

DISEÑO DE BANCOS DE ENSAYO PARA PULSOREACTORES Y MOTORES COHETES DE PEQUEÑO EMPUJE DESTINADOS A UAV

Juan F. Martiarena^a, Alejandro Di Bernardi^a, Carlos Scala^b and Elvio A. Heidenreich^{b,c}

^a*Grupo de Ingeniería Aplicada a la Industria, Área Departamental Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina, juanf.martiarena@gmail.com, <http://www.ing.unlp.edu.ar/aeron/>*

^b*Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Técnica, Buenos Aires, Argentina, carloscala@hotmail.com, <http://www.ingenieriaest.iese.edu.ar/>*

^c*Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa, Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina, elvioh@citefa.gov.ar, <http://www.citedef.gob.ar>*

Palabras clave: banco de ensayo, pulsorreactores, cohetes, bajo empuje.

Resumen. Se busca discutir sobre el diseño y desarrollo de un banco de pruebas de motores de bajo empuje que sea versátil para ensayar indistintamente motores pulso-reactores o motores cohetes destinados a la propulsión de UAV dirigidos al adiestramiento integral de las unidades operativas de las fuerzas de defensa.

Para ello se realiza un análisis de pulso-reactores y motores cohetes de bajo empuje, y se seleccionan los principales parámetros que permiten caracterizar el comportamiento de motores de este tipo como por ejemplo: empuje, consumo de combustible, velocidad de gases de escape, flujo másico y temperatura en la cámara de combustión entre otros.

Adicionalmente se presenta análisis de alternativas de instrumentación con indicación de los más adecuados, se plantean alternativas para el desarrollo del banco, se selecciona la más adecuada, y se ejecuta el anteproyecto a modo de diseño preliminar de banco, se definen procedimientos de ensayo y se plantean alternativas de montaje de prototipos.

Básicamente se presentan alternativas de instrumentación y de banco propiamente dicho.

1 INTRODUCCIÓN

Las ejercitaciones de tiro antiaéreo forman parte del adiestramiento integral de las unidades operativas de la Armada Argentina. A fin de satisfacer los diferentes requerimientos de los sistemas de armas en uso, tanto del componente naval como de infantería de marina, se requiere disponer de blancos aéreos telecontrolados.

A tal efecto el objetivo general del proyecto prevee la incorporación de un blanco aéreo autopropulsado no tripulado de bajo costo, a fin de recuperar y mejorar la capacidad de tiro antiaéreo de los buques de la Flota de Mar y de las unidades de Infantería de Marina.

En una primera fase se desarrollará el prototipo, buscando la implementación del modelo básico, el sistema de lanzamiento y control y el sistema de propulsión. A su vez, dentro de esta fase se incluyen distintas etapas, como ser la construcción del prototipo del vehículo, la construcción del motor, ensayo del mismo y la prueba del prototipo.

Otras fases del proyecto consisten en el sistema de lanzamiento, donde se desarrolla el mismo y se define el prototipo operativo, las pruebas de vuelo sobre el mar y la producción del vehículo.

1.1 Descripción de un motor pulsorreactor

El motor pulsorreactor ha tenido una breve pero sorprendente e impactante aplicación durante la Segunda Guerra Mundial, con la aparición de la bomba alemana V-1. Desde ahí, el pulso-reactor ha sido un motor de frustradas expectativas y distintos desarrollos se han llevado a cabo para desarrollar este concepto de propulsión.

El principio de funcionamiento del motor pulsorreactor es sencillo, ya que tiene pocas o ninguna parte móvil. Esencialmente consta de un tubo abierto en uno de los extremos y el otro cerrado mediante válvulas. El diseño adecuado de las válvulas influye en el desempeño general del motor, por lo que este punto se convierte en un aspecto clave en el desarrollo del motor. El porcentaje de sección transversal utilizado para el asiento de las válvulas y la diferencia de presión para la apertura, generan reducción en la carga de aire en la cámara de combustión durante el ciclo de admisión y un contra flujo en el tubo de escape que disminuyen el rendimiento del motor.

Este tipo de motor no requiere la colocación de un compresor, y está dotado con un cabeza inyectora mezcladora en el extremo anterior diseñada para incrementar levemente la presión del aire.

Cuando se inyecta la mezcla de aire/combustible en la cámara de combustión, se inicia la ignición mediante una chispa y se incrementa la presión de modo que las válvulas de entrada se cierran y los gases calientes son descargados. Debido a la inercia de estos gases, se evacua la cámara de combustión permitiendo el ingreso de una mezcla fresca, que se enciende debido a la alta temperatura de los gases residuales. El ciclo se repite con una frecuencia gobernada por la frecuencia de resonancia del tubo de escape del motor.

El ciclo de aire consiste básicamente en la admisión, combustión, expansión y escape. El ciclo que mejor se adapta a esta situación es el ciclo de Lenoir, donde la adición de energía se realiza a volumen constante y la expansión se produce de manera isoentrópica, en el caso ideal.

El pulsorreactor sobre el cual se desarrolla el trabajo se caracteriza por tener un empuje de 20kg, dato que se busca verificar mediante el ensayo.

A los efectos de obtener parámetros de referencia sobre los cuales orientarse, se presenta a continuación una tabla donde se compara el empuje y el consumo de combustible de algunos pulsorreactores.

