

Diseño y construcción de una tobera aplicada al sistema de control de reacción basado en gas frío adaptada al vacío

E.A. Jara, P. M. Mantelli, T. Berón, J. S. Delnero, J. Marañón Di Leo

UIDET- LaCLyFA – Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería, La Plata, Argentina.
eze.a.jara@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se plantea el diseño, la fabricación y el ensayo de un prototipo de tobera de Laval para un sistema propulsor RCS, donde la misma opera en condición de adaptada a una altura de presión de 100 km. Se siguen las pautas generales de diseño presentes en la bibliografía con sus hipótesis e idealizaciones del flujo. Para poder ensayar y evaluar su performance se establece una atmósfera controlada en el interior de un tanque mediante bombas de vacío. Además, se construye un banco para medir el empuje generado, su diseño debe contemplar las restricciones geométricas que implican su instalación en el interior del tanque donde se genera la atmósfera controlada.

Palabras claves: RCS, CGPS, TOBERA, LAVAL, SLA

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas RCS, “sistema de control de reacción” proveniente de sus siglas en inglés, son subsistemas que conforman al sistema de control de actitud general del vehículo, consta de un mecanismo de acción automático, y es utilizado en lanzadores, satélites y otros vehículos espaciales. Estos sistemas le ofrecen al vehículo la estabilidad en su trayectoria seleccionada o el reposicionamiento de esta. Esta acción de control puede realizarse de diferentes formas, en este trabajo se analiza la denominada CGPS (Cold Gas Propulsión System), la cual es un sistema que utiliza una inyección de gas frío para generar un empuje requerido para la acción de control.

Un CGPS se encuentra compuesto por un tanque o acumulador de gas, válvulas ON/OFF, encargadas de comandar los disparos por las toberas que producen el empuje al liberar el gas y una tobera, encargada de liberar los gases y producir el empuje.

Este informe resulta ser la continuación del trabajo presentando en [6]. En dicho informe se plantea el diseño, la fabricación y el ensayo de un prototipo de tobera de Laval adaptada a nivel del mar para un sistema propulsor RCS. Se siguen las mismas pautas generales de diseño presentes en la referencia [6] teniendo en cuenta que en este informe la tobera se adapta a una altitud de 100 km.

A lo largo de este trabajo se establece y justifica la condición de operación para la tobera, se determina la geometría de esta para cumplir con el empuje e impulso específico requerido, se realiza un análisis isoentrópico para estimar parámetros fluidodinámicos de la tobera en la condición de operación, se ensaya la tobera en las condiciones especificadas y se comparan los resultados experimentales con la teoría.

2. METODOLOGÍA

Los requisitos de performance están definidos para una altitud de 100 km y en estos se basa el diseño. Sin embargo, la condición para la cual la tobera funcionará adaptada será una altitud menor, y el motivo se explica a continuación.

A medida que un vehículo aumenta su altitud, la presión atmosférica desciende hasta alcanzar niveles de presión muy bajos considerados coloquialmente como “vacío”. Según atmósfera estándar, la presión toma valores desde 101300 Pa a nivel del mar hasta 0,032 Pa a 100 km.

Por lo tanto, si uno diseñara la tobera adaptada a 100 km, debería elegir presión de salida de diseño $P_2 = 0,032$ Pa y, teniendo una presión de entrada a la tobera de varios órdenes de magnitud mayores, se

necesitaría un área de salida exageradamente grande para expandir completamente el gas dentro de la tobera.

La consecuente longitud asociada hace inviable ese diseño. Debido a esto, la tobera a diseñar estará adaptada a una altitud de diseño, menor que 100 km. Por debajo de ella la tobera funcionará sobre-expandida, y por encima de la misma la tobera lo hará sub-expandida. Esta situación, que ocurre en cualquier tobera de geometría fija que vuele en un vehículo espacial, se muestra en la Figura 1.

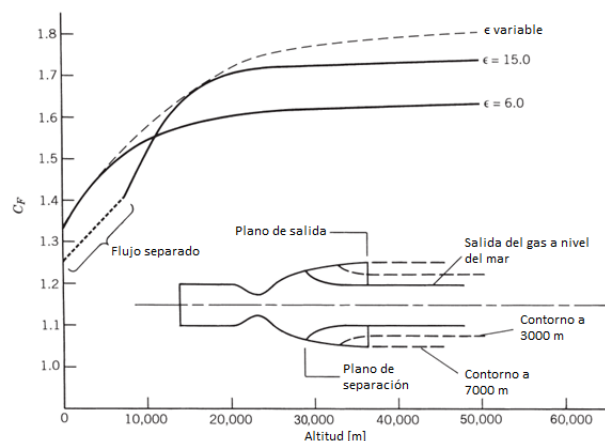


Figura 1. Coeficiente de empuje en función de la altitud para diferentes relaciones de expansión [1].

