

## APLICACIÓN DE MODELO CERO DIMENSIONAL PARA EL CÁLCULO DE PERFORMANCES DEL PROPULSOR DE PLASMA PULSANTE ABLATIVO DE TEFLÓN P<sup>4</sup>S

Nora R. Paoletti<sup>§</sup>, Sergio A. Elaskar<sup>§/\*</sup> y Héctor H. Brito<sup>\*</sup>

<sup>§</sup>Universidad Nacional de Córdoba  
Av. Vélez Sarsfield 1601, (5000) Córdoba, Argentina  
e-mail: [npaoletti@efn.uncor.edu](mailto:npaoletti@efn.uncor.edu)  
e-mail: [selaskar@efn.uncor.edu](mailto:selaskar@efn.uncor.edu)

<sup>\*</sup>Instituto Universitario Aeronáutico  
Instituto Universitario Aeronáutico, Ruta 20 km 5.5, (5022) Córdoba, Argentina  
e-mail: [hbrito@iua.edu.ar](mailto:hbrito@iua.edu.ar)

**Key words:** Propulsor de plasma, prediseño, performances, Teflón, validación, ensayos

**Abstract.** *El P<sup>4</sup>S es un propulsor de plasma pulsante ablativo de Teflón que actualmente se encuentra en desarrollo en el Centro de Investigaciones Aplicadas perteneciente al Instituto Universitario Aeronáutico. Como parte de este proyecto, se elaboró un modelo Cero Dimensional para el cálculo de performances de este tipo de propulsores, a través del cálculo de la masa ablacionada y del impulso específico. Este modelo es una herramienta de prediseño bastante simple que presenta la gran ventaja de introducir muchos parámetros físicos y geométricos. El mismo se basa en el cálculo de la masa ablacionada mediante la ecuación de la energía expresada en función de dicha masa, de parámetros geométricos y eléctricos del motor, y de las eficiencias de cada uno de los procesos que se llevan a cabo en el interior del propulsor. Dicha ecuación comprende a las energías involucradas en la creación y transporte del pulso de corriente, en la formación del arco, en la pérdida de calor por efecto Joule y en la aceleración del plasma. Por otro lado, para obtener una única solución para la masa ablacionada fue necesario introducir un nuevo parámetro, el espesor de arco ideal, lo que permitió simplificar de manera notable al modelo y aún así obtener muy buenos resultados.*

*Como el modelo ya ha sido validado por datos experimentales obtenidos de la bibliografía especializada, lo que se presenta en este trabajo es su aplicación para el estudio del P<sup>4</sup>S.*

## 1 INTRODUCCIÓN

Los propulsores de Plasma Pulsante Ablativo (PPA) de Teflón, son dispositivos de propulsión eléctrica en los cuales el propelente es acelerado, principalmente, por fuerzas electromagnéticas (fuerza de Lorentz). Si bien estos sistemas han sido estudiados durante muchas décadas, los estudios han sido, en su mayoría, empíricos debido a la complejidad de su comportamiento físico, el cual aún hoy no está del todo comprendido. Como consecuencia de esto, se carece de herramientas simples de aplicación en prediseño ya que las presentadas hasta el momento son semiempíricas y los errores de sus estimaciones son demasiado elevados. Para suplir esta carencia es que se trabajó en el desarrollo de un modelo simple para el prediseño de este tipo de motores.

Debido a que es la primera vez que en el país se desarrolla un propulsor de estas características, no se contaba con datos experimentales propios, por lo que para la validación del modelo se tuvo que recurrir a valores obtenidos de la bibliografía especializada.

Actualmente el P<sup>4</sup>S se encuentra en su fase de calificación, para lo cual está siendo sometido a numerosos ensayos en cámara de vacío. Aún en esta etapa, que no es de prediseño, el modelo resulta de gran utilidad ya que de su aplicación se obtienen valores de performances que brindan una idea de aquellos que deberían obtenerse en la fase experimental. Por otro lado, una de las mayores ventajas que posee es la de permitir un rápido análisis de distintas configuraciones y su influencia en las performances. Finalmente, presenta la capacidad de evaluar condiciones de funcionamiento de módulos propulsivos pulsantes de plasma que son necesarias en esquemas numéricos para describir el flujo dentro del propulsor<sup>1,2</sup>.

En el siguiente trabajo se presenta, en primer lugar, una esquematización del funcionamiento de los propulsores de plasma pulsante seguida por una breve descripción del modelo prediseño de éstos. Luego, se presentan una descripción del propulsor en estudio, el P<sup>4</sup>S, los valores predichos por el modelo, los experimentales y por último, la comparación de estos dos últimos.

## 2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN PROPULSOR DE PLASMA PULSANTE ABLATIVO DE TEFLÓN

La figura 1 muestra un esquema sencillo de este tipo de propulsores.