Estos motores fueron caracterizados por Lockwood ([O'Brien \(June 1974\)](#)) durante una in-

investigación sobre el uso de pulsorretores como sistemas de propulsión sustentadores. Como se puede apreciar en la Tabla 1, según el tipo de configuración se obtiene el consumo para un empuje dado.

Empuje [kg]	Consumo [kg/h]	Diámetro [m]	Longitud [m]
SIMPLE			
2	10	0,61	6,70
1	6	0,61	6,82
8	19	0,70	11,75
10	26	0,83	1,30
MULTIPLE			
6	44	0.61	6.82
4	44	0.61	6.82
16	46	0.70	11.75
21	62	0.83	12.99

Tabla 1: Características de motores pulsorretores de cámara simple y múltiple ensayados por Lockwood.

En la Figura 1 junto con los datos de Lockwood se presenta el punto de operación del motor pulsorreactor objeto de este trabajo.

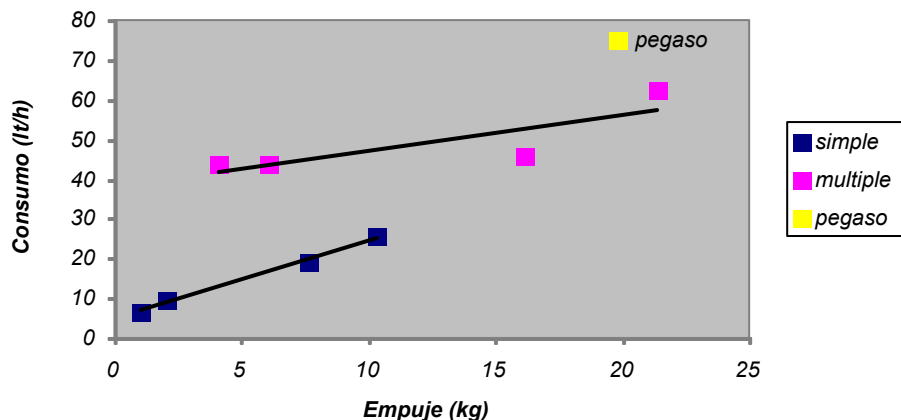


Figura 1: Comparación entre pulsorretores ensayados por Lockwood y Pegaso

Se observa que el punto de operación del pulsorreactor "PEGASO" (Ver Figura 1) se encuentra cercano a la curva de operación de los motores de múltiples cámaras de combustión, aunque para el empuje dado el consumo es mayor al de los motores de tales características.

Sin embargo, este gráfico demuestra que el punto de partida del análisis teórico realizado es correcto. La comparación con motores pulsorretores de mayor empuje no resulta conveniente, ya que los resultados arrojados por los distintos análisis efectuados no permite compararlos claramente.

A fin de verificar preliminarmente el desempeño del motor y que el mismo cumpla con los parámetros previstos, se realizó un análisis termodinámico del ciclo, obteniendo un cálculo estimativo y se verificaron las dimensiones generales del mismo.

1.2 Análisis General Termodinámico

El motor de Lenoir es un motor de dos tiempos sin precompresión. En la primera mitad de la carrera se inyecta la mezcla fresca de aire, en la segunda mitad, las válvulas se cierran y se produce el encendido de la mezcla. Los procesos que tienen lugar en un pulsorreactor, que son los mismos a los que ocurren en un motor de Lenoir, son los siguientes:

- Admisión (0,1)
- Combustión a volumen constante (1,2)
- Expansión isoentrópica de los productos de combustión (2,3)
- Escape a presión constante (3,0')
- Apertura de válvulas y reinicio del ciclo (0',0)

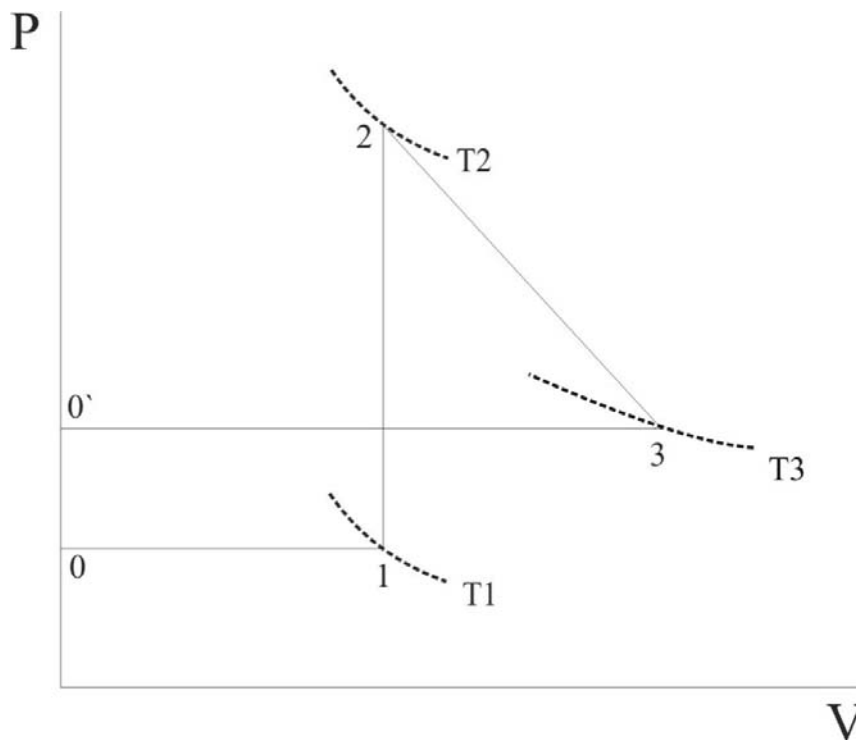


Figura 2: Ciclo de Lenoir

La relación de presiones y temperaturas, desarrollada a partir de la primera ley de la termodinámica, se puede calcular mediante la siguiente expresión

$$\Pi = \frac{\frac{f Q_f}{T_1 C_v} + 1}{1 + f}, \quad (1)$$

donde:

- $f = 0.033$: relación combustible/aire,
- $Q_f = 18850 \text{ btu/lb} = 43805733 \text{ J/kg}$: poder calorífico del combustible,
- $C_v = 0.257 \text{ btu/lb} = 597 \text{ J/kg}$: calor específico a volumen constante,
- $T_1 = 519 \text{ R} = 288 \text{ K}$: temperatura ambiente.

El rendimiento térmico viene dado por

$$\eta_t = 1 - \frac{\gamma \Pi^{\frac{1}{\gamma}} - 1}{\Pi + 1}. \quad (2)$$

La relación de temperaturas antes y después de la combustión es $\frac{T_2}{T_1} = 4.6$. Suponiendo una mezcla estequiométrica y condiciones estándar se resulta una excesiva temperatura de gases de combustión ($T_3 = 2069^\circ C$). Reduciendo la relación combustible/aire ($f = 0.033$), se tiene que la temperatura $T_3 = 1060^\circ C$, la relación de presiones es de 2.25 y el rendimiento térmico del 18%. Con estos datos se puede estimar una velocidad de gases de escape de $w_c = 1764 ft/s = 537 m/s$. El flujo de combustible necesario, para un empuje de $20 kg = 44 lb$ (si utiliza nafta súper).

Para verificar el área de la tobera se considera un coeficiente de empuje C_t , que varía entre 0.25 y 0.35. Sabiendo que

$$C_t = \frac{T}{PS} \quad (3)$$

donde:

- C_t coeficiente de empuje,
- T empuje,
- P presión atmosférica,
- S la superficie transversal

con lo cual obtenemos una seccion de $S = 12 in^2 = 0.007 m^2$, similar a la construida.

Considerando una temperatura media de $600^\circ C$ a lo largo del ciclo, obtenemos una frecuencia de pulsación del motor de $105 Hz$. En la Tabla 2, hemos resumido las características operativas del motor pulsorreactor Pegaso.

Parámetro	Valor característico
Empuje	20Kg
Consumo de Combustible	75l/h
Flujo másico de aire	1.68E6l/h
Frecuencia de combustión	105Hz

Tabla 2: Parámetros característicos del motor.

1.3 Proceso de ondas

La operación apropiada de un pulsorreactor es fuertemente dependiente del proceso de ondas que ocurre durante cada ciclo, y es este proceso más que cualquier otro es el que dictamina la relación entre el diámetro y longitud. El tubo debe ser lo suficientemente largo para permitir el reflejo y el traslado de las ondas a lo largo de toda la longitud y aún tener tiempo para la admisión, la combustión y el escape. Las acciones de las ondas definen la ubicación de la alimentación de combustible y la frecuencia de operación de las válvulas.

Básicamente se identifica el siguiente proceso: en el instante del encendido, dos ondas se generan; una de compresión que se propaga hacia la salida del tubo y una de expansión que se propaga hacia la entrada. La onda de compresión se refleja desde el extremo abierto como una onda de expansión y la onda de expansión se refleja cerrando las válvulas como una onda de

expansión. Las ondas de expansión reflejadas disminuyen la presión en el tubo por debajo de la ambiental, las válvulas se abren y el aire fluye dentro del tubo.

La onda de expansión reflejada como onda de compresión viaja hacia delante, y tiende a disminuir la velocidad del aire de entrada, permitiendo una combustión adecuada. Estas ondas de compresión también cierran las válvulas. Por lo tanto, el tubo de escape es esencial en la operación apropiada de un pulso-reactor. En la Figura 3 se muestra el proceso de admisión y escape de un pulso-reactor.

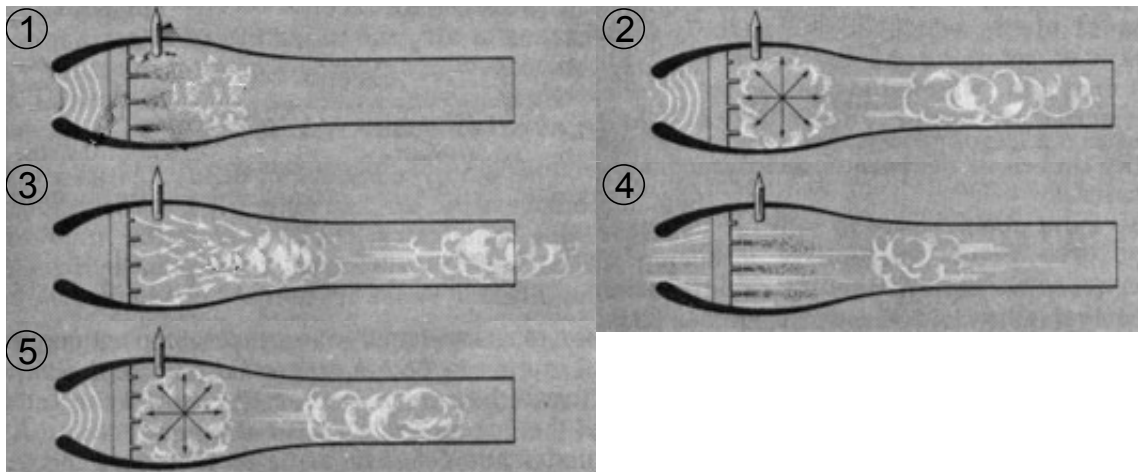


Figura 3: Admisión y escape en un pulso-reactor

1.4 El mecanismo de encendido

Numerosos trabajos han sido presentados para explicar el mecanismo de encendido en pulso-reactores. El resultado de estos subyace en que el encendido se origina con la presencia de gases residuales calientes, que mantienen el proceso de combustión.

