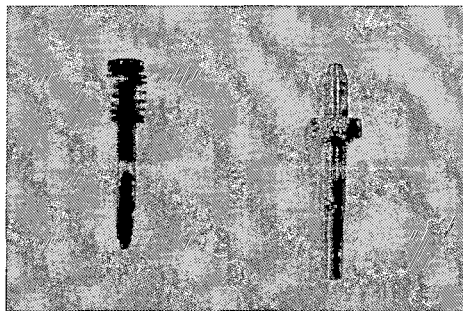


Fuente: Elaborado por el autor.



**1.1.4 Válvula reguladora de combustible:** Esta válvula consta de dos partes conforme se muestra en la figura 5.7, un eje de bronce roscado con una boquilla para la entrada del combustible, que se cierra en su parte superior con un perno de fierro con punta cónica que tiene unido a este un resorte concéntrico para regular el ajuste, ambas partes fueron fabricadas en un torno mecánico.

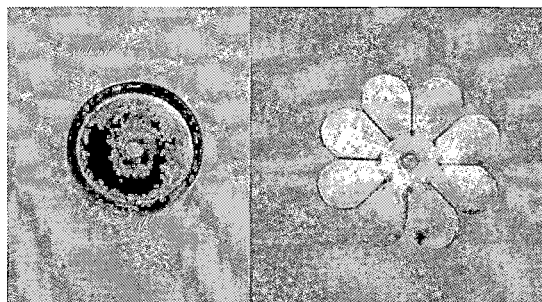
Figura 5. 7: Válvula reguladora de combustible.



Fuente: Elaborado por el autor.

**1.1.5 Asiento de la válvula margarita:** Va colocado justo por detrás de la margarita. Tiene una forma semi-curva y su misión es la de limitar el desplazamiento de la margarita cuando ésta se abre, evitando que ésta se rompa. Tiene una gran importancia en la frecuencia de la margarita. Al igual que el tabique, es necesario que esta parte sea de acero inoxidable por estar en contacto directo con la cámara de combustión y su mecanizado fue hecho con un torno mecánico esta se muestra en el lado izquierdo de la figura 5.8.

Figura 5. 8: Asiento de la válvula margarita y margarita.



Fuente: Elaborado por el autor.

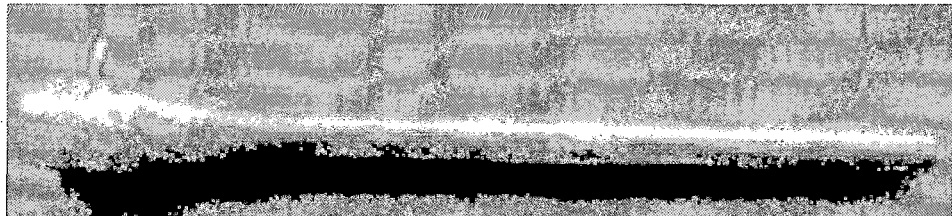
A handwritten signature or mark consisting of several overlapping, curved lines.

**1.1.6 Válvula margarita:** Es la pieza más importante del conjunto del motor conforme se muestra en la parte derecha de la figura 5.8. A diferencia de las demás partes que conforman el pulsorreactor, estas válvulas están hechas de laminas de acero inoxidable de un espesor de 0.15mm, las cuales fueron cortadas con ayuda de una fresa especial. La propiedad de este material es que después de cada pulso, la lámina regresara a su posición inicial aun incluso de haber sido sometida a cargas y fatiga térmica altas.

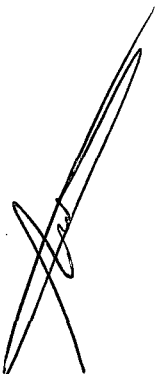
**1.1.7 Tobera y escape:** Es un tubo ensanchado en uno de sus extremos para formar la cámara de combustión conforme muestra la figura 5.9. Tiene instalada una bujía en la cámara de combustión. La longitud de la tobera se ha calculado generalmente por el método de prueba y error, para que sea resonante a la misma frecuencia que la margarita. Su longitud es crítica.

Esta constituye la mayor parte del cuerpo del pulsorreactor. Estos elementos fueron hechos a base de planchas de acero inoxidable de dos milímetros de espesor, rolados en la universidad en el laboratorio de máquinas y herramientas, unidos por soldadura TIG, con supervisión de los profesores especialistas de la materia.

Figura 5. 9: Tobera y escape.



Fuente: Elaborado por el autor.



En la parte de mayor diámetro que une la tobera con el difusor según el esquema original de E. Brauner, la unión se producía a través de pernos de sujeción esta configuración dificultaba el encendido por la rápida pérdida de vacío después de la explosión apagando al motor pulsorreactor, se produjo la modificación soldando un anillo de mayor espesor que el tubo con roscado interno para la unión con el difusor que también se modificó y tenía la rosca externa cónica para un mejor ajuste de manera que se asegure el vacío después de la combustión de la mezcla de aire y combustible en la cámara de combustión.

#### 5.1.2. ESTRUCTURA METALICA PARA LA MEDIDA DIRECTA DE LA FUERZA DE EMPUJE DE UN MOTOR PULSOREACTOR.

En esta investigación, la atención se centrara en el número de pulsos producidos y la determinación directa del empuje del motor pulsorreactor utilizando un sensor de Fuerza conectado a una interface y una computadora que permitirá registrar y analizar la señal obtenida por este sensor.

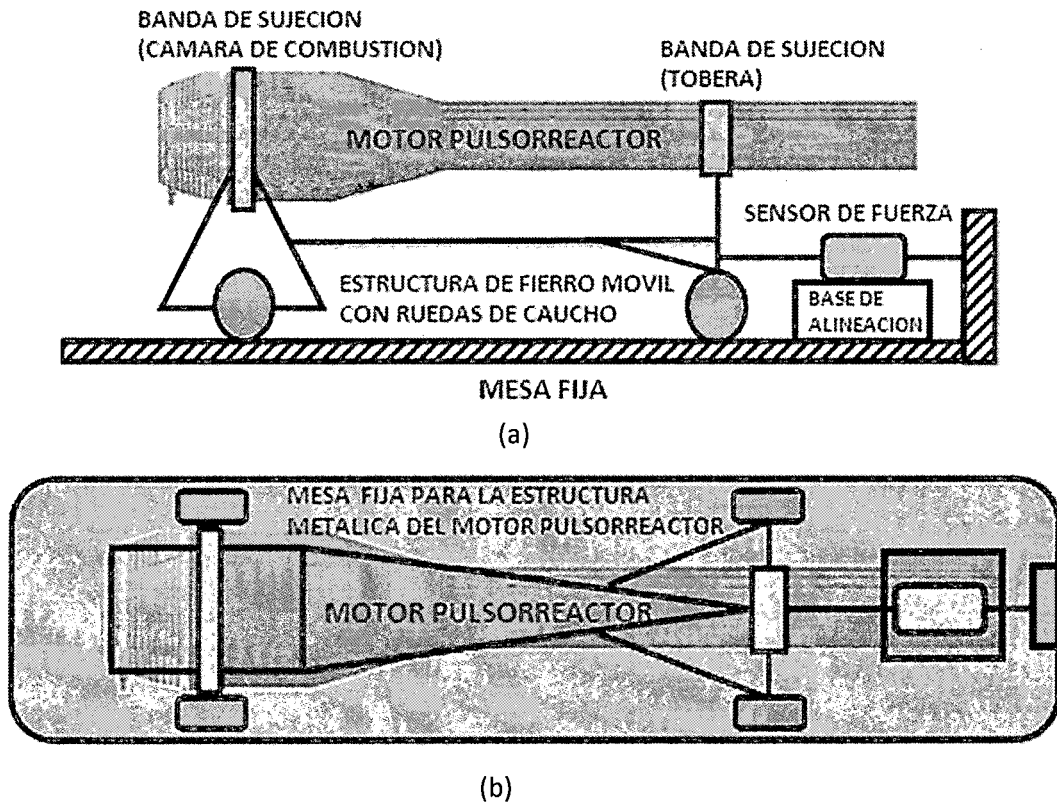
Desarrollaremos una estructura metálica adecuada para poder determinar el empuje del motor pulsorreactor, teniendo sumo cuidado de no causar daños materiales o personales en el momento de la toma de datos.

La estructura planteada la mostramos en los esquemas que presentamos a continuación:

La estructura fue hecha con fierro liso soldado de 0,50 pulgadas de diámetro, montadas sobre dos pares de ruedas de caucho para que tengan un libre desplazamiento, en la parte posterior se le adaptara un gancho de sujeción para conectar en forma alineada horizontal la estructura del pulsorreactor con el sensor de Fuerza y la mesa fija en la figura 5.10 se muestra en esquema de esta

estructura con una vista: (a) lateral y (b) de planta de la estructura móvil del pulsorreactor para determinar el empuje que se producen con las pulso detonaciones.

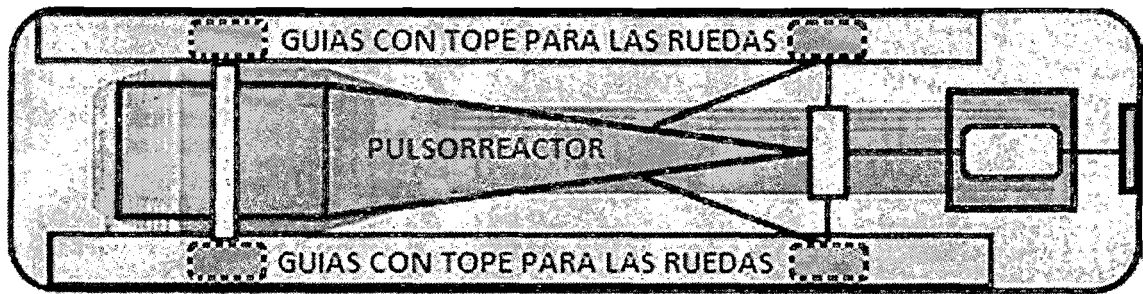
Figura 5. 10: Estructura mecánica para el pulsorreactor.



