



## 4<sup>to</sup> Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica



# ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE UN MODELO ANÁLITICO CERO DIMENSIONAL PARA EL DISEÑO PRELIMINAR DE PROPULSORES DE PLASMA PULSANTES ABLATIVOS DE TEFLÓN

E. Gómez<sup>a</sup>, S. Elaskar<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, IDIT – UNC – CONICET, Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina. <http://www.inv.idit.efn.uncor.edu/>

<sup>b</sup>Departamento de Ingeniería Aeronáutica, FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina.

**Palabras Clave:** Propulsión, Impulso, Masa ablacionada, Sensibilidad.

### Resumen

---

En este artículo se presenta un análisis de sensibilidad utilizando un modelo cero dimensional desarrollado para estimar la masa ablacionada y el impulso en propulsores de plasma pulsantes ablativos de teflón (PPPA). Se analiza cómo influye en el cálculo de las performances la eficiencia en las vainas de potencial, la eficiencia de flujo congelado de la materia neutra e ionizada, y la relación de masa neutra a masa ablacionada. Se comparan los resultados numéricos obtenidos con aquellos dados en la literatura especializada para distintos PPPA y se busca identificar las variables más relevantes respecto a la predicción de la masa ablacionada y del impulso. Además se evalúan posibles líneas de acción para introducir mejoras en el modelo en función de las tendencias encontradas en los resultados numéricos.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Los propulsores de plasma pulsantes ablativos (PPPA) son dispositivos de propulsión eléctrica los cuales ionizan y aceleran el propelente por medio de efectos electromagnéticos (fuerza de Lorentz) y gasdinámicos (en menor medida) para producir empuje. Como se menciona en [1, 2], se pueden utilizar para realizar correcciones de órbita y controles de actitud en microsátélites debido a su capacidad de producir pequeños bits impulso ( $I_{bit}$ ) y alto impulso específico ( $I_{sp}$ ). Además, poseen una alta confiabilidad y bajos requerimientos de potencia. A pesar de su eficiencia, normalmente inferior al 10% según [3] aunque teóricamente podría llegar a ser del 44% y 60% para geometría de electrodos paralela y coaxial respectivamente como se muestra en [4], siguen siendo atractivos debido a su robustez, simpleza constructiva, y en el caso de utilizarse propelente en estado sólido (generalmente Teflón), su diseño compacto y seguro de acuerdo con [5].

Con el objetivo de disponer de una herramienta simple y rápida para predecir el comportamiento de este tipo de motores, se han elaborado modelos teóricos simples para los PPPA o los denominados motores magnetoplasmadinámicos (MPD), tales como los presentados en [6]-[9].

En este trabajo se realiza un análisis de sensibilidad de las variables de entrada al Modelo Cero Dimensional Modificado (MCDM), el cual es una variación del modelo original propuesto por en [8], el cual puede utilizarse en motores cuya geometría de la cámara de aceleración sea coaxial o paralela. Se analizan los resultados obtenidos en cuanto a la masa ablacionada por pulso y el bit impulso.

## 2. FUNCIONAMIENTO DE UN PPPA

De forma simplificada, podemos representar esquemáticamente a los PPPA mediante el diagrama que se muestra en la Figura 1. En dicha figura se destacan los elementos que caracterizan a motores de este tipo como la unidad acondicionadora de potencia (UAP), el banco de capacitores, la bujía de ignición y la barra de teflón comprimida por un resorte.

Inicialmente, la UAP es la encargada de cargar el capacitor el cual a su vez impone una tensión dada entre los electrodos. Luego se utiliza la bujía de ignición para iniciar la descarga de corriente o arco eléctrico entre el ánodo y el cátodo en cercanías de la superficie del propelente, liberando la energía previamente almacenada en el capacitor. La elevada temperatura en la cámara producto de la descarga de corriente es suficiente para ablacionar una pequeña capa de la superficie de teflón e ionizar parcialmente el gas resultante, el cual será acelerado hacia el exterior de la cámara por medio de la fuerza de Lorentz. Por otro lado, el gas que no ha sido ionizado o materia neutra también es expulsada hacia el exterior por medio de efectos gasdinámicos. Este proceso se repite dándole la característica pulsante a este tipo de motores.