La operación automática para tasas bajas de inyección de combustible no genera problemas en cuanto a mantener el frente de llama. De todas maneras, el incremento en el flujo de combustible resulta en elevadas presiones, a partir de donde la operación se vuelve errática y el motor no puede operar sin el encendido a chispa.

De este fenómeno es que se desprende que los gases residuales deben estar presentes durante la fase de admisión para producir encendido automático y mantener la operación continua. Como la presión aumenta a medida que aumenta la inyección de combustible, la velocidad del flujo de entrada aumenta y eventualmente excede la velocidad de reacción y se apaga el motor debido a que la llama no puede propagarse lo suficientemente rápido para sostener la combustión en la cámara. El frente de llama se desestabiliza y la combustión cesa. De aquí se concluye que algún tipo de mantenedor de llama es necesario, particularmente a altas amplitudes de presión ([Manganiello \(1945\)](#); [Bressman \(1945a,b\)](#); [Laboratory](#)).

2 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE PARÁMETROS A MEDIR

Para seleccionar los parámetros a medir y seleccionar los instrumentos adecuados deben analizarse las prestaciones que se buscan con el banco. Los instrumentos de medida son capaces de suplir las deficiencias propias y cuantificar de forma sistemática lo que el hombre no es capaz de ver.

Básicamente, hay dos métodos para la realización de la medición: de forma directa e indirecta. Se entiende por medición directa aquella medición en la que se compara de manera directa el mensurando con un parámetro estandarizado. Por ejemplo, dentro de las mediciones directas puede citarse la medida de longitud de una barra a través de la comparación con una regla estandarizada. La medición indirecta utiliza un dispositivo transductor conectado a una serie de aparatos que constituyen el sistema de medición. Esta serie de dispositivos convierten la forma básica de la entrada en una forma analógica o digital, la procesan y luego es presentada a la salida de manera inteligible para el usuario.

El sistema de medición generalmente consta de 3 etapas: etapa de sensado-transducción, etapa de acondicionamiento de la señal y etapa de lectura-grabación de los datos (Beckwith (August 17, 2006); M. A. Perez (2004)). En la Figura 4 se esquematiza el proceso de medición.

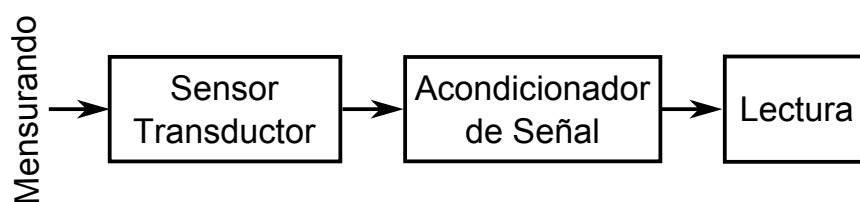


Figura 4: Proceso de medición

2.1 Instrumentación

A continuación se analizan los parámetros a medir y los métodos a utilizar para la medición de cada uno de ellos, considerando las ventajas y desventajas de cada uno para cada aplicación. Eventualmente, las dificultades que presente cada uno, tanto técnicas como económicas, son consideradas como aspecto fundamental en la decisión de medición o no de los mismos.

Empuje

El empuje es el parámetro característico de los motores a reacción. El conocimiento del mismo es fundamental para determinar el funcionamiento global del sistema y en la determinación de las características de performance de las aeronaves.

Para la medición del empuje, como para la medición de cualquier tipo de fuerza, se utilizan instrumentos cuyo principio de funcionamiento es la deformación de un patrón conocido la cual es proporcional a la fuerza.

Dentro de las alternativas analizadas para la medición del empuje se encuentran las siguientes:

- **Dinamómetro:** es un instrumento utilizado para medir fuerzas, cuyo principio de funcionamiento se basa en un resorte elástico cuyas deformaciones son proporcionales a la fuerza aplicada. La deformación se indica sobre una escala graduada o mediante algún dispositivo de interpretación electrónica. Es de fácil implementación, aunque la lectura de los resultados se dificulta ya que debe hacerse en donde se coloca. Además, dada la naturaleza fluctuante del empuje en el pulso-reactor, este instrumento no resulta adecuado para la medición de empuje.
- **Celda de carga:** es una pieza mecanizada con configuración variada, diseñadas de forma que en algunas partes de su estructura la fuerza aplicada se transforma en una deformación proporcional medida con *strain gages*. El rango de utilización es muy amplio, con un

rango que va desde algunos gramos hasta toneladas. La selección de las celdas se hace en función de varios parámetros, como ser el lugar en el que se ubica, el tipo de trabajo al que será sometida y las características estáticas y dinámicas de las mismas. Los *strain gages* pueden ser del tipo resistivo, capacitivo, inductivo o fotoeléctrico. Desde ya que el tipo resistivo es el más utilizado, principalmente por sus óptimas características de peso y dimensiones.