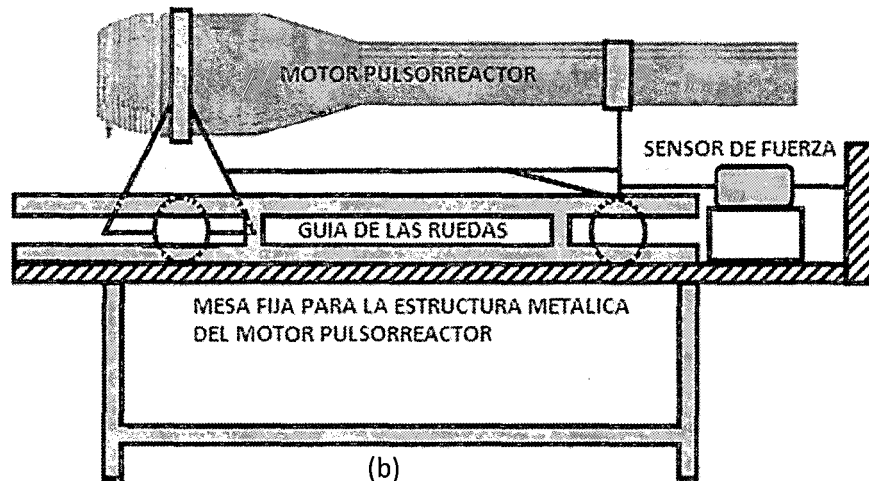
Fuente: Elaborado por el autor

La mesa fija está constituida pesada plancha de fierro de 0.25 pulgadas de espesor cuya función es el de darle mayor inercia al sistema de forma que asegure o fije al motor pulsorreactor en la estructura al momento de realizar las mediciones, en donde se le ha colocado unas guías con tope para las ruedas del la estructura móvil del pulsorreactor compuesta de cuatro fierros de 0.25 de espesor en forma de U, conforme lo mostramos en las siguientes imágenes de la figura 5.11 y figura 5.12 vemos esquemas con una vista (a) de planta y (b) lateral de la estructura con la mesa fija y las guías para las ruedas del soporte del motor pulsorreactor.

Figura 5. 11: Detalles de las vistas de la estructura mecánica.



(a)

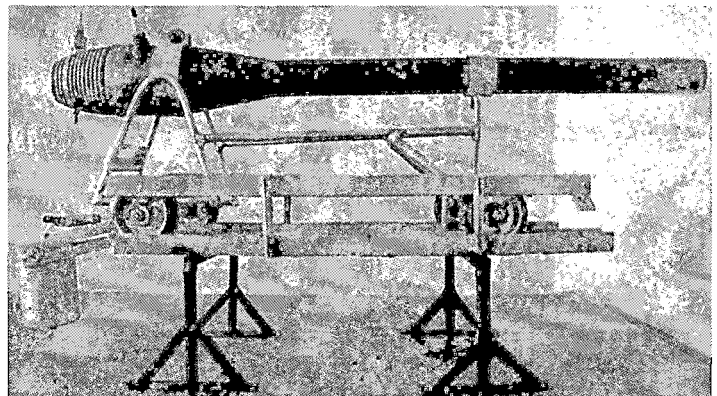
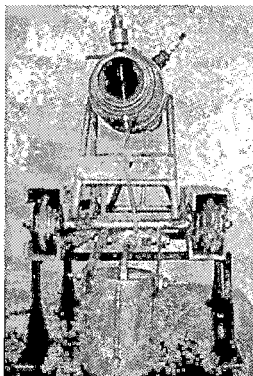


(b)

Fuente: Elaborado por el autor

Figura 5. 12: Pulsorreactor construido.

Fotografías del pulsorreactor y la estructura construida para la medición del empuje.



Fuente: Elaborado por el autor.



### 5.1.3. PARTE ELÉCTRICA

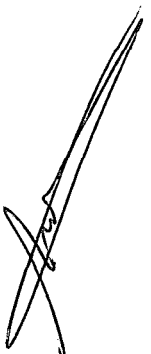
Para el encendido del motor pulsorreactor es necesario la asistencia de una chispa eléctrica producida por una bujía ubicada en la cámara de combustión donde se encuentra la mezcla de aire y combustible, para la generación de esta chispa eléctrica de encendido se utilizó:

- a) Transformadores de Voltaje, un transformador reductor de 220 V a 110 V y otro transformador elevador de 110 V a 10000 V.
- b) Un contacto manual de botón de arranque y paro, para dar inicio al flujo de electricidad.
- c) Cables y cocodrilos, para alimentar de fluido eléctrico a la bujía.
- d) Una bujía, para encender la mezcla de aire/combustible.

La chispa eléctrica o el flujo de electricidad a la cámara de combustión solo se utiliza para producir las primeras explosiones luego el mismo motor se auto sostiene en su funcionamiento.

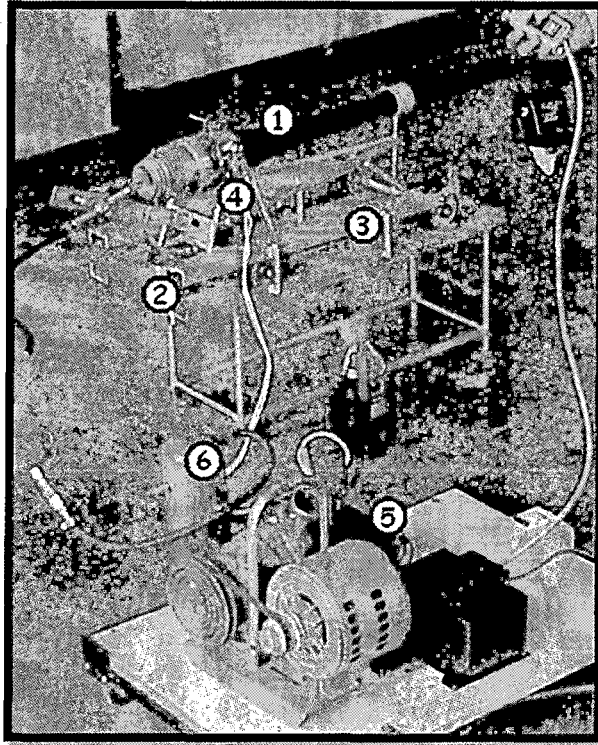
### 5.1.4. PARTE NEUMÁTICA

La alimentación del motor con el combustible inicialmente no es suficiente así que tenemos que forzar un poco el ingreso de aire en la entrada del difusor con el fin de crear la mezcla explosiva en el interior del motor; este flujo de aire a la vez por el efecto Venturi jala y atomiza la gasolina del tanque que se va a combinar con el aire y para ello utilizamos una pequeña compresora con una potencia de un cuarto de HP con sus accesorios de pistola de aire y manguera. Así como la parte eléctrica esta parte neumática una vez que el motor ha encendido ya no es necesaria hacerla funcionar. En la figura 5.13 mostramos la fotografía que muestra los componentes necesarios para el encendido del motor pulsorreactor como el mecánico, eléctrico y neumático.(1);(2) y (3)



parte mecánica y estructura de soporte (4) y (5) parte eléctrica (6)  
parte neumática.

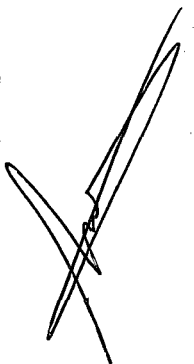
Figura 5. 13: Accesorios de arranque del motor pulsorreactor.



Fuente: Elaborado por el autor.

## 5.2. FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR PULSORREACTOR

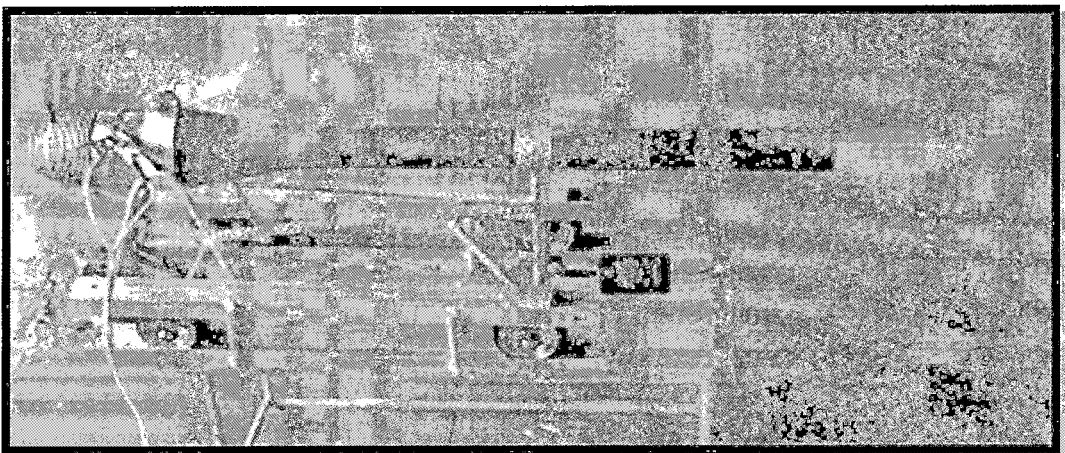
Para poner en funcionamiento el motor se utiliza un generador de chispas que alimentan la bujía, y aire comprimido proveniente de un compresor o de una botella de aire comprimido. El combustible llega al difusor, succionado por el paso del aire comprimido. Este aire, al pasar por la cabeza, crea el llamado efecto Venturi, que lo que hace es succionar el combustible. La mezcla de aire-combustible al ir a gran velocidad, abre los pétalos de la margarita y se introduce en la cámara de combustión. Las chispas de la bujía hacen que esta mezcla arda provocando una fuerte explosión. Esta explosión aumenta mucho la presión interna de la cámara de combustión, y provoca el cierre inmediato de los pétalos de la



margarita. Los gases se expanden y salen por el único sitio que pueden: por la tobera. Al salir todos los gases por la tobera, se crea en el interior de ésta y de la cámara de combustión, un vacío que hace que los pétalos de la margarita se abran de nuevo, entrando una nueva mezcla de aire-combustible, iniciándose de nuevo el proceso. Hay que destacar, que esta nueva mezcla combustible, no necesita de la bujía para arder, sino que arderá gracias a los restos de combustible y a las altas temperaturas en el interior de la cámara de combustión. Este proceso se repite con una frecuencia de unas 8 veces por segundo. A mayor tamaño, menor frecuencia, y a menor tamaño, mayor frecuencia. Este ciclo es lo que provoca ese ruido tan característico de este tipo de motores, que no es continuo como en una turbina o cohete, sino que es una sucesión rapidísima de explosiones. Este es el ruido que a todos nosotros nos tiene tan fascinados. Cuando se produce el ciclo, puede estar abierto o cerrado el tubo, por lo que cambian sus propiedades acústicas, por eso es un ruido tan ensordecedor

Una vez que el motor se encuentra en funcionamiento, se deja de suministrar aire comprimido, y se desconecta el generador de chispas, y el motor funcionará por sí mismo, conforme se muestra en la figura 5.14.

Figura 5. 14: Motor pulsorreactor en pleno funcionamiento.



Fuente: Elaborado por el autor.