2.1. Marco teórico

La configuración de la tobera con mejores prestaciones depende de una gran variedad de factores, incluyendo el régimen de altitud en el que opera, las veces que se utiliza por unidad de tiempo y los esfuerzos dedicados a su construcción, además de las propiedades del material, factores tales como la materia de propulsión, la presión y temperatura que tienen los gases durante todo el proceso de expulsión entre otras variables.

Podemos definir tres secciones en la tobera, sección convergente, sección de garganta y sección divergente, la forma básica de toda tobera es la llamada tobera De Laval o tobera convergente divergente.

El empuje generado por este tipo dispositivos, para una condición de funcionamiento constante y en una atmósfera homogénea, se obtiene con la siguiente ecuación.

$$\mathbf{F} = \dot{m}U_s + A_s(P_s - P_a) \quad (1)$$

En la ecuación anterior:

- $\dot{m}$ representa el caudal másico en la tobera
- U_s la velocidad del flujo en el plano de salida de la tobera
- A_s el área en el plano de salida de la tobera
- P_s la presión de salida en la tobera
- P_a la presión en el entorno/ambiente.

Para el caso donde la tobera opera de forma adaptada, es decir $P_s = P_a$, el empuje solo será función del caudal másico que circula por la misma y la velocidad en el plano de salida.

De (1) se obtiene la expresión para determinar la velocidad de salida de una tobera, la cual se expresa en la ecuación (2). Esta expresión toma como subíndice 1 a los parámetros de entrada de la tobera y subíndice 2 a los parámetros de salida. Según la ecuación (1) podemos despreciar v_1 al asumir que el área a la entrada de la tobera es mucho mayor al área de la garganta.

E. A. Jara, P. M. Mantelli, T. Berón, J. S. Delnero, J. Marañón Di Leo

$$v_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1}RT_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (2)$$

Tenemos en la ecuación (2) las siguientes propiedades:

- El exponente isentrópico del gas, $k = 1.4$
- La constante particular del gas, $R = 296 \text{ J/kgK}$
- La presión de entrada de la tobera, P_1
- La temperatura de entrada a la tobera, T_1
- La velocidad del gas a la salida de la tobera, v_2

Si consideramos un empuje dado y determinamos la velocidad de salida de los gases de escape, podemos obtener con el flujo másico, y luego, utilizando las ecuaciones de flujo isoentrópico, la sección de garganta y salida.

2.2. Diseño 2D

2.2.1. Requerimientos

Para el desarrollo de la geometría de la tobera se proponen como datos de entrada los siguientes requerimientos:

Tabla 1. Requerimientos de la tobera diseñada.

Requerimientos	
Presión de entrada, P_1	1500000 Pa (abs)
Presión de salida, P_2	2500 Pa (abs)
Propelente	Nitrógeno gaseoso
Empuje, F	30 N
Altitud de operación	100 km
Impulso específico, I_{sp}	70 seg

En la Tabla 1 se observa que la presión de salida propuesta es de 2500 Pa, la cual corresponde a una altitud equivalente de 25 km aproximadamente. La altitud de diseño resulta menor a la de operación ya que una tobera diseñada a 100 km resultaría impráctica, como se menciona anteriormente en la sección 2. Se utilizará nitrógeno en estado gaseoso, el cual se seleccionó por ser inerte, de bajo costo (comparado con Helio) y de elevado peso molecular.

2.2.2. Geometría

Para el cálculo de las secciones que conforman la tobera se definen los parámetros geométricos referidos a el ángulo de divergencia y convergencia, radios de acuerdos, diámetros fundamentales de salida, entrada y garganta.

La superficie de la pared en toda la tobera debe ser lisa y brillante para minimizar la fricción, deben evitarse los huecos, agujeros, bordes afilados o protuberancias. Se destacan 3 secciones que conforman la tobera de Laval: Convergente, garganta y divergente (Figura 2).