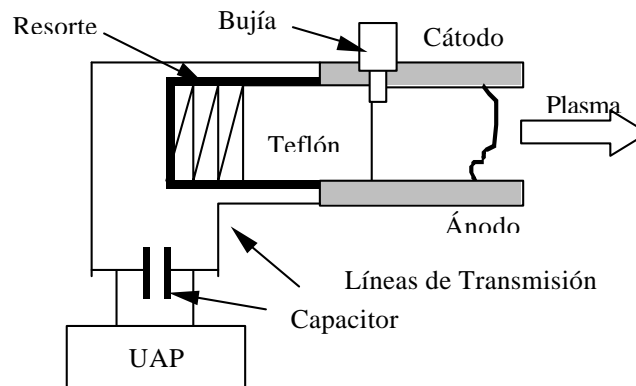


Fig. 1 Esquema de un PPPA

A continuación se describirá brevemente el funcionamiento de estos propulsores.

- 1- La unidad acondicionadora de potencia (UAP) es un conjunto electrónico que provee energía al banco de capacitores y controla al sistema de ignición. Esta unidad carga a los capacitores con algunos miles de voltios, los que a su vez cargan a los electrodos.
- 2- La barra de Teflón se encuentra entre los electrodos y su alimentación se logra mediante un resorte que la empuja hasta un tope (en este caso la bujía).
- 3- Como el motor opera en el vacío, para iniciar la descarga entre los electrodos se deben aportar elementos conductores. Para ello, la bujía de ignición consiste en un material semiconductor rodeado por otro par de electrodos. Cuando ésta es accionada por el circuito electrónico de iniciación de la descarga, el material semiconductor provee portadores libres para la formación de un arco entre los electrodos del propulsor, que inicia la liberación de la energía almacenada.
- 4- Dicho arco produce la ablación e ionización de unas pocas láminas microscópicas de la superficie expuesta del Teflón.
- 5- Los iones cierran el circuito eléctrico y son acelerados hacia la salida por la fuerza de Lorentz producida por la acción del campo magnético inducido por la corriente eléctrica, como se muestra en la figura 2.

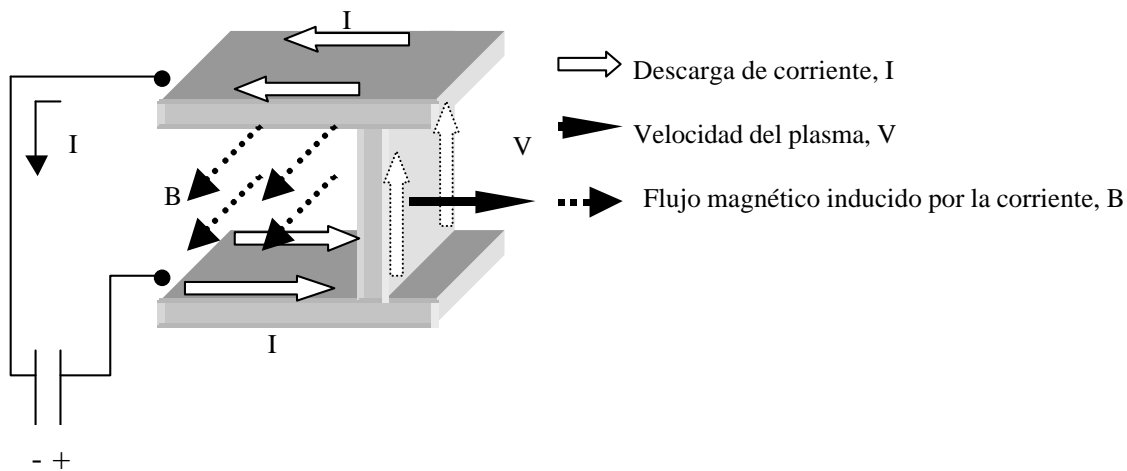


Fig. 2 Circuito eléctrico de un PPPA.

### 3 MODELO CERO DIMENSIONAL

En esta sección se presentará en forma resumida una descripción del modelo cero dimensional<sup>3</sup> creado para el prediseño de este tipo de propulsores.

#### 3.1 Hipótesis

1. El comportamiento del propulsor se simula mediante un modelo cero dimensional por lo que se obtiene un modelo algebraico.

2. El balance de energía se hace a partir del banco de capacitores, porque es en éste en donde las pérdidas comienzan a ser importantes.
3. La cámara de aceleración, los electrodos y el plasma son considerados como componentes de un circuito eléctrico del tipo RLC independientes del tiempo. Esto permite pensar en el plasma como en un conductor móvil con una resistencia e inductancia determinadas, lo cual facilita la definición del impulso electromagnético asociado a la aceleración de la “nube” iónica. En la figura 3 se representa el esquema del circuito eléctrico equivalente.

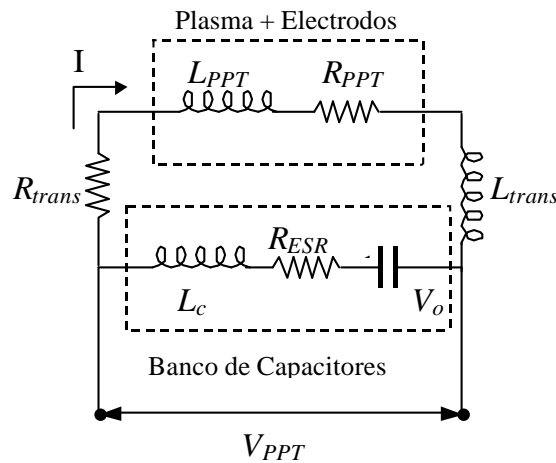


Fig. 3 Circuito eléctrico equivalente de un PPTA.