Consumo de combustible

Dado que el vehículo aéreo desarrollado será utilizado como blanco aéreo descartable, es de esperar que el consumo de combustible durante el tiempo de operación del mismo sea bajo, con el fin de disminuir los costos de operación y facilitar las prácticas para las cuales se destina. La medición del consumo de combustible permite asociarle un empuje, y obtener las curvas de consumo contra empuje, indicando en ellas los puntos de máximo empuje y mayor rendimiento. La medición de consumo de combustible puede realizarse de manera sencilla implementando la utilización de un recipiente graduado y tomando mediante un cronómetro el tiempo que tarda en descargar un volumen conocido de líquido.

Flujo másico de aire

El flujo másico es determinante en las características de performance del motor. La medición de este parámetro permite analizar la ecuación básica de performance junto con el empuje y la velocidad de gases y obtener una idea más acabada del rendimiento general del dispositivo.

Además, permite obtener datos para completar las curvas características del motor, como ser la relación combustible/aire contra el empuje. El fluido que circula es aire atmosférico en condiciones estándar, por lo que en un principio la medición del flujo mediante los elementos adecuados no presenta mayores problemas. Para medir el flujo másico de aire que ingresa al motor se presentan dos alternativas.

- **Rotámetro:** que es un instrumento que consta esencialmente de dos partes: un flotador y un tubo cónico truncado donde el flotador es libre de moverse.
- Alternativamente, se presenta como método de medición indirecta el de la medición de la velocidad por medio de un tubo pitot-estático. Conociendo la velocidad puede calcularse el flujo másico de aire. El tubo debe colocarse en el plano de entrada del motor, de modo de obtener las medidas de manera adecuada.

Velocidad de gases de escape

El conocimiento de la velocidad de los gases de escape es un factor que sirve para determinar de manera indirecta el flujo másico y permite evaluar posibles modificaciones para el incremento del empuje. La medición de la velocidad en los gases de escape resulta dificultosa, aunque es conveniente destacar que existen métodos adecuado para realizarla. La utilización de una placa rectangular permite obtener una medida de la presión dinámica de la corriente de aire que sale del motor y relacionarla con el ángulo de ataque que forma respecto a la corriente que embiste a la misma. Este método es sensible a las oscilaciones presentes a la salida del tubo de escape por lo que se dificulta la medición de la velocidad promedio de salida.

Presión en cámara de combustión

Una de las características del motor pulsorreactor es que la relación de presiones de trabajo entre la entrada y la salida es baja. El conocimiento de esta relación permite analizar el proceso

de combustión y la performance del motor. La medición de la presión en la cámara de combustión mediante métodos convencionales, como un manómetro, es impracticable, dadas las elevadas temperaturas que allí se desarrollan. Otro factor limitante es la fluctuación constante en el valor de la presión. Bajo estas condiciones, la utilización de algún dispositivo piezoeléctrico o capacitivo resistente a altas temperaturas puede ser un método viable desde el punto de vista técnico, aunque excede los alcances del proyecto.

En este tipo de dispositivos, la presión se sensa a partir de la carga eléctrica que aparece en el material piezoeléctrico o a partir de la variación en la capacidad eléctrica del dispositivo utilizado.

Temperatura en cámara de combustión

A los fines de obtener más información para analizar el proceso de combustión y determinar las condiciones de trabajo de los materiales de la cámara de combustión se mide la temperatura en la misma. La máxima temperatura que se alcanza en la cámara de combustión es un factor limitante en el diseño, y depende de múltiples factores que pueden ser controlados. La medición de temperatura se hace de manera indirecta, ya que la comparación con una temperatura de referencia se dificulta. Las técnicas propuestas para la medición de la temperatura en la cámara de combustión son las que se basan en termocuplas y en pirómetros ópticos.

La utilización de un pirómetro óptico no necesita de ninguna adaptación sobre el motor, por lo que se convierte en la alternativa más práctica para la medición de la temperatura.

Temperatura de gases de escape

La temperatura de gases de escape permite establecer una relación entre los gases de entrada y salida, y también una idea del rendimiento de la combustión. De la misma manera que se dificulta la velocidad de gases de escape, la medición en la temperatura resulta desde el punto de vista práctico algo difícil. Eventualmente puede utilizarse alguna termocupla, colocada de manera adecuada a la salida del tubo de escape del pulso-reactor. En la Tabla 3 se resumen los elementos de medición, junto a la fiabilidad que presenta cada uno y la factibilidad de implementación de cada uno de ellos en virtud de lo expuesto anteriormente.

Elemento de Medición	Parámetro de Medición	Rango de Medición	Factibilidad
Celda de Carga	Empuje	0-100 kg.	alta
Recipiente Graduado	Consumo	0-2 l	alta
Placa Rectangular	Velocidad gases de escape	0-20 m/s	alta
Piezoeléctrico/capacitivo	Presión en Cámara	0-150 Pa	baja
Rotámetro/Pitot-estática	Flujo másico	0-400 l/s	media
Termocupla	Temperatura gases de escape	0-1400 K	alta
Pirómetro Óptico	Temperatura en Cámara	0-1400 K	alta

Tabla 3: Resumen.