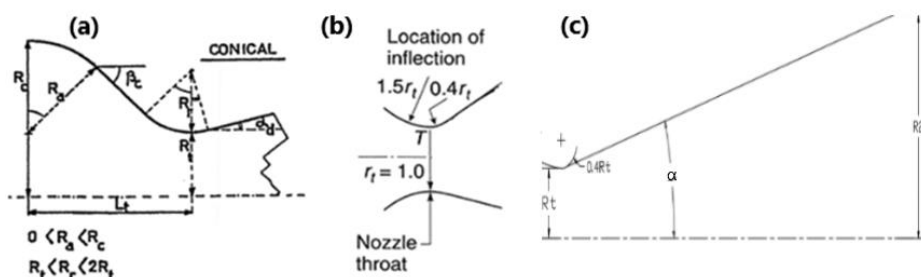


Figura 2. (a) Variables geométricas en la sección convergente para una tobera cónica [3]. (b) Radios de acuerdo en garganta [1]. (c) Variables geométricas de una tobera convergente - divergente cónica.

2.2.2.1. Sección convergente

La sección convergente (véase Figura 2 (a)), entre la entrada y la garganta de la tobera, nunca ha sido crítica para lograr un alto rendimiento. El flujo subsónico en esta sección puede girar fácilmente con una caída de presión muy baja y cualquier radio, contorno de pared o forma de entrada de la tobera suele ser satisfactoria.

Para el diseño de esta sección se tendrá en cuenta que la relación de áreas transversales entre la entrada a la tobera y la garganta sea mayor a 4 para despreciar la velocidad de entrada, y que el ángulo de convergencia β se encuentre en un rango entre 30° y 45° para asegurar transiciones suaves y evitar toda posibilidad de desprendimiento del flujo al atravesar la garganta.

2.2.2.2. Garganta

El contorno de la garganta tampoco es muy crítico para el rendimiento, y cualquier radio u otra curva suele ser aceptable. Los gradientes de presión son altos en estas dos regiones y el flujo se adhiere a las paredes.

En esta zona se distinguen dos radios, uno de aproximación en la zona convergente y otro de expansión en la zona divergente (Figura 2 (b)). Se utiliza un radio de aproximación a la garganta de $1,5r_t$ y un radio de expansión de la garganta de $0,4r_t$. Si se utilizan radios algo diferentes, los resultados solo serán ligeramente diferentes. Estos valores son los recomendados por la bibliografía de las referencias [1] y [3].

La principal diferencia en las distintas configuraciones de toberas se encuentra en la sección de flujo supersónico divergente, como se describe a continuación.

2.2.2.3. Sección divergente

Se utiliza para esta sección una tobera cónica, ya que permiten facilidad de fabricación y flexibilidad al adaptar un diseño existente a una relación de expansión mayor mediante el alargamiento de la sección sin un rediseño general.

Para el ángulo divergente, se toma un semi-ángulo de 15° , ya que es el más utilizado por convención ya que si se utilizan valores bajos del ángulo de divergencia, el flujo a la salida será aproximadamente axial y la performance de estas toberas se aproximará a la teórica. Las pequeñas dimensiones con las que se trabajan hacen que no sea necesario recurrir a una forma acampanada. La forma acampanada se utiliza cuando se desea conseguir la expansión en una longitud menor, pero requiere un estudio detallado de la forma para evitar pérdidas.

Existe un factor de corrección teórico para estas geometrías, que depende del ángulo α (semi-ángulo de abertura del cono). El factor está asociado a la pérdida de cantidad de movimiento a la salida y nos permitirá obtener el valor de empuje en una tobera real donde el flujo no es totalmente axial. Es decir que λ cuantifica la diferencia de velocidad que se logra a la salida cuando la expansión se da con un ángulo 2α respecto al cálculo unidimensional.

E. A. Jara, P. M. Mantelli, T. Berón, J. S. Delnero, J. Marañón Di Leo

$$\lambda = \frac{1}{2}(1 + \cos \alpha) \quad (3)$$

De esta forma, para tobera adaptada se determina el empuje.

$$\mathbf{F} = \dot{m}(\lambda \mathbf{v}_2) \quad (4)$$

Típicamente, el semi-ángulo de divergencia (α) toma valores entre 12° y 18° , región donde la pérdida no es muy significativa y se pueden conseguir buenas longitudes. En este caso se define $\alpha = 15^\circ$, resultando en $\lambda = 0,983$.