4. El plasma es considerado como un cuerpo negro.
5. La energía específica para la ablación del Teflón ( $e_{gas}$ ) es de  $1.5 \times 10^6$  J/Kg.
6. Se considera al plasma como confinado dentro de un volumen a temperatura uniforme.
7. Las partículas neutras se expanden como un gas perfecto dentro de una cavidad subsónica, por lo que la mayor velocidad de éstas será la del sonido.
8. Se supone que la masa ionizada es un 10% de la masa total ablacionada ( $\alpha=0.1$ ,  $\alpha$  es el cociente entre la materia ionizada y la materia neutra).
9. La energía empleada en la aceleración electromagnética es la mitad de la energía del arco.

### 3.2 Ecuación del Balance de Energía

El modelo parte de la ecuación del balance de energía<sup>4</sup>,

$$E_o = E_{joule} + E_{sh} + E_{heat} + E_{gas} + E_{em} + E_{et}, \quad (1)$$

en donde  $E_o$  es la energía almacenada en los capacitores,  $E_{joule}$  es la energía disipada por efecto Joule en las líneas de transmisión,  $E_{sh}$  es la energía perdida en las vainas de potencial,  $E_{heat}$  es la energía perdida por radiación,  $E_{gas}$  es la energía necesaria para ablacionar y sublimar al Teflón,  $E_{em}$  es la energía electromagnética en el plasma y  $E_{et}$  es la energía

correspondiente a los efectos gasdinámicos (un esquema sobre el balance de energía se muestra en la figura 4).

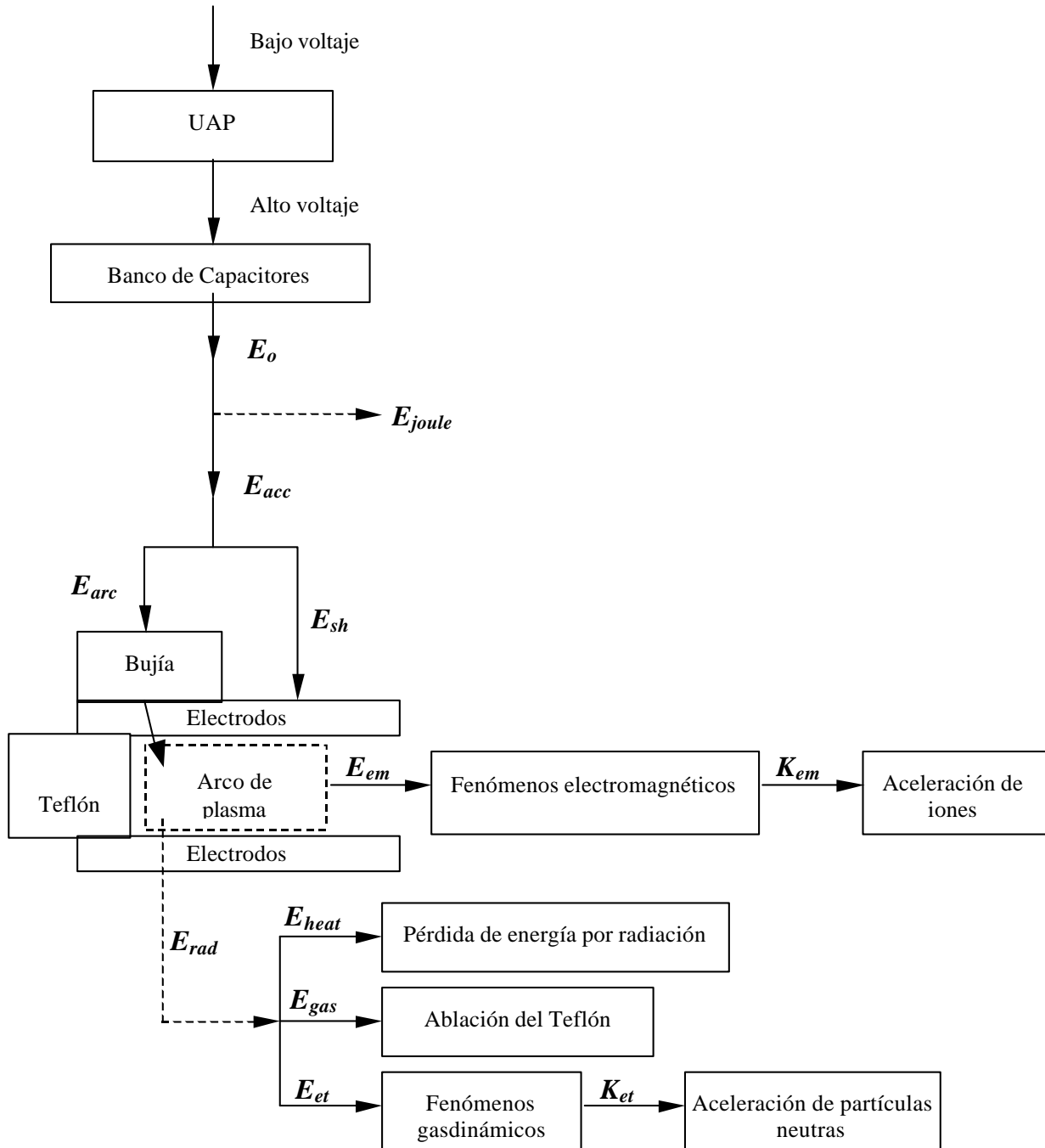


Fig. 4 Balance de energía en un PPA.