Para conseguir que estos motores funcionen, la margarita y la tobera tienen que ser resonantes en la misma frecuencia. La tobera forma una simple cámara acústica resonante. La frecuencia estará basada en la velocidad de la combustión y la velocidad local del sonido dentro de la tobera. La velocidad local del sonido dependerá de la temperatura de la columna de gas. Como estos datos son muy difíciles de averiguar y son prácticamente desconocidos, será muy difícil averiguar la frecuencia resonante. Por lo tanto, la longitud total de la tobera no se suele calcular matemáticamente, sino por el método de prueba/error.

### 5.3. PROCESO EXPERIMENTAL DE RECOLECCIÓN DE DATOS

- 1) Se coloca el pulsorreactor<sup>1</sup> en su base, asegurándose de que tengan movimiento libre las ruedas en los rieles guía.
- 2) Se coloca el combustible<sup>2</sup> a utilizar en el recipiente de combustible que se encuentra en la base del pulsorreactor a una altura adecuada para que pueda subir sin problemas al momento de que el Venturi genere el vacío en el difusor.
- 3) Se hacen las conexiones y se revisa la instalación eléctrica.
- 4) Se conecta los cocodrilos en el transformador de 10 000 voltios y en la bujía, teniendo en cuenta que la parte de arriba de la bujía es positivo y la rosca es negativa (tierra).
- 5) En la computadora con el software data estudio instalado se conecta y calibra el sensor de fuerza a la interface y se activa la adquisición de datos automatizado, el sensor de fuerza se coloca en un extremo en la base del pulsorreactor que tiene libertad de movimiento en los rieles guía y el otro extremo fijo a la estructura metálica de soporte del pulsorreactor

---

<sup>1</sup>Entiéndase como pulsorreactor, difusor, cono, brida, asiento de margarita, margarita, bujía, válvula que controla el paso del combustible, cople para el ingreso de combustible, tobera.

<sup>2</sup> Para la prueba se utiliza gasolina 90.

- 6) Se hace cargar la compresora de aire a una presión de 5,0 bar.
- 7) Se enciende el transformador de 10 000 voltios. Se inyecta aire<sup>3</sup> por el difusor, el aire al pasar por la garganta del difusor genera que el combustible se eleve por el efecto Venturi y se atomice, ingresando como mezcla a la cámara de combustión venciendo la resistencia de las margaritas.
- 8) Estando el combustible atomizado en la cámara de combustión hace contacto con la bujía encendida y así empiezan a producirse los pulsos de encendido.
- 9) Simultáneamente se da inicio a la adquisición de datos por parte del sensor de fuerza conectado al motor pulsorreactor a través de la estructura construida especialmente para este fin, este sensor de fuerza registra de información de fuerza medido en Nétwtones en función del tiempo medido en segundos. Esta información es enviada a la PC a través de la interface y con ayuda del Software Data Studio podemos procesar la información recolectada.

---

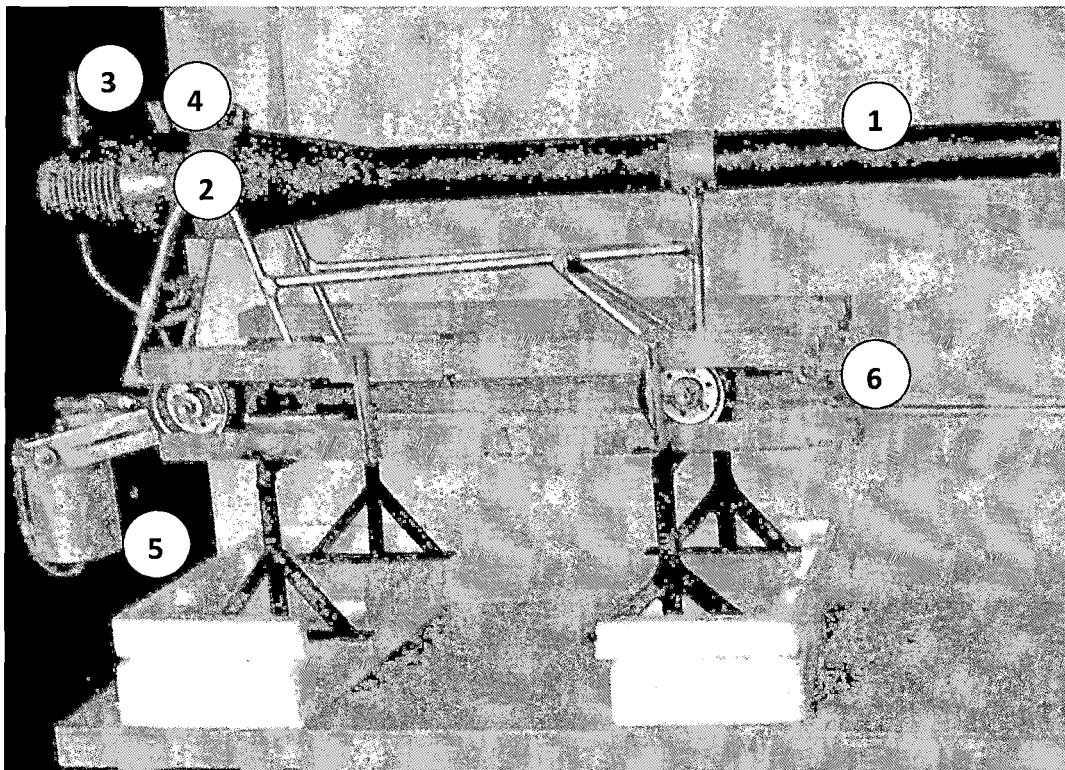
<sup>3</sup> La inyección de aire es solo para el encendido.

## VI. RESULTADOS

### 6.1. CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR PULSORREACTOR

El motor pulsorreactor fue construido utilizando como materiales el acero inoxidable para la tobera, tubo de escape, tabique, asiento de válvula margarita y aluminio trefilado para el difusor, todo este ensamble al momento del encendido funcionó adecuadamente y permitió la determinación del empuje de este motor pulsorreactor, este motor tiene una longitud de 0,850 m y una masa de 2,87 kg, en la figura 6.1 mostramos la fotografía indicando las siguientes partes que la componen: 1 Tubo de escape; 2 Cámara de combustión; 3 Válvula reguladora de combustible; 4 Bujía; 5 Tanque de combustible; 6 Estructura de soporte.

Figura 6. 1: Motor pulsorreactor construido.



Fuente: Elaborado por el autor.

## 6.2. EVALUACIÓN DEL EMPUJE DEL MOTOR PULSORREACTOR

Para la evaluación de los resultados del empuje del motor pulsorreactor hemos utilizado una estadística básica, fundamentalmente he trabajado con el valor medio y la desviación estándar, la primera me permite determinar el empuje promedio al analizar la información de fuerza versus tiempo y la segunda me da información relacionada con el grado de fluctuación que tiene el pulsorreactor en funcionamiento conforme transcurre el tiempo respecto de su valor promedio de empuje.

Además hemos hecho uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para analizar la señal registrada de Fuerza en función del tiempo y pasarla a una señal en espectros de frecuencia lo que facilito la determinación del número de pulsos que realiza el motor en funcionamiento por cada segundo.

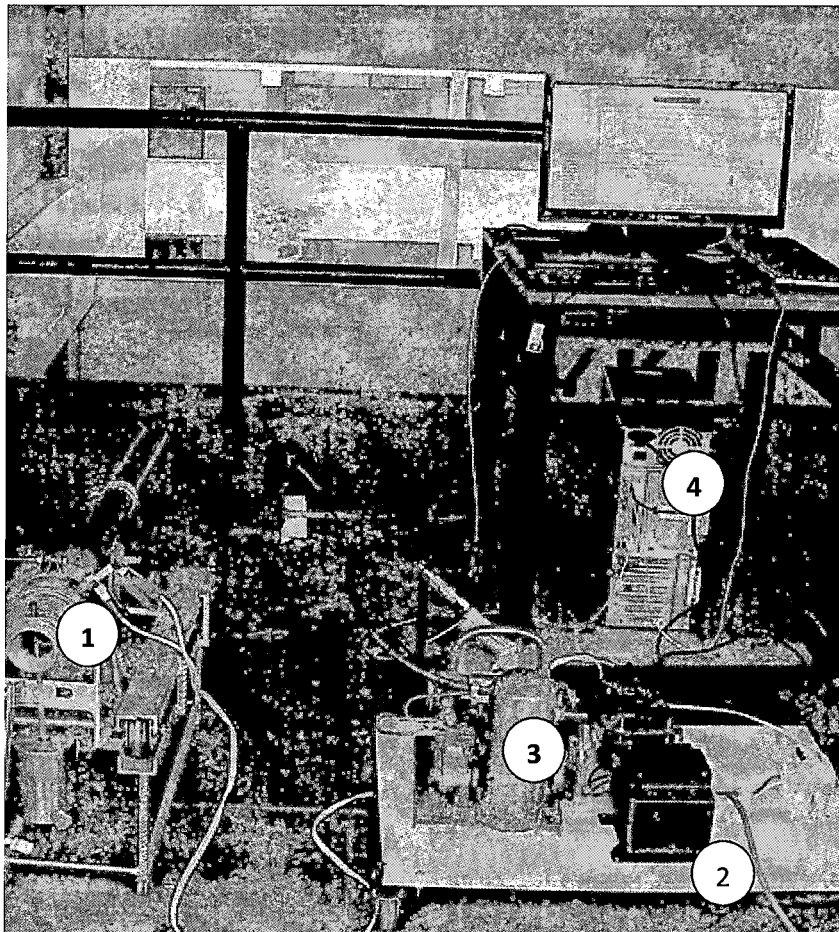
En la determinación del empuje del pulsorreactor construido utilizamos una computadora que permite el registro de la información, una interface que transfiere la información que registran los sensores a la computadora, el sensor de fuerza que obtiene los valores de fuerza en función del tiempo, un dinamómetro digital y el software Data estudio que permite el trabajo estadístico de los datos registrados por el sensor.

Con respecto al dinamómetro digital permite un registro del valor promedio de la cantidad equivalente de masa en unidades de kilogramos, lo que no permite hacer un trabajo estadístico adecuado, es decir no es conveniente trabajar con este instrumento por la poca o mínima información que reporta.

La ventaja de trabajar con los sensores y el software de análisis experimental es que te permite procesar directamente la

información registrada por el sensor, de manera que se obtengan resultados más fiables, para nuestro caso utilizamos un sensor de fuerza con un rango máximo de registro de intensidad de fuerza de  $\pm 50,0$  N, colocado y acondicionado en la parte posterior del motor pulsorreactor conectado al soporte rígido, conforme mostramos en el esquema experimental de la figura 6.2, donde mostramos la fotografía con las partes necesarias para la evaluación del empuje que son las siguientes: 1. Parte mecánica, 2 parte eléctrica, 3 parte neumática, 4 sistema automatizado de adquisición de datos.