2.2.3. Cálculo de la geometría

Para el diseño geométrico de la tobera se procede de la siguiente manera:

1. Se define una altitud donde la tobera estará adaptada, es decir, donde $P_2 = P_a$.
2. Con la relación $\frac{P_2}{P_1}$ y T_1 y conociendo las propiedades del gas, podemos calcular la v_2 teórica adaptada haciendo uso de la ecuación (2).
3. Se aplica el factor de corrección λ y a partir del empuje requerido, se calcula el flujo másico requerido.
4. Se calcula el área de la garganta (A_g) que asegura el caudal másico calculado en el paso anterior en la condición de choqueo.

$$A_g = \dot{m}_{max} \frac{(R T_1)^{0.5}}{P_1 * \left[k^{0.5} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{0.5 \left(\frac{k+1}{k-1} \right)} \right]}$$

5. Se calcula el número de Mach a la salida (M_2) haciendo uso de la relación de presiones.

$$M_2 = \left(\frac{2}{k-1} \right)^{0.5} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{0.5}$$

6. Con M_2 , se calcula el área de salida (A_2).

$$A_2 = \frac{A_g}{M_2} \left[\frac{1 + 0.5(k-1)M_2^2}{0.5(k+1)} \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$$

7. Definidas A_2 y A_g tenemos definida la longitud de la sección divergente, y todo lo necesario para estimar la performance de esta tobera en otras condiciones.
8. Finalmente se calcula el empuje e impulso específico de la tobera en función de la altura, al agregar la componente de empuje por presiones usando la presión ambiente correspondiente.

$$F(h) = \dot{m}v_2 + A_2(P_2 - P_a(h))$$

$$I_s = \frac{F(h)}{\dot{m}g_o}$$

Las Figura 3(a) y Figura 3(b) presentan la evolución tanto del empuje como del impulso específico a medida que cambia la altura. Luego de un cuidadoso análisis se seleccionó la presión de salida para obtener los parámetros de performance buscados.

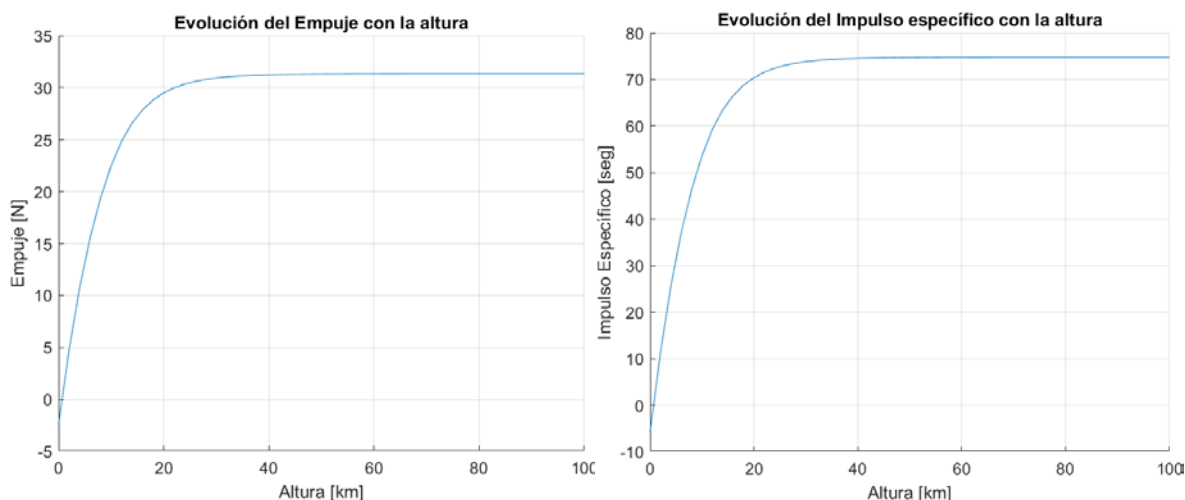


Figura 3: (a) Variación del empuje obtenido con el propulsor en función de la altitud
(b) Evolución del impulso específico con la altura

En función de los requerimientos exigidos se llega a una geometría con las siguientes características y performance a 100 km de altitud:

Tabla 2. Principales características de la tobera.

Requerimientos	
P_2	2.500 Pa
$\dot{m}$	0,0431 kg/s
A_g	11,5 mm ²
A_2	326,8 mm ²
Diámetro de garganta	3,82 mm
Diámetro de salida	20,40 mm
α	15°
Longitud sección divergente	30,94 mm
Empuje	30,8 N
Impulso específico	73 seg

Esta tobera está adaptada a una presión equivalente a aproximadamente 25 km de altitud en atmósfera estándar.