Cada una de las energías que intervienen, excepto  $E_o$  puede ser expresada como función de la masa ablacionada,  $m$ , y/o de eficiencias,  $\mathbf{h}$  Entonces,

$$E_o = (1 - \mathbf{h}_{trans})E_o + (1 - \mathbf{h}_{sh})\mathbf{h}_{trans}E_o + (1 - \mathbf{a}_A)(\mathbf{h}_{trans}\mathbf{h}_{sh}E_o - E_{em}) + me_{gas} + C_{em}\frac{E_o^2}{m} + \frac{m}{C_{et}}. \quad (2)$$

En la ecuación anterior  $\mathbf{h}_{trans}$  es la eficiencia de las líneas de transmisión,  $\mathbf{h}_{sh}$  es la relación entre la energía que es utilizada para la generación del arco y la que ingresa a la cámara de aceleración,  $\mathbf{a}_A$  es la relación entre el área expuesta del Teflón y el área de radiación del arco y por último  $C_{em}$  y  $C_{et}$  son dos constantes que se obtienen de los procesos de aceleración electromagnéticos y gasdinámicos.

### 3.3 Cálculo de la Masa Ablacionada

A partir de la ecuación anterior se obtiene una ecuación cuadrática para la masa ablacionada.

$$m = \frac{\mathbf{a}_A\mathbf{h}_{trans}\mathbf{h}_{sh}E_o \pm \sqrt{(\mathbf{a}_A\mathbf{h}_{trans}\mathbf{h}_{sh}E_o)^2 - 4\mathbf{a}_AC_{em}E_o^2(e_{gas} + C_{et}^{-1})}}{2(e_{gas} + C_{et}^{-1})}. \quad (3)$$

Como esta ecuación depende del espesor de arco a través de varios parámetros entre los cuales se encuentran la resistencia del plasma y la relación entre el área expuesta del Teflón y el área de radiación del arco ( $\alpha_A$ ), es necesario fijar un valor para el mencionado espesor. Para ello, se define un nuevo parámetro llamado espesor de arco ideal, siendo éste el valor para el cual se cumple la hipótesis 9, cuya mayor ventaja es la de anular al radicando de la ecuación anterior. Dando así lugar a un único valor para la masa ablacionada.

$$m = \frac{\mathbf{a}_A\mathbf{h}_{trans}\mathbf{h}_{sh}E_o}{2(e_{gas} + C_{et}^{-1})}. \quad (4)$$

Este proceso para determinar la masa ablacionada resulta iterativo. Se basa en proponer espesores de arco hasta obtener el valor que cumple con la hipótesis 9 tal como se muestra esquemáticamente en la figura 5.

Entonces, para el cálculo del espesor ideal y a partir de éste de las performances del propulsor, los datos requeridos son:

- 1 – Tipo de alimentación del Teflón (Breach-Fed, Side-Feed).
- 2 – Área expuesta del Teflón.
- 3 – Geometría de los electrodos y de la cámara de aceleración.
- 4 – Parámetros eléctricos (Capacitancia  $C$ ; voltaje en el capacitor  $V_o$ ; resistencia equivalente del banco de capacitores  $R_{ESR}$ ; resistencia de las líneas de transmisión  $R_{trans}$ ; inductancia del capacitor  $L_C$ ; e inductancia de las líneas de transmisión  $L_{trans}$ ).