Figura 6. 2. Arreglo experimental para determinar el empuje del motor pulsorreactor.



Fuente: Elaborado por el autor.

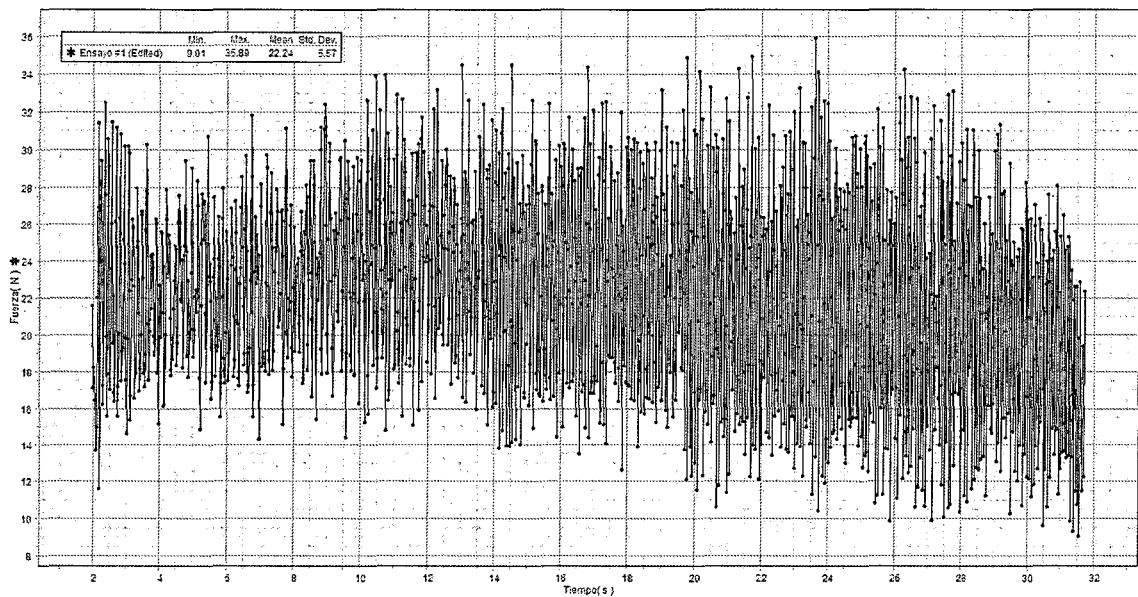


El arreglo mostrado nos permitió obtener la información necesaria, para determinar el empuje en Néwtones generado por el motor pulsorreactor, conforme lo comenzamos a detallar a continuación.

Los datos obtenidos con el sensor de fuerza en el proceso experimental lo hemos filtrado retirando los datos que no son significativos y solo hemos considerado los datos del funcionamiento estable del pulsorreactor, obteniendo las gráficas que a continuación mostramos.

**Primer ensayo:** Con la ayuda del sensor de fuerza obtuvimos información de fuerza medido en Néwtones en función del tiempo medida en segundos, del motor pulsorreactor en funcionamiento estable conforme lo mostramos en la figura 6.3, la figura muestra la nube de puntos experimentales con un comportamiento periódico, esta información periódica la podemos procesar para determinar la frecuencia a la cual están produciéndose los pulsos de combustión al interior del motor pulsorreactor utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) disponible en el software Data Studio, para determinar el empuje aplicamos la herramienta estadística a la información previamente filtrada y determinamos con ayuda del software el valor medio de los datos registrados que para este primer ensayo fue de 22,2 Néwtones, con una desviación estándar de 5,57 , esta desviación estándar nos cuantifica el grado de fluctuación que registra el pulsorreactor frente a su valor promedio, de la gráfica de puntos experimentales también nos damos cuenta que conforme transcurre el tiempo la fluctuación aumenta en perjuicio del valor promedio del empuje es decir se produce una disminución en el empuje promedio.

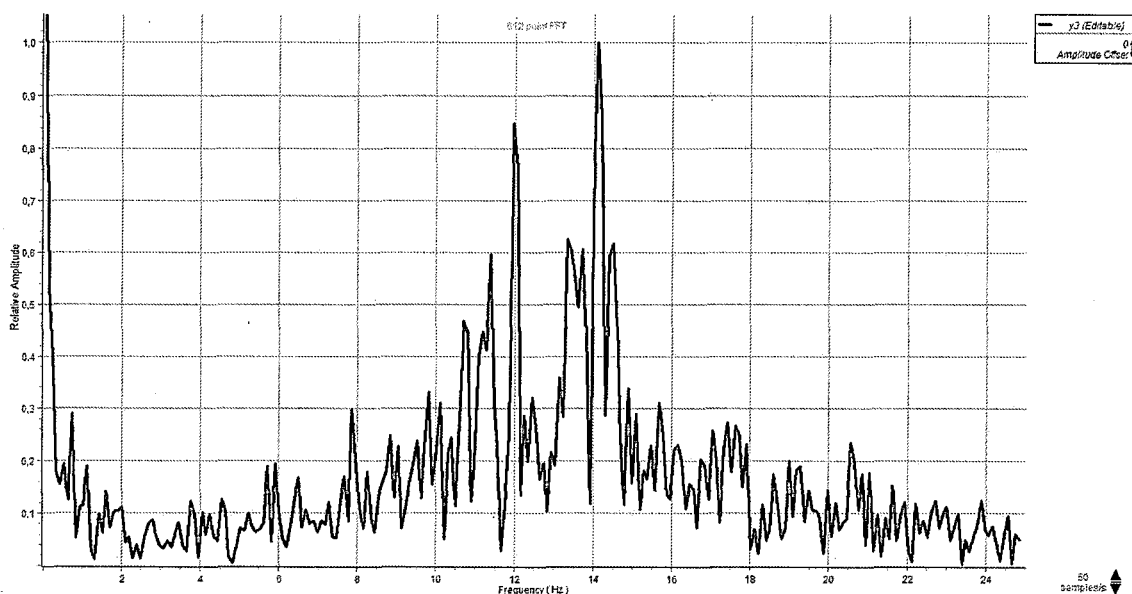
Figura 6. 3: Datos experimentales de fuerza versus tiempo del primer ensayo.



Fuente: Elaborado por el autor.

La nube de puntos experimentales registrados con el sensor de fuerza tienen un comportamiento periódico que representa el empuje en N ewtons del motor pulsorreactor en funci3n del tiempo en segundos, con ayuda del Data Studio utilizamos la herramienta FFT y obtuvimos el grafico del espectro de frecuencias que muestra la amplitud relativa en funci3n de la frecuencia para la señal de fuerza en funci3n del tiempo la cual mostramos a continuaci3n en la figura 6.4, esta figura nos revela que la frecuencia de trabajo del motor pulsorreactor está entre 12 y 14 Hz que son las frecuencias predominantes en el espectro mostrado, esto significa que el motor pulsorreactor construido realiza entre doce y catorce pulsaciones o detonaciones por cada segundo, la frecuencia que se muestra cerca del cero indica el termino promedio del empuje que mencionamos con anterioridad que fue de 22,4 N ewtons.

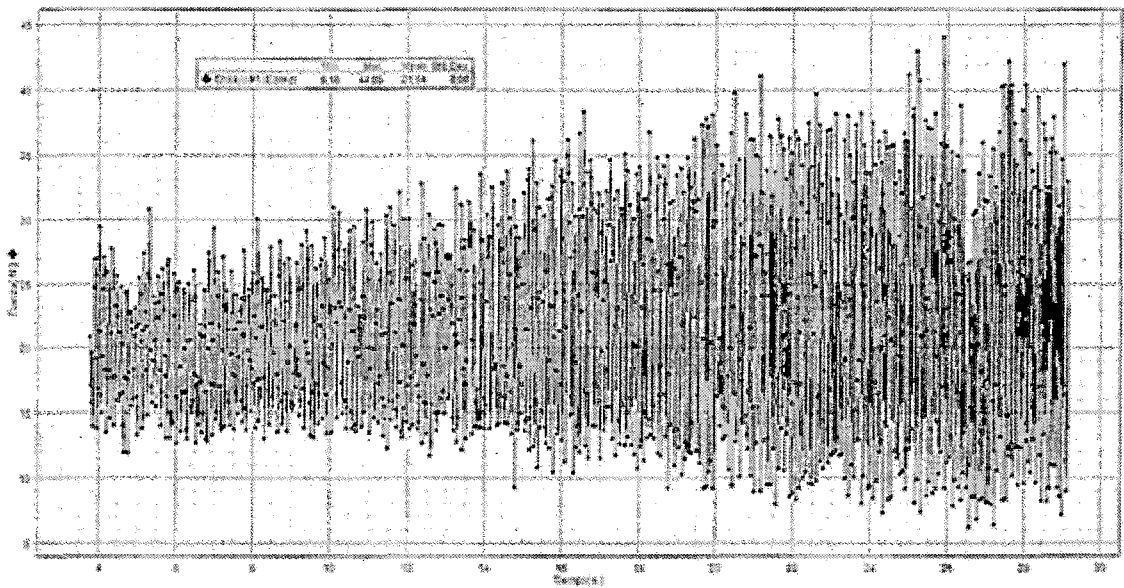
Figura 6. 4: Espectro de frecuencias obtenidas con la FFT del primer ensayo.



Fuente: Elaborado por el autor.

**Segundo ensayo:** Nuevamente utilizamos el sensor de fuerza para obtener información de fuerza (Néwtones) en función del tiempo (segundos) del motor pulsorreactor en funcionamiento que consideramos estable conforme lo mostramos en la figura 6.5, aquí vemos también un comportamiento periódico, lo que nos indica que podemos determinar la frecuencia a la cual están produciéndose los pulsos de detonación o combustión al interior del motor pulsorreactor utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT) disponible en el software Data Studio, para determinar el empuje la información fue previamente filtrada y calculamos con ayuda del software el valor medio del empuje registrado que para este segundo ensayo fue de 21,6 N con una desviación estándar de 8,90 esta desviación estándar nos cuantifica el grado de fluctuación que registra el motor pulsorreactor frente a su valor promedio, que es mayor al observado en el primer ensayo, para este caso nos damos cuenta que conforme transcurre el tiempo la fluctuación aumenta es decir la amplitud aumenta pero también el empuje

Figura 6. 5: Datos experimentales de fuerza versus tiempo del segundo ensayo.



Fuente: Elaborado por el autor.

medio aumenta teniendo una tendencia a un tipo de resonancia, comportamiento perjudicial ya que desestabiliza el sistema haciendo más difícil el control del motor pulsorreactor.