2.3. Diseño 3D

La tobera es modelada en 3D a través de un programa CAD con los valores obtenidos de la sección anterior.

A demás de la construcción de la tobera, se diseña en el mismo entorno el banco de ensayo, donde se instrumenta el dispositivo. La finalidad de realizar en dos piezas, es decir la tobera por un lado y el banco de instrumentación, es que, de esta manera, se logra una intercambiabilidad de la tobera capaz de adaptarla para distintos regímenes de funcionamiento sin necesidad de tener que reimprimir todo el conjunto nuevamente (véase Figura 4 (b) y (c)).

Debido al pequeño tamaño que presenta la tobera no se dimensiona un espesor mínimo, ya que se debe conformar la tobera de tal manera que esta pueda manipularse de una manera cómoda y este no resulta crítico en los ensayos.

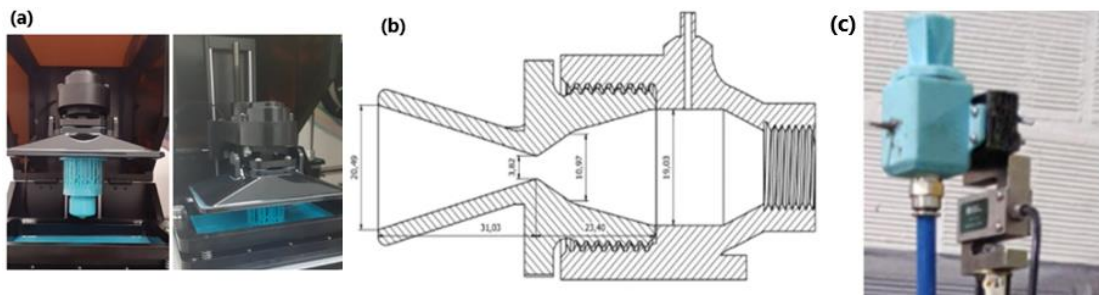


Figura 4: a) Impresora 3d de resina (SLA). (b) Vista lateral de la tobera montada en el bastidor. (c) Tobera y bastidor montados sobre la celda.

2.4. Construcción

Para la construcción de la tobera y el banco de ensayo, se utilizó tecnología de impresión 3D por estereolitografía (SLA; Stereolithography), también conocida como impresión de resina.

En la Figura 4 (a) se encuentra la impresora habiendo finalizado el proceso de conformado de la tobera.

2.5. Ensayos

A la hora de diseñar la tobera un enfoque teórico proporciona un acercamiento a la geometría final del dispositivo. Esta metodología plantea hipótesis en las que se idealiza el comportamiento del flujo. Por este motivo es de suma importancia verificar mediante ensayos los resultados obtenidos. Se verifica mediante una prueba de empuje los parámetros de empuje, velocidad y comportamiento mecánico de la tobera.

2.5.1. Procedimiento ensayo de empuje

Con este ensayo se busca medir el valor del empuje real, a partir del uso de celdas de carga, la presión en la entrada de la tobera y el vacío parcial en el interior de un tanque donde opera la tobera.

2.6. Arreglo experimental

En esta sección solo se describirá de forma general el arreglo experimental a implementar para cada ensayo.

El ensayo consta de un acumulador de nitrógeno el cual se encuentra a una presión mayor a la presión requerida a la entrada de la tobera para tener en cuenta las pérdidas, esta presión se determina experimentalmente de forma previa al ensayo de empuje con la finalidad de que la presión en la entrada de la tobera sea la solicitada.

El acumulador se encuentra equipado con una termocupla utilizada para relevar la temperatura en el interior, se utiliza además un transductor de presión y un manómetro analógico. Del acumulador deriva la tubería flexible que suministra el flujo a la tobera, a través de una válvula globo con la que se acciona el mecanismo de disparo. La tobera se encuentra sobre el banco de ensayo, como se observa en la Figura 5, instalada en la parte superior del tanque de vacío. El banco de ensayo se encuentra equipado con una celda de carga y un transductor de presión sobre el conducto de entrada de la tobera.

Se utiliza, también, un tanque esférico cuyo volumen nos permite establecer una condición de vacío parcial. Este tanque posee una capacidad de 500 litros y cuenta, en su parte inferior, con una brida en la cual se montará un arreglo de bombas de vacío. El esquema del arreglo experimental se muestra en la Figura 5.