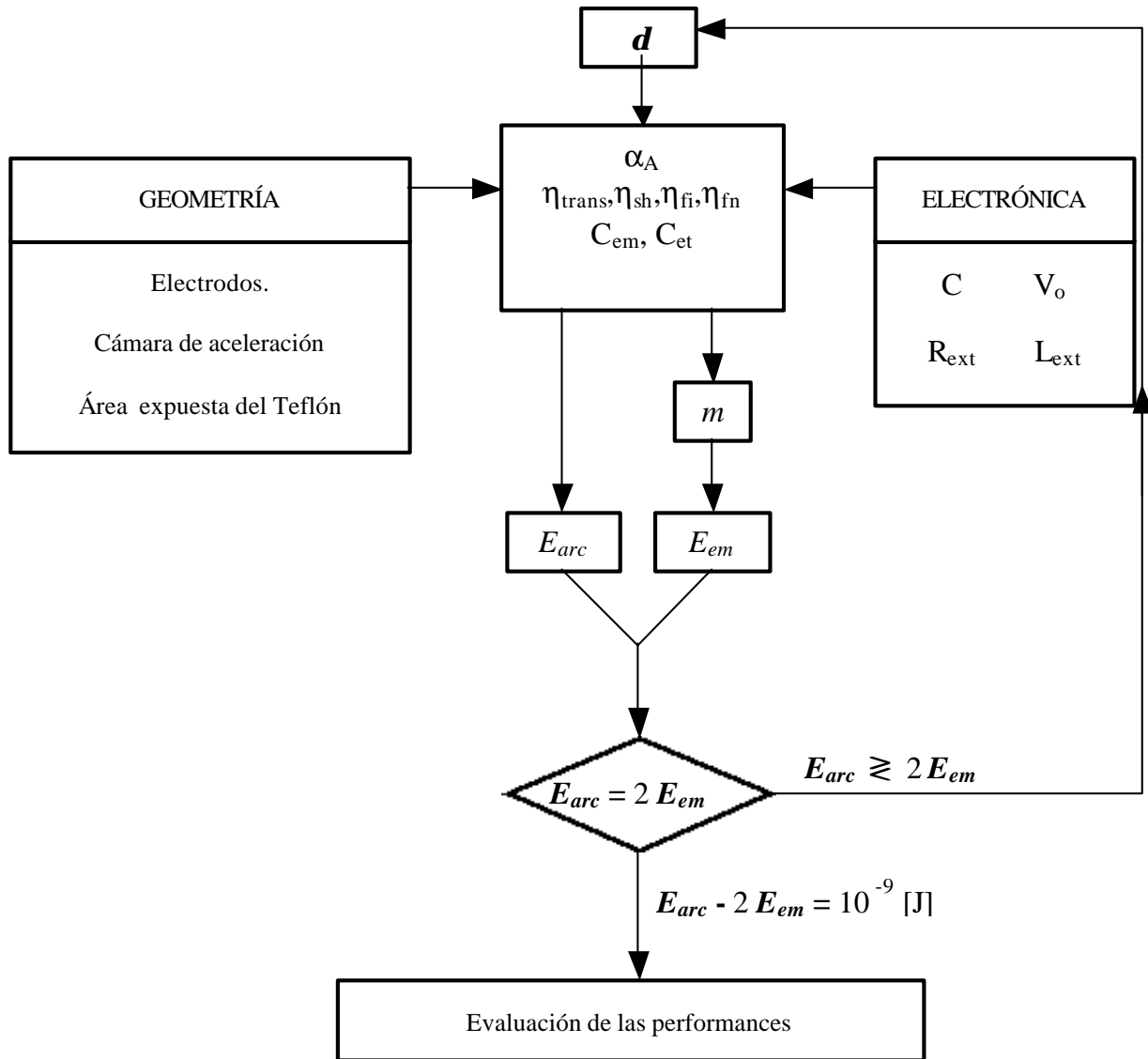


Fig. 5. Determinación del espesor de arco ideal.

5 – Constantes físicas ( $e_{gas}$ ; constante universal de los gases  $R$ ; y  $s$  constante de Stephan Boltzmann) y parámetros invariantes (relación de calores específicos  $g$   $a$ ; masa atómica de los productos neutros del plasma  $M$ ; y resistividad del plasma  $h_{ij}$ ).

En esta figura,  $h_{fi}$  y  $h_{fn}$  son las eficiencias de los flujos congelados de las materias ionizada y neutra respectivamente.

### 3.4 Impulso Producido Durante un Pulso

Por último, el impulso del motor se calcula a partir de la contribución magnetodinámica y gasdinámica, mediante la fórmula siguiente:

$$I = \frac{L'_{PPT} E_O}{2R_{tot}} + \alpha_n m a \quad (5)$$

en la que  $a$  es la velocidad del sonido,  $\alpha_n$  es la proporción de masa neutra de la masa total ablacionada  $m$ ,  $L'_{PPT}$  es el gradiente de inductancia por unidad de longitud y  $R_{tot}$  es la resistencia total del circuito.

### 3.5 Validación del Modelo

Como se ha mencionado el modelo sólo se había validado mediante datos experimentales obtenidos de la bibliografía especializada. Para ello se consideraron cinco motores, el OSU/LeRC Benchmark<sup>5</sup>, el Les-6<sup>6,7</sup>, el XPPT-1<sup>8</sup>, el APPT de la Ref. [9] y el PPT-4<sup>10</sup>.

Las performances principales obtenidas experimentalmente y mediante la aplicación del modelo, así como los errores de las estimaciones se presentan a continuación en la tabla 1.

Estos valores muestran un error medio para la estimación de la masa de alrededor del 60% y del 50% para la estimación del impulso(en todos los casos se tomó  $\alpha=0.1$ ).

Performances & errores	OSU/LeRC	LES-6	XPPT-1	PPPA	PPT-4
$m$ , $\mu\text{g}$	11.6	10	28.5	1780	45
$I$ , $\mu\text{Ns}$	-	31.2	279.5	17000	252
$m_{pred}$ , $\mu\text{g}$	27	3.6	32.4	2670	57.8
$I_{pred}$ , $\mu\text{Ns}$	150	22.5	115	8900	144
$e_m$ , %	136	64	13.6	50	28.4
$e_I$ , %	-	51	59	48	43

Tabla 1

## 4 PROPULSOR P<sup>4</sup>S

El propulsor en estudio ha sido desarrollado para el control de órbita y/o actitud de la serie de microsátélites  $\mu\text{SAT}$ , del IUA. El mismo es del tipo coaxial y la alimentación del Teflón es del tipo Breech-Fed. En este momento el propulsor se encuentra en la fase de calificación, por lo que numerosos ensayos se están llevando a cabo en cámara de vacío, lo que nos ha permitido obtener resultados experimentales para contrastar con los predichos por el modelo creado para su prediseño.