Conforme vemos en la figura 6.5 la información de fuerza versus tiempo presenta un comportamiento periódico generado por los pulsos de detonación del motor pulsorreactor, por lo que esta señal en función del tiempo la pasamos a una señal de amplitud relativa en función de las frecuencias que emiten los pulsos de detonación utilizando la Transformada Rápida de Fourier, que nos muestra el espectro de frecuencias conforme lo vemos en la figura 6.6.

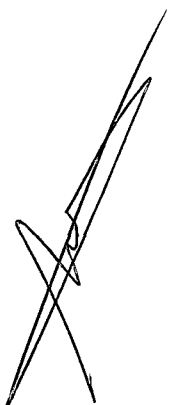
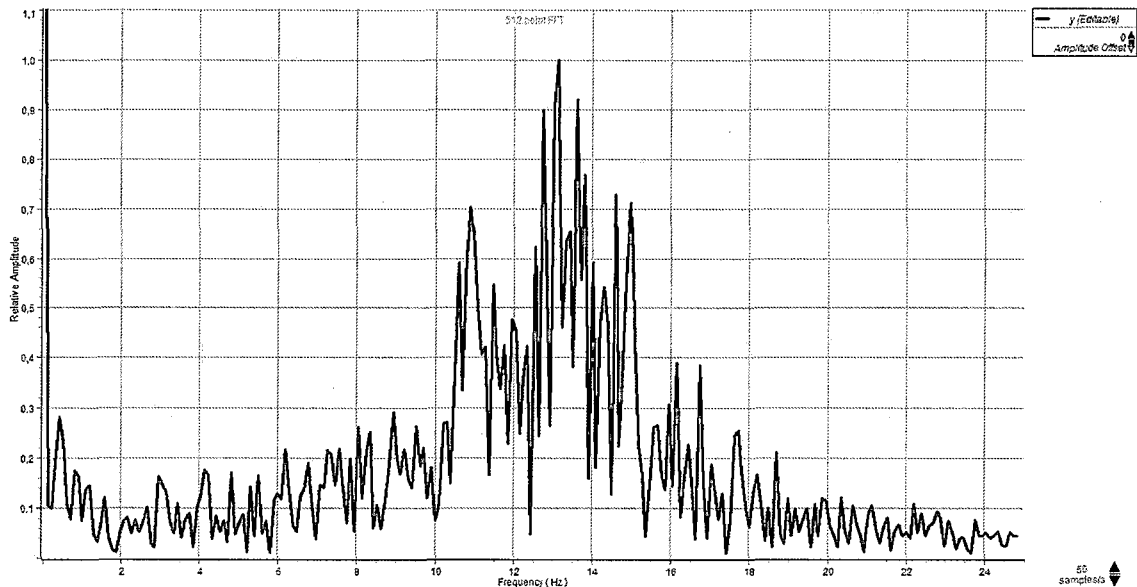


Figura 6. 6: Espectro de frecuencias obtenidas con la FFT del segundo ensayo.

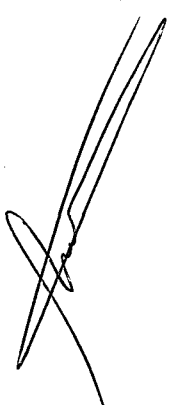


Fuente: Elaborado por el autor.

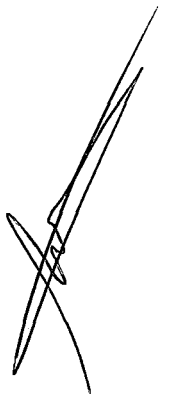
Este espectro de frecuencias obtenido con la FFT nos revela la frecuencia fundamental de trabajo del motor pulsorreactor que está entre los valores de 12 y 14, esto significa que el motor pulsorreactor construido realiza entre doce y catorce pulsaciones o detonaciones por cada segundo.

Estas frecuencias coinciden con las encontradas en el primer ensayo, por lo que establecemos que su frecuencia de trabajo o pulsos que realiza el motor pulsorreactor está entre 12 y 14 pulsos o detonaciones por segundo.

De acuerdo a los empujes encontrados podemos establecer que para este motor pulsorreactor el empuje promedio que produce es de 21,9 N con una desviación estándar de 7,24, lo que equivale a decir que puede levantar una masa de 2,23 kg, esto nos permite establecer en el caso de utilizarlo como sistema de propulsión en un modelo de avión que la estructura más el motor



pulsorreactor tiene como mínimo valor que puede levantar es de este orden y así según el diseño aerodinámico que se realice aumenta la capacidad de carga útil para obtener un desempeño adecuado.



## VII. DISCUSIÓN

La construcción de un motor pulsorreactor y evaluación del empuje como trabajo de investigación permite familiarizarse con los procesos de fabricación y maquinado que se utiliza en la ingeniería, la aplicación de los conceptos básicos de la matemática y procesamiento de señales en la determinación de los pulsos de detonación en la combustión con ayuda de la transformada rápida de Fourier (FFT) además del adiestramiento en la instrumentación electrónica al trabajar en la obtención de los datos con ayuda de sensores y software adecuado para el procesamiento de la información recolectada, al resolver nuestro problema de investigación se nos plantea nuevos problemas de investigación como por ejemplo el de determinar el empuje no a través de una medida directa con el sensor de fuerza sino utilizando las ecuaciones de la termodinámica que tienen que ver con el flujo másico a la entrada y el flujo másico a la salida del pulsorreactor, utilizando para esto un tubo de Venturi, manómetros y piezómetros. Una parte neurálgica de este trabajo de investigación está relacionado con la válvula tipo margarita para cuya construcción se utilizó laminas de acero inoxidable con un espesor de 0,15 mm, estas laminas tienen una vida útil muy reducida debido a la fatiga mecánica y térmica a la que se encuentra sometida, el problema a resolver aquí es de cómo hacer que estas válvulas tipo margarita aumenten su vida útil, a través de tratamientos térmicos o utilizando otros materiales y cuál es el espesor adecuado para un funcionamiento estable del motor pulsorreactor de forma que se evite la resonancia.

La investigación de estos motores sigue vigente a la fecha donde vemos reportes científicos del 2014 donde tratan de mejorar la eficiencia a través de dimensionamiento computarizado del motor

pulsorreactor utilizando para esto la simulación del proceso, también se reportan investigaciones sobre las características geométricas que debe tener la cámara de combustión para lograr una mejor eficiencia donde no solo se puede cambiar la geometría de la misma cámara sino también la geometría del asiento de la válvula con el fin de re direccionar los gases de combustión y así dirigirlos en la dirección que aumente el empuje del motor.

Así mismo otro problema de investigación a plantear es el de la forma de reducir el ruido del funcionamiento del motor pulsorreactor donde se encuentran trabajos sobre modificaciones en la salida de la tobera para reducir el ruido; es importante notar que el pulsorreactor también es utilizado en trabajos de investigación sobre eyectores el cual sirve como fuente de ingreso de los gases en los eyectores.

La dirección que queremos darle a nuestro trabajo de investigación es el de finalmente construir un vehículo aéreo no tripulado (UAVs) que no está muy lejos de lograrlo por la relativa sencillez de construir estos motores pulsorreactores.

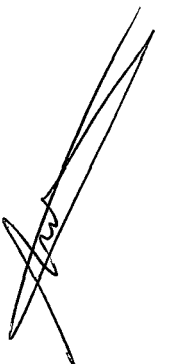
Concluido este trabajo de investigación nos lleva a las siguientes conclusiones:

Construimos un motor pulsorreactor con una longitud de 0,850 m una masa de 2,865 kg en base a los planos de E. Brauner a la cual le hicimos varias modificaciones para mejorar el desempeño.

Determinamos el empuje del motor pulsorreactor que fue de un aproximado de 21.9 Newtons medidos con un el sensor de fuerza.



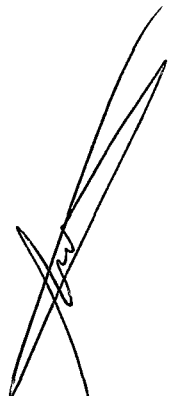
Determinamos la frecuencia de los pulsos de detonación que está en el intervalo de 12-14 hz con ayuda de la transformada Rápida de Fourier aplicada a la información registrada de fuerza versus tiempo.



## VIII. REFERENCIALES

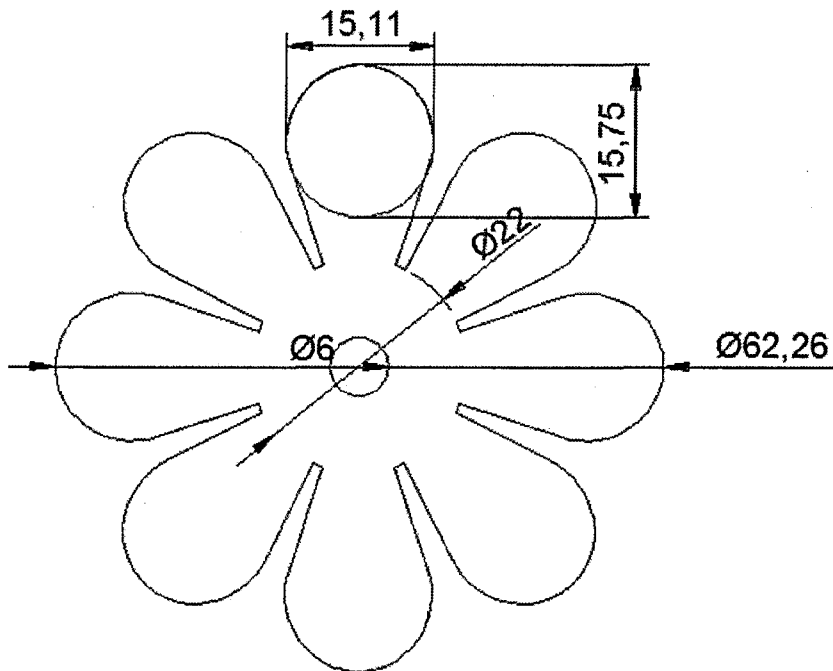
1. Direct Thrust force measurement of pulse detonation engine. **Mazlan A. Wahid, M. Z. Ahimad Faiz y Khalid M. Saqr.** Skudai, Johor, Malaysia: The 4th International Meeting of advances in thermofluids, 2012. 1440.
2. Experimental investigations on Performance of Pulse Detonation Rocket Engine Model . **Li Qiang, Fan Wei, Yan Chuan-Jun, Hu Cheng-qi, Ye Bin.** 20, 2007, Chinese Journal of Aeronautics , pp. 09-14.
3. Pulse Detonation Propulsion: Challenges, Current Status, and Future Perspective . **G.D.Roy, S.M.Frolov, A.A Borisov, D.W. Netzer.** 30, 2004, Progress in Energy and Combustion Science , pp. 545-672.
4. Single pulse detonation study of Natural gas. **M.Z. Ahmad Faiz, A.W. Mazlan, Khalid M.Saqr and U.Haffis.** 2010 , International Conference on Theoretical and Applied Mechanics and the International Conference on Fluid Mechanics and Heat and Mass Transfer, pp. 78-83.
5. Computational Approach in Sizing of Pulsejet Engine. **Mohamed Tarmizi Ahmad, Sevda Ahmadian, Amzari Zhahir, O. K. Ariff and Fairuz I. Romli.** Selangor, Malasia : s.n., 2014, Applied Machanics and Materials, Vol. 629, pp. 131-136.
6. Direct Thrust Force Measurement of Pulse Detonation Engine. **Mazlan A. Wahid, M.Z. Ahimad Faiz, Khalid M. Saqr.** 1440, 2012, American Institute of Physics, pp. 1257-1263.
7. **Willaims Roberts, Andrey Kuznetsov.** [http://www.mae.ncsu.edu/news/article/16442/pulse-jet-research-at-ncsu.](http://www.mae.ncsu.edu/news/article/16442/pulse-jet-research-at-ncsu) [http://www.mae.ncsu.edu/news/article/16442/pulse-jet-research-at-ncsu.](http://www.mae.ncsu.edu/news/article/16442/pulse-jet-research-at-ncsu) [Online] January 2007. [Cited: Junio 18, 2015.]
8. Ejector enhanced pulsejet based pressure gain combustors: an old idea with a new twist. **Daniel E. Paxson, Kevin T. Dougherty.** 213854, Cleveland : s.n., August 2005, American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 1-15.