3 RESULTADOS: ALTERNATIVAS PARA EL DESARROLLO DEL BANCO.

El banco de ensayo es un elemento donde se coloca el motor para su ensayo y caracterización. Para el diseño y desarrollo del mismo se evaluaron diferentes alternativas, en cuanto a la forma de ubicación del motor, la estructura de la bancada del banco, la disponibilidad de recursos para la construcción, etc. Se seleccionó la alternativa de manera que se puedan ir integrando los distintos instrumentos de manera independiente, alcanzando un diseño mínimo de

operación sobre el cual se puedan ir incorporando las novedades. Este método permite poner en funcionamiento de manera rápida el banco para obtener algunos datos principales, e ir materializando sucesivamente las distintas alternativas de instrumentación manteniendo la operatividad del banco.

El banco de pruebas está constituido por una bancada donde se aloja el motor pulsorreactor, los elementos de medición de parámetros conjuntamente con los elementos de registro de los mismos y un lugar adecuado para la instalación del mismo.

Desde el punto de vista estructural el banco debe ser rígido, de manera de tolerar las cargas generadas por el motor, y debe tener un grado de libertad sobre el eje longitudinal a los efectos de poder instalar el sistema de medición de empuje.

3.1 Diseño de alternativas para el desarrollo del banco

La variable más sensible que permite alterar de manera notable el desarrollo de un banco de pruebas de este tipo es el tipo de bancada que se utiliza. Por este motivo, en primer lugar se presentan las variantes para el desarrollo de la bancada, y luego se muestran las alternativas de instrumentación que son comunes a las distintas variantes. La bancada puede alojar el motor de diversas maneras. Si se coloca el motor vertical el escape puede ir hacia arriba o hacia abajo. Esta configuración presenta algunas dificultades operativas, sobre todo en la etapa de encendido donde hay que suministrar un flujo de aire para el establecimiento del frente de llama mediante algún elemento accesorio. La configuración horizontal es quizás la más práctica y es la elegida para el prediseño del banco.

Resuelta la disposición del motor en la bancada se presenta una alternativa para la construcción de la misma, que consiste en un marco que oficia de base soldado a otro perpendicular vinculado al primero con un par de montantes. Sobre el marco base, se coloca una placa con dos ejes que guían el deslizamiento entre el motor y el banco. En la Figura 5 se puede ver el esquema de la bancada.

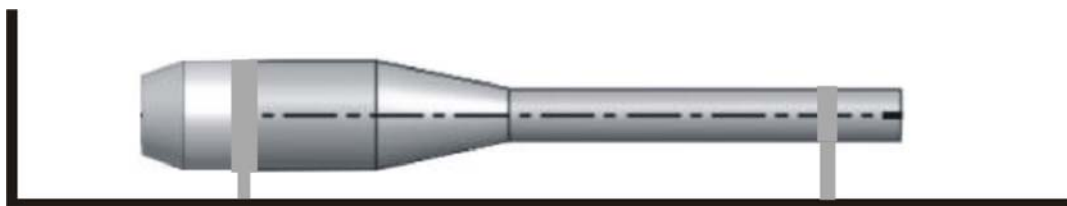


Figura 5: Alternativa de montaje

Los perfiles colocados longitudinalmente son la guía sobre la que rueda un eje que contiene fija la mesa deslizante del pulsorreactor, y sobre el cual se vincula la bancada con la celda de carga utilizada para medir el empuje.

En cuanto a los materiales de utilización para la construcción de la bancada se puede utilizar aluminio o algún otro perfil metálico. Como las cargas a las que se somete la bancada son bajas, el diseño estructural de la misma no es un elemento crítico.

Para vincular el motor con la bancada existen diversas alternativas. Este problema no resulta en algo trascendental para el desarrollo del banco, pero la evaluación de las diferentes opciones permite seleccionar la de menor dificultad constructiva.

Se selecciona la alternativa de atornillar los soportes del motor a la placa deslizante, resolviendo además la excentricidad en la aplicación del empuje respecto al centro de gravedad.

A su vez, la bancada debe sujetarse a un basamento preparado para absorber las cargas durante el ensayo. Para este fin se colocaran 4 bulones a través de los agujeros pasantes realizados para tal fin.

Esta variante debe ser construida desde el inicio, considerando la disponibilidad de recursos asociada al desarrollo de la misma en la toma de decisiones.

Por lo tanto, se propone diseñar un banco cuya base sea una estructura metálica como la descrita y que el montaje del motor se realice sobre una cama deslizante vinculada a la bancada. Esta propuesta resuelve las dificultades en cuanto al montaje presentadas y permite trasladar el mismo según las necesidades.

3.2 Instrumentación del banco

La colocación de los instrumentos de medición es otro aspecto a abordar en el desarrollo del banco. Una vez seleccionados los parámetros a medir y los instrumentos a utilizar, corresponde definir de qué manera se integrarán los mismos al banco.

Medición de Empuje

La instalación de la celda de carga en el banco debe resultar sencilla, ya que será un elemento que se colocará para el desarrollo de los ensayos. Existen distintas alternativas para su montaje. La celda de carga se coloca entre la cama que soporta el motor y la bancada, mediante un elemento roscado de acuerdo a las especificaciones de la celda. En la Figura 6 se ilustra el montaje.