En la figura 6 se presenta un esquema del propulsor y en la figura 7 una foto del mismo montado en el banco de ensayo. Dicho banco fue diseñado para medir el impulso a través de transductores piezoeléctricos que miden la deformación sufrida por la barra en cuyo extremo se encuentra el motor. Un mayor detalle de su funcionamiento se describe en las Ref. [11] y [12].



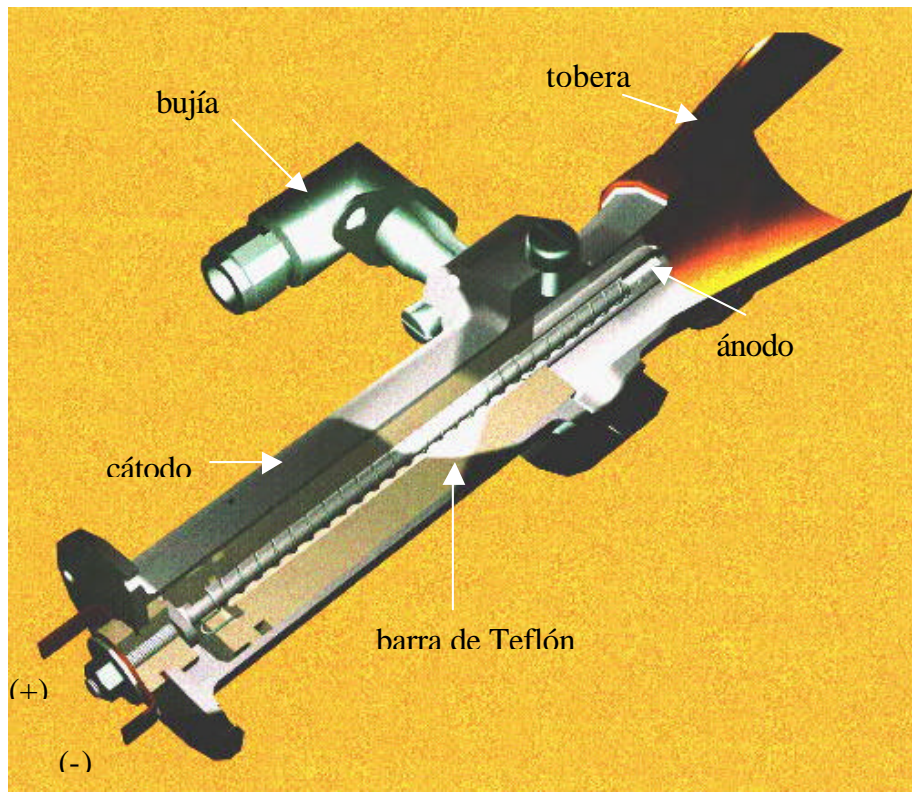


Fig. 6 Corte del propulsor

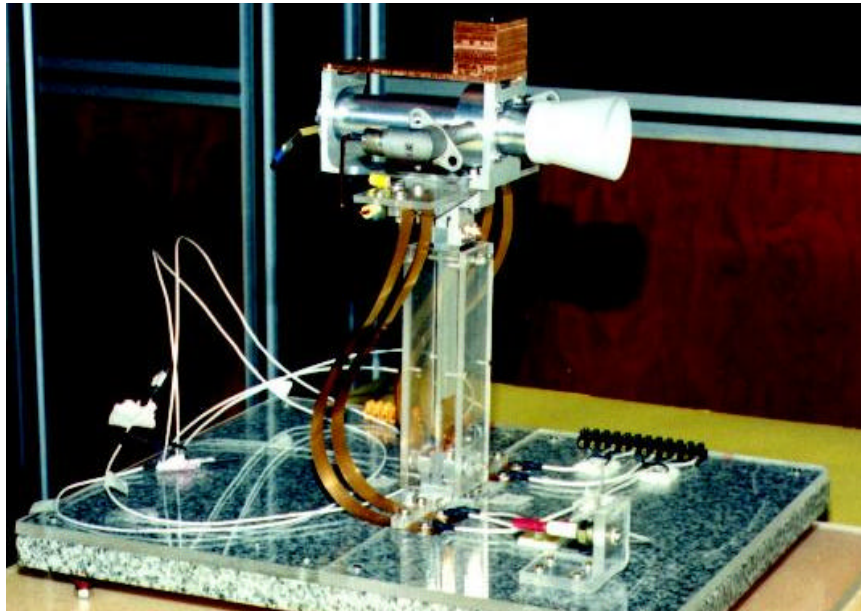


Fig. 7 Propulsor montado en el banco de ensayos

## 5 APLICACIÓN DEL MODELO

Para la aplicación del modelo, hay ciertos parámetros geométricos y eléctricos que deben ser definidos a priori para ser utilizados en el cálculo de las performances. Estos se muestran, para el caso del propulsor en estudio, en la tabla 2.