9. Assessment of the Performance of a Pulsejet and Comparison with a Pulsed - Detonation engine. **Paul J. Litke, Frederick R. Schauer.** Cleveland : s.n., January 2005, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 0228, pp. 1-10.
10. Unsteady ejector performance: an experimental investigation using a pulsejet driver. **Daniel E. Paxson, Jack Wilson, Kevin T. Dougherty.** 21711, Cleveland : s.n., 2002, American Institute of Aeronautic and Astronautics, pp. 1-12.
11. **Yunus A. Cengel, Michael A. Boles.** Termodinamica. Séptima edición. Mexico : Mc Graw Hill, 2011. págs. 525-529. 978-0-07-352932-5.
12. **text, Almed El-Sayed's.** Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines.
13. **S. Frish, A. Timoreva.** Curso de fisica General. [trad.] Manuel Gisbert Talens Antonio Molina Garcia. Moscu : Mir, 1973. págs. 458-465. Vol. I.
14. **Wikipedia.** [https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada\\_r%C3%A1pida\\_de\\_Fourier](https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_r%C3%A1pida_de_Fourier). [https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada\\_r%C3%A1pida\\_de\\_Fourier](https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_r%C3%A1pida_de_Fourier). [En línea] Fundacion Wikipedia, 16 de Junio de 2015. [Citado el: 16 de Junio de 2015.]
15. El segundo bombardeo aéreo de Londres. **Gosling, Peter.** Abril 2005, Revista de la II guerra mundial, pp. 20-24. La traducción fue realizada por el Lic. Nelson Diaz Leiva.
16. Ejector enhanced pulsejet based pressure gain combustors: an old idea with a new twist. **Daniel E. Paxson, Kevin T. Dougherty.** 213854, Cleveland : s.n., August 2005, American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 1-15.



## IX. APENDICE

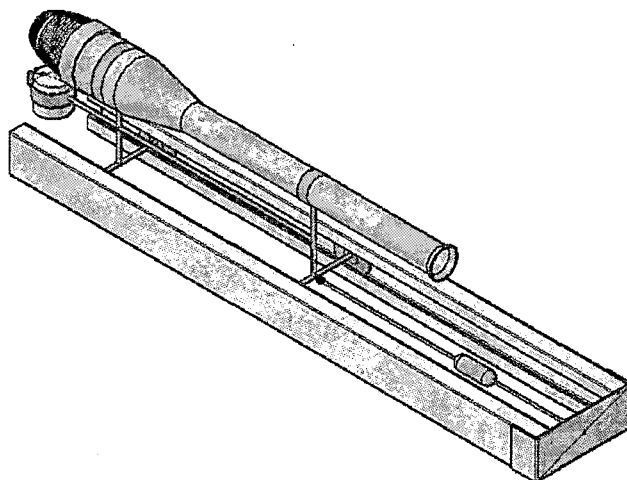
Figura A. 1: Dimensiones de la válvula tipo margarita.



Fuente: Elaborado por el estudiante Angel Yacila Alvarado de Ingeniería en Energía de la Universidad Nacional del Callao

## VISTAS ISOMETRICAS DEL MOTOR PULSORREACTOR

Figura A. 2: Vista isométrica 1 del motor pulsorreactor.



Fuente: Elaborado por el estudiante Angel Yacila Alvarado de Ingeniería en Energía de la Universidad Nacional del Callao.

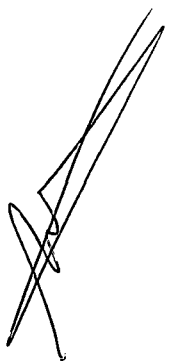
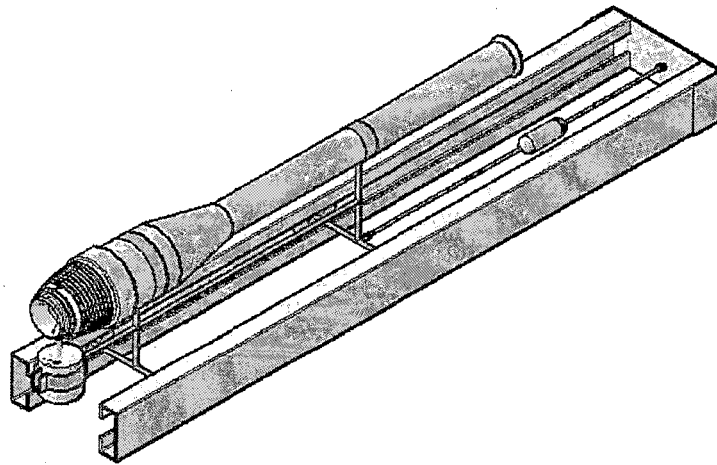
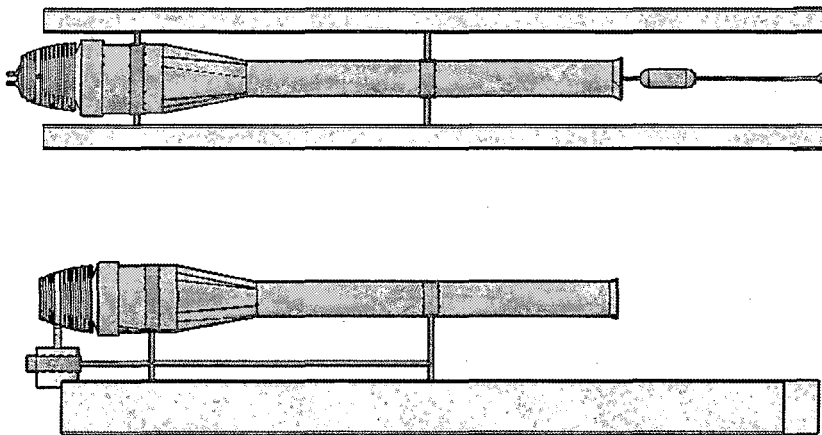


Figura A. 3: Vista isométrica 2 del motor pulsorreactor.



Fuente: Elaborado por el estudiante Angel Yacila Alvarado de Ingeniería en Energía de la Universidad Nacional del Callao.

Figura A. 4: Vista de planta y lateral derecha del motor pulsorreactor.



Fuente: Elaborado por el estudiante Angel Yacila Alvarado de Ingeniería en Energía de la Universidad Nacional del Callao.

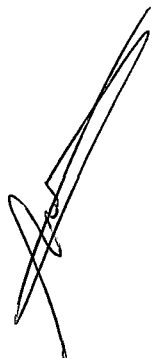
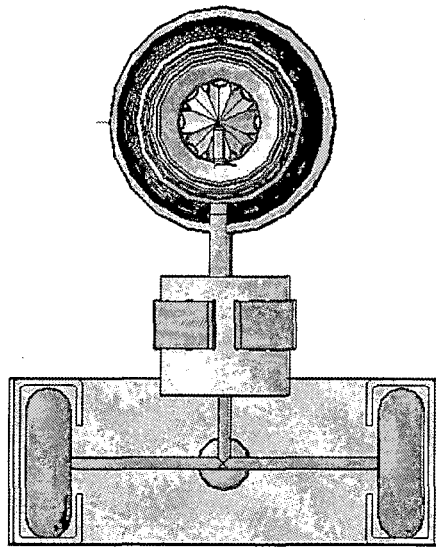
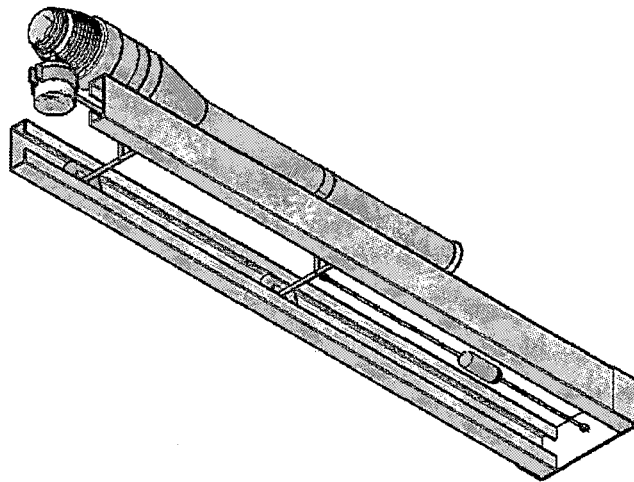


Figura A. 5: Vista frontal del motor pulsorreactor.



Fuente: Elaborado por el estudiante Angel Yacila Alvarado de Ingeniería en Energía de la Universidad Nacional del Callao.

Figura A. 6: Vista isométrica 3 del motor pulsorreactor.



Fuente: Elaborado por el estudiante Angel Yacila Alvarado de Ingeniería en Energía de la Universidad Nacional del Callao.