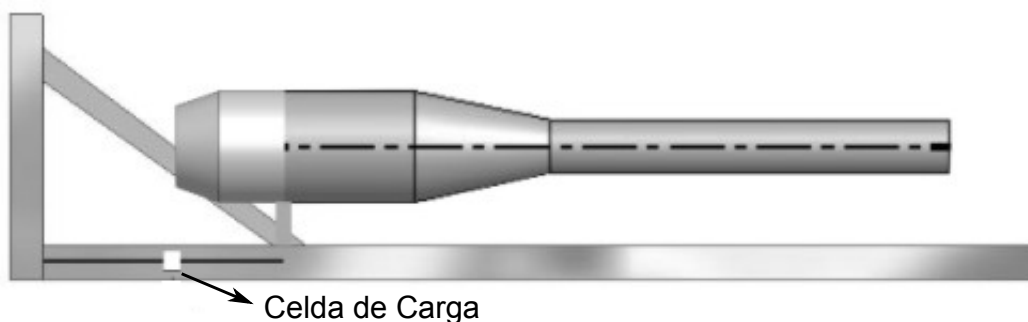


Figura 6: Colocación de la celda de carga

Medición de Temperatura

Dado que para la medición de la temperatura en la cámara de combustión se utilizará un pirómetro óptico, este elemento podría considerarse que no pertenece al sistema, y que resulta accesorio. Por lo tanto, para la integración del sistema de medición de temperatura no existen mayores dificultades.

Medición de Consumo

En primer lugar, se ubica entre el tanque de combustible y el inyector de combustible, que inyecta combustible por la boca del motor. Se comunica con el tanque y el inyector mediante mangueras, lo que permite pensar una configuración en la que el flujo de combustible sea vertical, con el recipiente graduado separado del motor una distancia adecuada para la seguridad de quien opera el banco. En la Figura 7 hay un esquema que aclara la propuesta.

Medición de velocidad de gases de escape

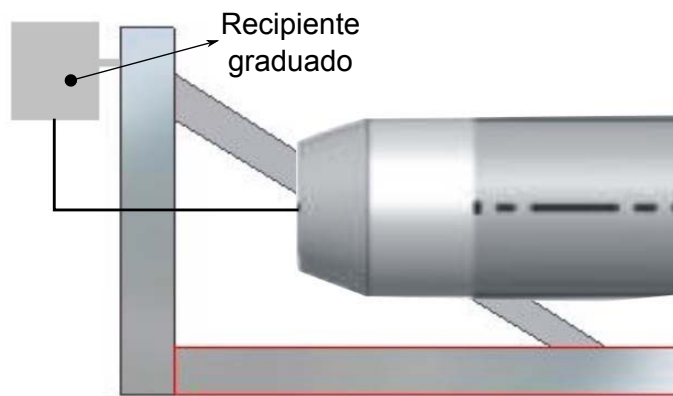


Figura 7: Ubicación del recipiente graduado

Para la medición de velocidad de gases de escape se utilizará una placa rectangular con las características especificadas en la Figura 8, está se encuentra disponible en el Departamento de Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería UNLP.

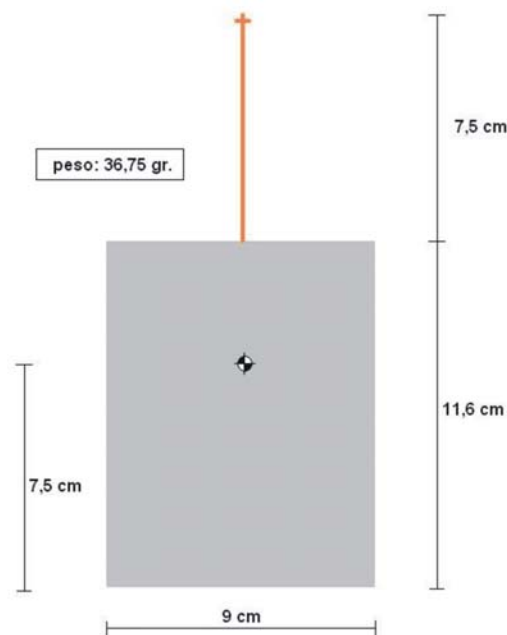


Figura 8: Placa para la medición de velocidad de gases de escape

La placa se colocará de manera que la corriente de aire caliente que sale a través del tubo de escape incida sobre ella. Para esto se prevee la implementación de un elemento de fijación que permita cumplir este objetivo. Además, en la articulación entre la placa y el elemento de fijación se colocará solidario a la primera un potenciómetro para la medición del ángulo.

Medición de flujo de aire

Debido a que el perfil de velocidades en la entrada no es constante, resulta conveniente obtener datos de presión en distintos puntos de la entrada. Por lo tanto, se recomienda instalar el tubo pitot de modo que pueda variarse la altura respecto al eje central del motor y obtener datos en por lo menos 3 puntos de la entrada de aire, para luego a partir de un análisis estadístico obtener un valor de velocidad promedio que permita calcular el flujo másico. De esta manera,

los resultados obtenidos son más precisos que si la medición se realizara en un solo punto. En la Figura 9 se ve un esquema que aclara los puntos en donde se deben tomar las mediciones.