Parámetros eléctricos		Parámetros geométricos	
C [ $\mu\text{F}$ ]	2.64	Radio electrodo central [mm]	4.5
$V_o$ [V]	4000	Radio electrodo anular [mm]	15
Resistencia total [ $\Omega$ ]	0.045	Longitud electrodo central [mm]	45
Inductancia total [nH]	160	Longitud electrodo anular [mm]	55

Tabla 2

La aplicación del modelo de prediseño ha dado como resultado los parámetros que figuran a continuación, en la tabla 3.

Bit impulso [ $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ ]	79.6
Impulso específico [s]	342
Masa ablacionada por impulso [ $\mu\text{g}$ ]	23.7
Intensidad máxima de corriente [A]	14245
Frecuencia [hz]	1.75
Empuje medio [mN]	0.138

Tabla 3

## 6 RESULTADOS DE ENSAYOS DEL P<sup>4</sup>S

Los dos parámetros de mayor interés a relevar durante la campaña de ensayos son: el impulso y la masa ablacionada de Teflón. . El banco antes mencionado permitió la medición del primero, mientras que la masa ablacionada se determinó por pesaje de la barra de Teflón (diferencia de peso antes y después de cada ensayo). Estos datos permitieron calcular las performances de este propulsor, las cuales se presentan en la tabla 4.

En la figura 8 se muestra al propulsor montado dentro de la cámara de vacío.

Duración del ensayo [min]	49
Frecuencia [Hz]	1.75
Cantidad de pulsos durante el ensayo	5145
Bit impulso [ $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ ]	70
Impulso específico [s]	1596
Masa ablacionada durante el ensayo [mg]	23
Masa ablacionada por impulso [ $\mu\text{g}$ ]	4.47
Intensidad máxima de corriente [A]	14000
Empuje medio [mN]	0.1225

Tabla 4

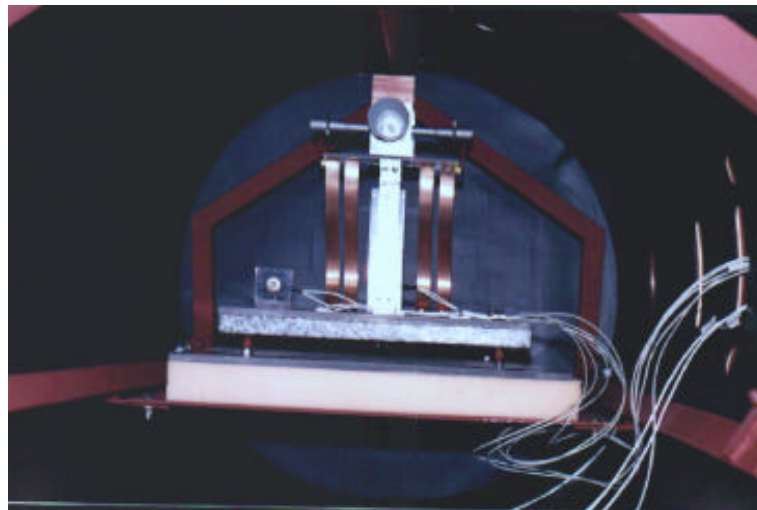


Fig. 8 Propulsor montado dentro de la cámara de vacío

## 7 CONCLUSIONES

De la comparación de los valores de las tablas 3 y 4 vemos que el modelo aproxima bastante bien los valores del Bit impulso, siendo el error de la estimación del 14%. Sin embargo, se observa una gran discrepancia entre los valores de masa ablacionada calculados y medidos. El error es del orden del 400%.

Las causas de semejante diferencia pueden ser varias, sin embargo, suponemos que el motor está ablacionando menos masa de la que debería, ya que durante los experimentos se ha observado que este proceso no se lleva a cabo uniformemente. Teniendo en cuenta esto, se ha corrido el modelo nuevamente, pero considerando que la ablación sólo se produce en una porción de la superficie expuesta del Teflón. De esta forma se han logrado reproducir valores de masa ablacionada más próximos a los medidos, sin que el Bit impulso experimente variaciones exageradas. Por ejemplo, corriendo el programa para  $r_a=11\text{mm}$  y  $r_c=13\text{mm}$ , lo

que equivale a considerar un área de ablación del orden del 25% del área expuesta, se obtiene un error del 60% tanto en la masa ablacionada como en el Bit impulso. Entonces, para lograr que la ablación se lleve a cabo en toda la superficie del Teflón, se ha previsto agregar más bujías en los próximos ensayos.

En cuanto al modelo, éste se basa en que el plasma se comporta como un cuerpo negro, por lo que estaríamos sobreestimando la energía irradiada hacia la superficie del Teflón y de esta manera la masa ablacionada. Esta y otras hipótesis simplificativas (como el tiempo de radiación y la consideración de que el plasma tiene una temperatura homogénea) utilizadas en el modelo de ablación deben ser estudiadas para su mejora.