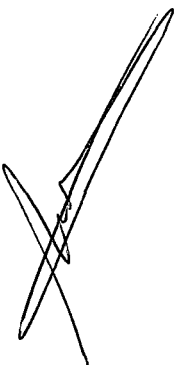
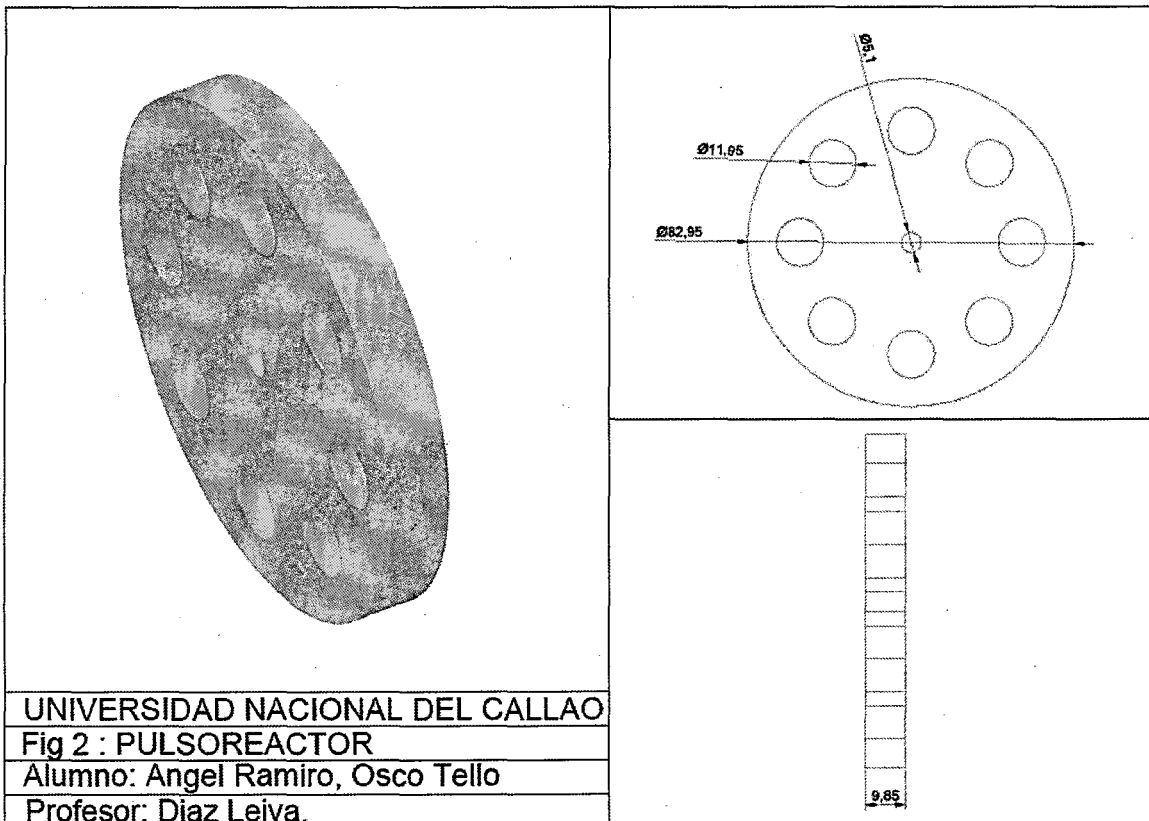
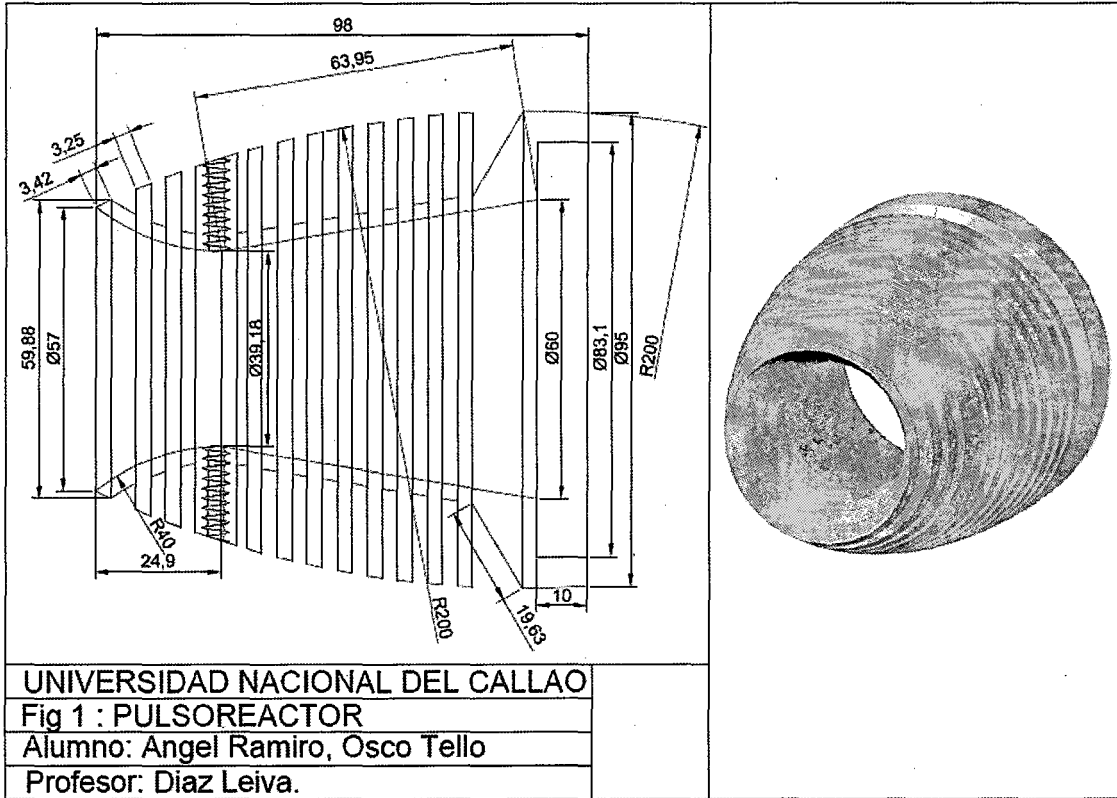
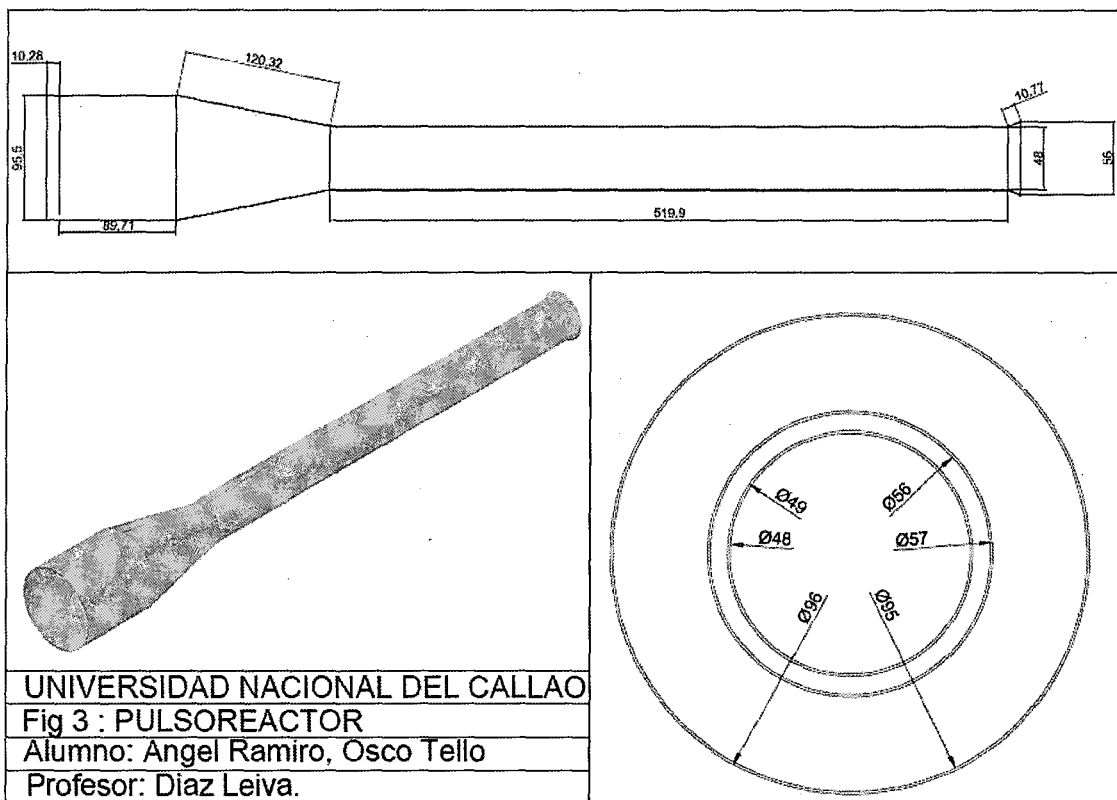
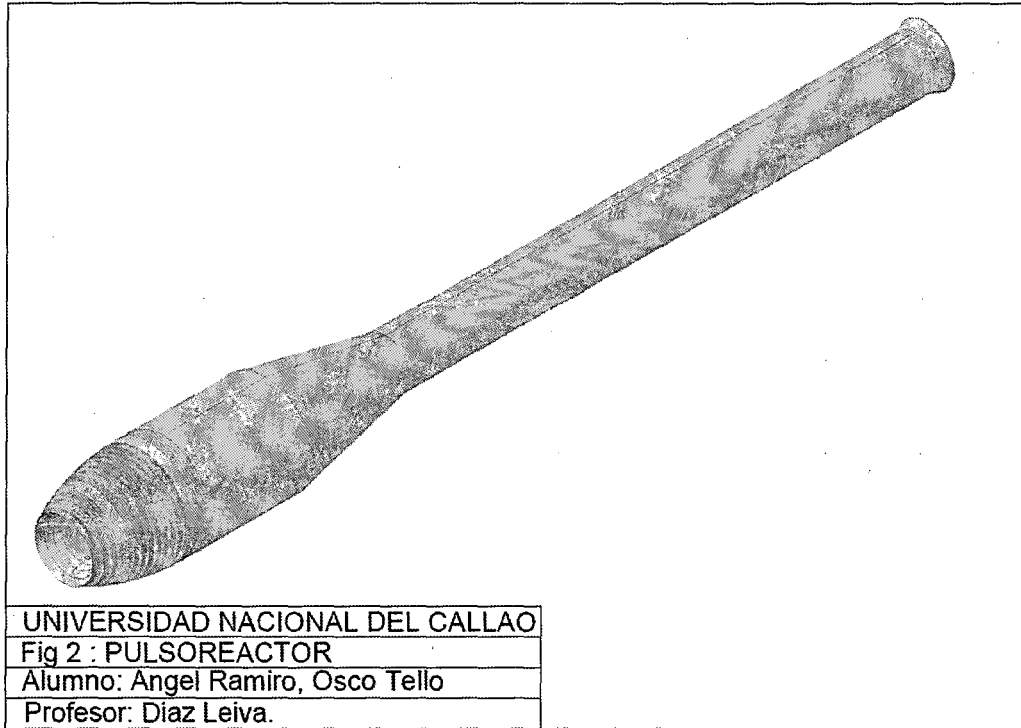


Figura A. 7: Planos del difusor y tabique

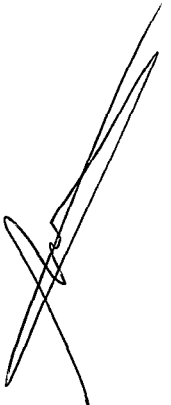


Fuente: Elaborado por el estudiante Angel Ramiro Osco Tella de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Callao

Figura A. 8: Plano de la tobera y tubo de escape.