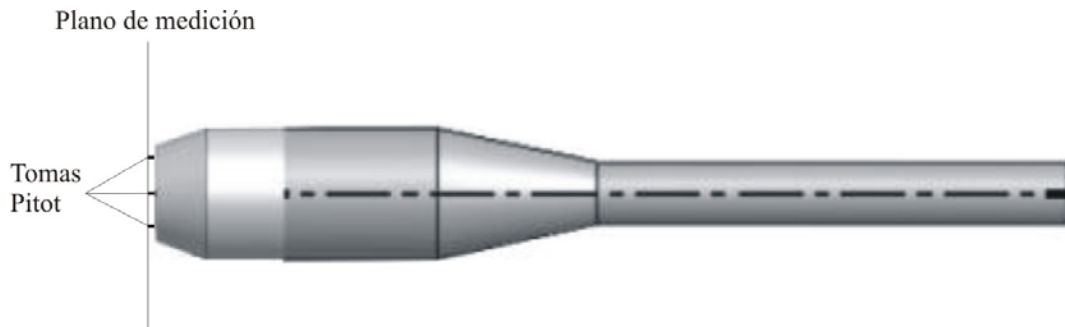


Figura 9: Ubicación de las tomas pitot

Medición de presión en cámara de combustión

La primera variante para la obtención de datos de presión dentro de la cámara de combustión es la que consiste en realizar la medición mediante un sensor piezoeléctrico termorresistente colocado dentro de la cámara. Para la colocación del mismo se debe practicar un orificio en la cámara de combustión de acuerdo a las especificaciones del instrumento. En la Figura 10 se muestra el lugar para la realización del orificio donde debe montarse el sensor.

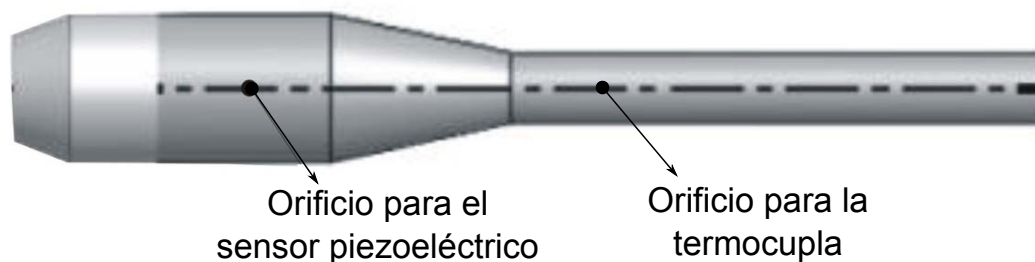


Figura 10: Colocación del sensor piezoeléctrico y termocupla

El sensor capacitivo resulta ventajoso comparado con el piezoeléctrico en cuanto a que las temperaturas de operación son mayores. Para esto se utiliza un diafragma de carburo de silicio sobre un sustrato de silicio, entre los que se forma una cápsula aislada. El efecto de la presión deforma el diafragma y varía la capacidad del conjunto, con lo que se obtiene la medida de la presión (Du). Además, se puede realizar un esquema de transmisión inalámbrica de datos desde el sensor hacia el acondicionador de señal de manera de mejorar la seguridad en la medición y evitar la realización de orificios en la cámara de combustión.

Medición de Temperatura de gases de escape

La medición de la temperatura de gases de escape se llevará a cabo mediante una termocupla tipo K, dadas las condiciones operativas en las que se encontrará alojado el elemento de medición. Para el montaje del instrumento se prevee la realización de un orificio en el tubo de escape (Ver Figura 10). Si se desea obtener el perfil de temperaturas a lo largo del tubo de escape, pueden realizarse orificios a lo largo del tubo de modo de medir en distintos puntos.

4 CONCLUSIONES

En virtud de lo desarrollado en el trabajo presente, se demuestra que es posible la construcción de un banco de pruebas para un motor pulsorreactor de hasta 30 kg de empuje en las instalaciones del Área Departamental Aeronáutica. La instrumentación propuesta se encuentra dentro del alcance técnico y económico tanto del Área Departamental como de la Dirección General de Material Naval de la Armada, por lo que la construcción del banco es factible. Por lo tanto se concluye que se puede construir un banco de pruebas trasladable, donde el motor se apoye sobre la cama deslizante y en el que se pueda medir empuje utilizando una celda de carga, consumo de combustible por medio de un recipiente graduado, flujo másico de aire mediante la implementación de tomas pitot-estática, temperatura de cámara de combustión con un pirómetro óptico, temperatura de gases de escape utilizando termocuplas, presión en cámara de combustión mediante un dispositivo capacitivo y velocidad de gases de escape por medio de una placa rectangular. A su vez, el método de desarrollo propuesto de construcción en etapas a partir de un mínimo operativo es adecuado en función de los intereses del proyecto "PEGASO", en el sentido de que permite caracterizar rápidamente el parámetro fundamental de los motores a reacción, el empuje, y optimizarlo en función de las necesidades.

BIBLIOGRAFÍA

- Beckwith Marangoni L. *Mechanical Measurements (6th edition)*. Prentice Hall, August 17, 2006.
- Bressman. Effect of a low loss air valve on performance on 22-inches-diameter pulsejet engine. Technical Report, NACA, 1945a.
- Bressman M. Tests of air valves for intermittent-jet engines at speeds of 20 and 25 cycles per second. Technical Report, NACA, 1945b.
- Du Young Z.K. Single cristal sic capacitive pressure sensor at 400°C. Technical Report, EECS Department, Case Western Reserve University Cleveland, Ohio, 2003.
- Laboratory G.A. Jet propulsión, air technical service command. Technical Report, California Institute of Technology, Pasadena., 1946
- M. A. Perez J.C.R. *Instrumentación Electrónica*. Editorial Thomson, 2004.
- Manganiello Valerino E. Sea level performance tests of a 22 inch-diameter pulsejet engine at various simulated ram pressure. Technical Report, NACA, 1945.
- O'Brien. *The Pulsejet Engine A review of its development potential*. Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, June 1974.