Por otro lado, como para el cálculo de la masa ablacionada el modelo se basa en el hecho de que la relación entre la energía electromagnética sea la mitad de la energía en el arco ( $E_{arc} / E_{em}=2$ ), a medida que el propulsor se aleja de esta relación, los valores predichos por el modelo se distancian cada vez más de los valores reales. Por ello es que habría que poseer valores experimentales de dichas energías para el P4S para saber cuánto es lo que se aleja el propulsor del valor ideal propuesto en el modelo. Por el momento no se poseen datos suficientes para calcular este cociente, lo que será motivo de un posterior análisis debido a que se necesitan medir las velocidades de las partículas y hasta el momento no se cuenta con el instrumental necesario.

En cuanto al impulso específico dado por el modelo, éste es bajo comparado con otros propulsores de características similares. Esto puede ser en gran parte debido a que la resistencia es muy grande lo que es principalmente una consecuencia de que no todos los sistemas están integrados al propulsor, sino que muchos de ellos se encuentran en el exterior de la cámara de vacío y se conectan con éste a través de largos conductores. Esto indicaría que luego de la integración los resultados tendrían que mejorar notablemente.

Finalmente, este modelo resulta muy importante para la aplicación de otros modelos numéricos más complejos, como los desarrollados para la resolución de las ecuaciones de la magnetogasdínámica en condiciones de flujo ideal, inestacionario y bidimensional<sup>1</sup> y la simulación de flujos con reacciones químicas en dispositivos pulsantes<sup>2</sup>. Ambos utilizan un esquema de volúmenes finitos junto con la técnica TVD de Harten-Yee. El objetivo es obtener una herramienta que permita describir de forma más detallada el flujo de plasma dentro del motor. Sin embargo, para su uso es necesario definir condiciones de contorno, siendo algunas de ellas provistas por el modelo cero dimensional utilizado en este trabajo, como lo es la intensidad de corriente en función del tiempo. Por último, como una mejora del modelo cero dimensional, se está trabajando en un modelo más sofisticado, unidimensional e inestacionario, que implementaría soluciones híbridas (analítico-numéricas) para predecir el comportamiento de propulsores de plasma pulsante.

## 8 REFERENCIAS

<sup>1</sup> Maglione, L. S., Elaskar, S. A. and Brito, H. H., , “Numerical Simulation of two-dimensional, non-steady, ideal magnetogasdynamics equations”, presentado y publicado en Proceedings del **28th International Electric Propulsion Conference, IEPC2003**, Toulouse, mayo 2003.

- <sup>2</sup> Tamagno, J.P., Elaskar, S. A. y Ríos, G.A., “Numerical simulation of time-dependent reacting flows in pulse facilities”, **Applied Numerical Mathematics** 47 (2003) 515-530, Elsevier B.V.
- <sup>3</sup> Brito, C. M., Brito, H. H., Elaskar, S. A., y Paoletti, N. R., “Zero-dimensional Model for Preliminary Design of Ablative Pulsed Plasma Teflon Thrusters”, aceptado para su publicación en el **Journal of Propulsion and Power**, Vol. 20, No. 5, Septiembre-Octubre 2004
- <sup>4</sup> Burton, R. L., Wilson, M. J., Bushman, S. S., “Energy Balance and Efficiency of the Pulsed Plasma Thruster,” **AIAA Paper 98-3808**, July 1998.
- <sup>5</sup> Kamhawi, H., Turchi, P. J., Leiweke, R. J., Myers, R. M., “Design and Operation of a Laboratory Benchmark PPT,” **AIAA Paper 96-2732**, July 1996.
- <sup>6</sup> Turchi, P. J., Mikellides, I. G., Mikellides, P. G., Schmahl, C. S., “Theoretical Investigation of Pulsed Plasma Thrusters,” **AIAA Paper 98-3807**, July 1998.
- <sup>7</sup> Mikellides, P. G., Turchi, P. J., “Modeling of Late-Time Ablation in Teflon Pulsed Plasma Thrusters,” **AIAA Paper 96-2733**, July 1996.
- <sup>8</sup> Spanjers, G. G., McFall, K. A., Gulczinski, F. S., Spores, R. A., “Investigation of Propellant Inefficiencies in a Pulsed Plasma Thruster,” **AIAA Paper 96-2723**, July 1996.
- <sup>9</sup> Palumbo, D. J., Guman, W. J., “Effects of Propellant and Electrode Geometry on Pulsed Ablative Plasma Thruster Performance,” **AIAA Paper 75-409**, March 1975.
- <sup>10</sup> Bushman, S. S., Burton, R. L., Antonsen, E. L., “Arc Measurements and Performance Characteristics of a Coaxial Pulsed Plasma Thruster,” **AIAA Paper 98-3660**, July 1998.
- <sup>11</sup> Brito, H. H., Domínguez, C. A., Bortis, C. A., y Lifschitz, L. A., “Electric Propulsion Activities in Argentine”, IAF Paper No. 00-S.4.01, presentado en el **51st. International Aeronautical Congress**, organizado por la Federación Internacional de Astronáutica (IAF), Rio de Janeiro, Brasil, 02-06/2000.
- <sup>12</sup> Brito, H. H., De Alessandro, R. O., y Domínguez, C. A., “Preliminary Development Status of the IUA’s P4S-1 Ablative Pulsed Plasma Thruster”, presentado y publicado en Proceedings del **26th International Electric Propulsion Conference (IEPC-99)**, Kitakyushu, Japón, 17-21 Oct. 1999.