Fuente: Elaborado por el estudiante Angel Ramiro Osco Tella de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Callao



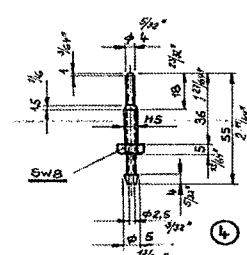
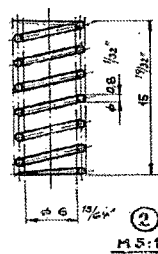
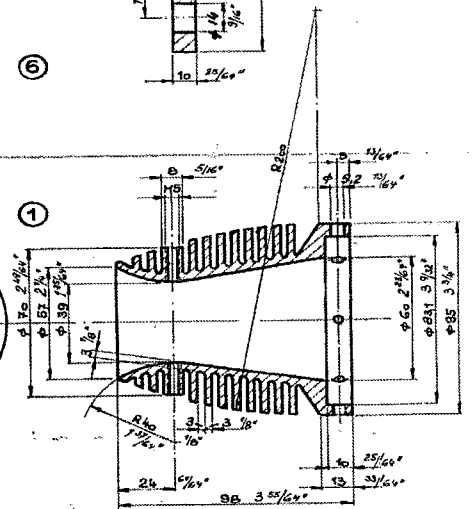
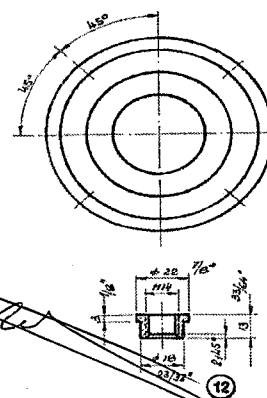
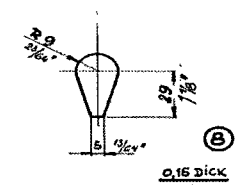
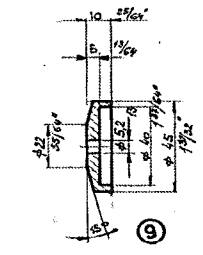
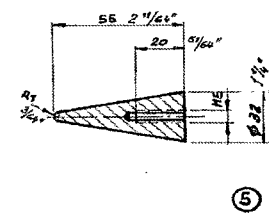
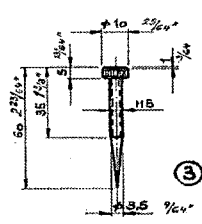
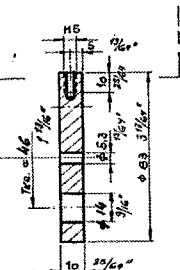
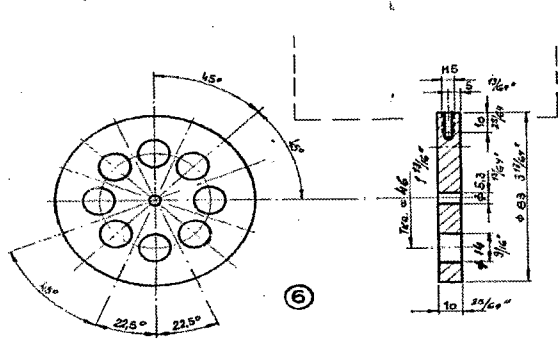
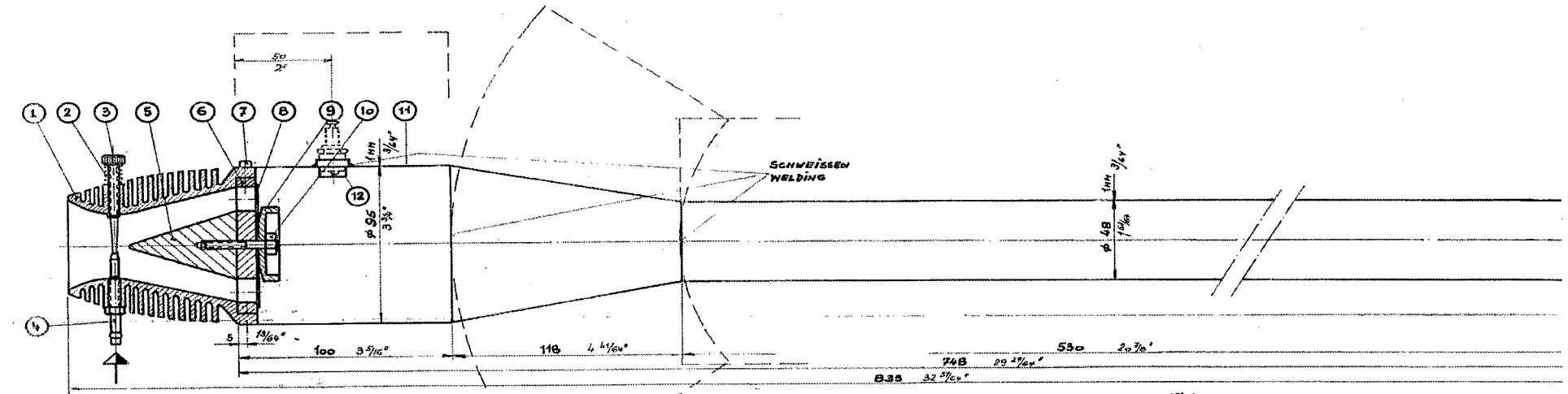


## X. ANEXO

### 10.1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><b>PROBLEMA PRINCIPAL</b></p> <p>¿Cómo construir un motor pulsorreactor con válvulas tipo margarita y evaluar el empuje?</p> <p><b>PROBLEMA ESPECIFICOS</b></p> <p>¿Cómo cosntruir un motor pulsorreactor con válvulas tipo margarita?</p> <p>¿Cómo evaluar el empuje de un motor pulsorreactor con válvulas tipo margarita?</p>	<p><b>GENERAL</b></p> <p>Construir un motor pulsorreactor con válvulas tipo margarita y evaluar el empuje</p> <p><b>ESPECÍFICOS</b></p> <p>Construir un motor pulsorreactor con válvulas tipo margarita</p> <p>Evaluar el empuje de un motor pulsorreactor con válvulas tipo margarita.</p>	<p><b>GENERAL</b></p> <p>En la construcción de un motor pulsorreactor con válvulas tipo margarita y evaluación del empuje haremos uso de los procesos de manufactura de la ingeniería mecánica y usaremos la teoría termodinámica de motores de combustión interna con ayuda de sensores y software.</p> <p><b>ESPECÍFICAS</b></p> <p>En la construcción de un motor pulsorreactor con válvulas tipo margarita haremos uso de los procesos de manufactura de la ingeniería mecánica.</p> <p>En la evaluación del empuje del motor pulsorreactor haremos uso de la teoría termodinámica y utilizaremos sensores y software.</p>	<p><b>Variables Independientes (X):</b></p> <p>Construcción del motor pulsorreactor con válvulas tipo margarita.</p> <p>Evaluación del empuje del motor pulsorreactor.</p> <p><b>Variable Dependiente (Y):</b></p> <p>Motor pulsorreactor con válvulas tipo margarita.</p>	<p>Diseño</p> <p>Fabricación</p> <p>Armado Pruebas</p> <p>Fuerza</p> <p>Funcionamiento</p> <p>Desempeño</p>	<p>Esquemas</p> <p>Planos</p> <p>Piezas fabricadas</p> <p>Funcionamiento del motor</p> <p>Fuerza medido en Newtones con un sensor de fuerza.</p> <p>Funciono</p> <p>No funciono</p>	<p><b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b></p> <p>Aplicada</p> <p><b>DISEÑO DE ESTUDIO</b></p> <p>Experimental</p> <p><b>MÉTODO</b></p> <p>Deductivo</p> <p><b>TECNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN</b></p> <p>Registro de datos</p> <p><b>INSTRUMENTOS</b></p> <p>Máquinas y herramientas de Ingeniería mecánica</p> <p>Software de procesamiento de datos experimentales</p> <p><b>FUENTES</b></p> <p>Artículos científicos</p> <p>Bibliografías</p> <p>Web</p>

# 10.2. ESQUEMA REFERENCIAL DEL MOTOR PULSORREACTOR CONSTRUIDO.



Nr. Stk.	BENENNUNG	NAME	MASS	MATERIAL
12	1	GEWINDBRING	SPARK PLUG Base	22φ 12lg V2A
11	1	SCHUBROHR	THRUST TUBE	1mm 1 V2A
10	1	SCHRAUBE	SCREW	M5 x 30 DIN 912
9	1	ANSCHLAG	TOUCH	φ45 10lg AL.
8	8	FLATTEVENTIL	VALVE	80x15 x 0,15 V2A
7	8	SCHRAUBS	SCREW	M5 x 12 DIN 912
6	1	ZWISCHENWAND	PARTITION	φ83 10lg AL.
5	1	KEGEL	CONE	φ24 55lg AL.
4	1	DÜSENSTÜCK	NOZZLE	6kt. 6W8 53lg HS.
3	1	NADEL	NEEDLE	φ 10 60lg 95 20V
2	1	FEDER	STEEL SPRING	1 x 6 15lg STAHL DEANT
1	1	KORP	HEAD	φ 95 88lg AL.
Nr. Pos.				
			PROPORTION	MATERIAL
			MASS	MATERIAL

**Pulso 1.1**

329 040.5

LÄNGE	LENGTH	833 mm	32 5/16\"
AUßEREN φ	DIAMETER	96 mm	3 25/32\"
GEWICHT	WEIGHT	2,0 kg	4,4 lb.
STANDSCHUB	STATIC THRUST	58-7 Kp	

**KRIZ**

TAG	NAME	MASS	BLATT
DAY	NAME	SCALE	PAGES

811