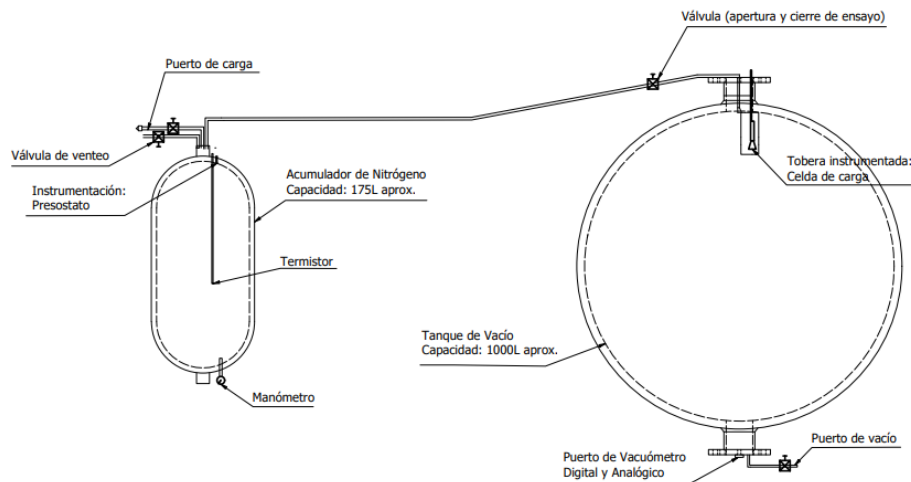


Figura 5: Esquema del arreglo experimental.

3. RESULTADOS

Del ensayo realizado se extrae el valor del empuje, proporcionado por la fuerza aplicada sobre la celda de carga, de igual forma se obtiene los valores de presión en el tanque (acumulador de nitrógeno), presión en la tobera (sección de ingreso) y presión en el tanque de vacío.

Antes de la medición del empuje se realizó una serie de ensayos para establecer la caída de presión que se genera desde el acumulador de nitrógeno hasta el plano de entrada de la tobera. Una vez determinada la caída de presión se ejecuta el ensayo. Los valores de presión en el acumulador de nitrógeno (P1), presión en la entrada de la tobera (P2), nivel de vacío en el tanque esférico y el empuje registrado por la celda de carga se muestran en la Figura 6.

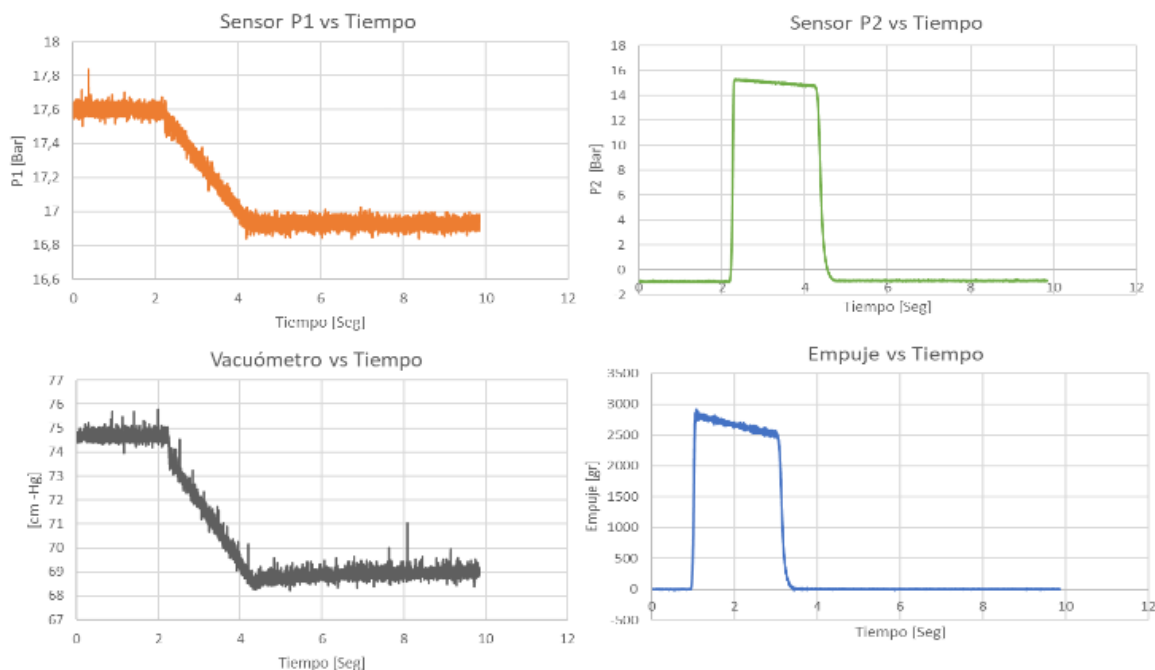


Figura 6. Curvas del ensayo en vacío.

4. DISCUSIÓN

El empuje inicialmente alcanzó un máximo de 2916 gr (28.6N) y en el momento del cierre se registró un valor de 2500 gr (24.52N). El valor medido en el instante inicial, al momento de la apertura de la válvula de disparo, es el que se analiza. Los valores registrados en los instantes siguientes están alejados

de la condición de ensayo pensada, dado que, además de que la presión en la entrada disminuye con el tiempo, la presión en el interior del tanque de vacío se incrementa modificando la presión donde descarga la tobera.

Para poder obtener una estimación del caudal másico, se utiliza la medición de la presión de vacío en el tanque esférico. Siguiendo la ley de los gases ideales y despreciando los cambios de temperatura, tomado el valor de temperatura exterior en el momento del ensayo se estima el caudal másico.

En el intervalo de tiempo que la válvula esférica permanece abierta se puede obtener el valor promedio del empuje para estimar un valor de impulso específico. Tomando un intervalo $\Delta t = 0,25 \text{ s}$ en los primeros instantes del disparo, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 3. Resultados.

Tabla de resultados	
$\bar{F}$	27,4 N
$\dot{m}$	0,0442 kg/s
$\bar{I}$	63,3 seg
$F_{\max}$	28,6 N
$I_{\max}$	66 seg

Se encontró un caudal másico próximo al calculado teóricamente (0,0431 kg/s), y se aprecia una disminución en los valores esperados del empuje e impulso específico medios, mientras que los valores pico presentan una diferencia que puede provenir de las pérdidas no contempladas en el diseño y de algunas incertidumbres de la medición.

5. CONCLUSIONES

Como se mencionó con anterioridad el requerimiento de empuje de la tobera era 30 N, habiendo alcanzado 28,6 N en el instante inicial del ensayo, se obtuvo un error del 4,7%. El error puede estar asociado a un problema en la calibración de los sensores tanto de presión como celdas de carga, condiciones atmosféricas, condiciones mecánicas asociadas al banco de ensayo, etc. Además, se debe tener en cuenta que las hipótesis fluidodinámicas simplificadas planteadas para el desarrollo también introducen un cierto error.

En lo referido al ensayo con atmosfera controlada se logró alcanzar un vacío de 74 Cm Hg, valor suficiente para el requerimiento del ensayo. Se pudo medir la presión en la entrada de la tobera, verificando que sea la adecuada, y la variación del vacío, permitiendo estimar la masa que inyecta la tobera en un determinado tiempo.

Para caracterizar de manera más eficiente la performance de la tobera deben realizarse nuevos ensayos con la capacidad de medir el caudal másico suministrado. Para lograrlo se pretende sumar a los ensayos un caudalímetro. El mismo debe ser adecuado para las condiciones impuestas siendo las más críticas la presión de trabajo y el alto caudal requerido.

6. REFERENCIAS

1. G. P. Sutton and O. Biblarz: "Rocket Propulsion Elements", 2010, John Wiley & Sons, 8va edición.
2. M. J. L. Turner: "Rocket and Spacecraft Propulsion: Principles, Practice and New Developments", 2008, Springer Praxis Books, 3rd Edición
3. M. Barrere, A. Jaumotte, B. Fraeijs De Veubeke, J. Vanderkerckhove: "Rocket Propulsion", 1960, Elsevier Publishing Company.
4. F. M. White: "Mecánica De Fluidos", 2004, Mc Graw Hill, 5ta edición.
5. G. Rao, J. Beck and T. Booth: Nozzle Optimization forspace-Based Vehicles, AIAA, 1999, Los Angeles, C.A, U.S.A.
6. E. Jara, T. Berón, P. M. Mantelli: Diseño y construcción de una tobera aplicada al sistema de control de reacción basado en gas frio, ITEE, 2023, UNLP, Bs. As., Argentina.