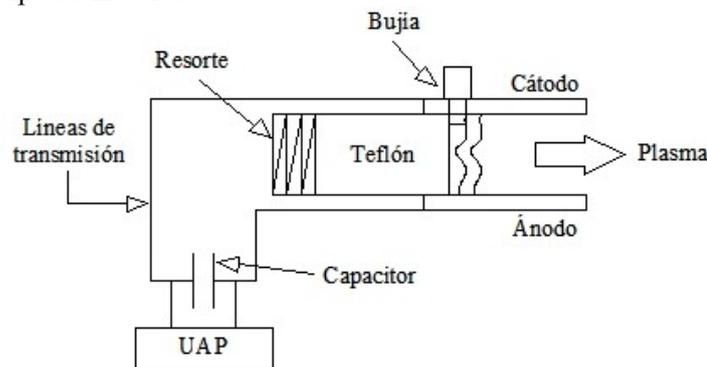


Figura 1: Esquema típico de un PPPA.

En la Figura 2 podemos ver un esquema circuital típico con el cual se puede modelar este tipo de motores donde puede apreciarse la característica RLC del mismo.

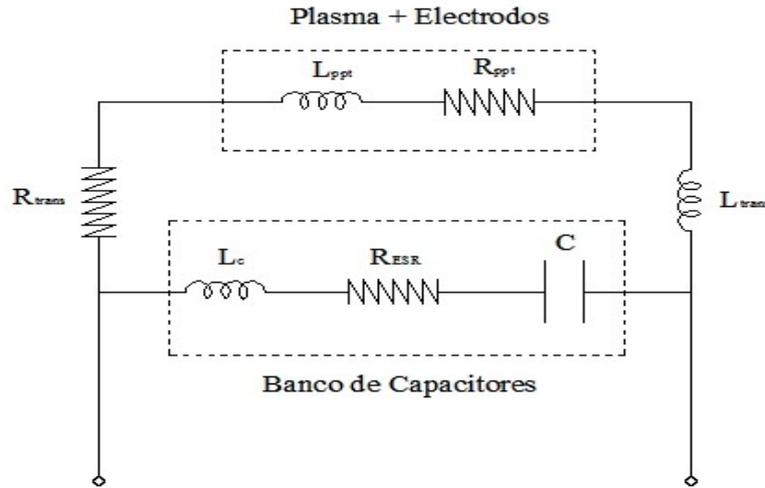


Figura 2: Esquema circuitual típico de un PPPA.

### 3. MODELO CERO DIMENSIONAL MODIFICADO

#### 3.1 Consideraciones generales

A continuación se presentan las consideraciones generales del MCDM el cual se basa en el modelo presentado en [8], pero con algunas modificaciones:

- 1) El PPPA se modela por medio de un análisis cero dimensional, es decir, una ecuación algebraica.
- 2) El balance de energía comienza en el capacitor o banco de capacitores debido a que el tiempo de descarga es gobernado básicamente por este elemento.
- 3) La cámara de aceleración, los electrodos y el plasma se consideran como componentes de un circuito eléctrico RLC independientes del tiempo.
- 4) La energía específica para la ablación del teflón ( $e_{gas}$ ) es de  $1.5 \times 10^6$  [J/kg].
- 5) Se considera al plasma como confinado dentro de un volumen a temperatura uniforme.
- 6) Las partículas neutras se expanden como un gas perfecto dentro de una cavidad subsónica, por lo que la mayor velocidad de éstas será la velocidad del sonido.
- 7) Se supone que la masa ionizada es un 10% de la masa ablacionada.
- 8) La energía empleada en la aceleración electromagnética es la mitad de la energía en el arco ( $E_{arc} = 2E_{em}$ ).
- 9) Se considera que la emisividad del plasma es igual a 0.3.
- 10) Se fija en un valor típico la relación de área expuesta del teflón y área de radiación en  $\alpha_A = 0.375$  y  $\alpha_A = 0.66$  para motores de geometría de electrodos paralela y coaxial respectivamente, de acuerdo con [4].
- 11) Se verifica que la temperatura de radiación sea igual a la temperatura del plasma, lo cual dará lugar a un nuevo proceso iterativo que ajustará la resistividad del plasma de acuerdo con [10] según la temperatura de radiación.

Se hace notar que las últimas tres consideraciones son las que diferencian al MCDM del MCD original. Para más detalles ver [11].

#### 3.2 Ecuación de balance de energía

Las energías puestas en juego en un PPPA se muestran en la Figura 3. A partir de este diagrama, podemos escribir:

$$E_0 = E_{joule} + E_{sh} + E_{heat} + E_{gas} + E_{em} + E_{et} \quad (1)$$

En donde  $E_0$  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 el teflón,  $E_{em}$  es la energía electromagnética en

el plasma y  $E_{et}$  es la energía correspondiente a los efectos gasdinámicos.

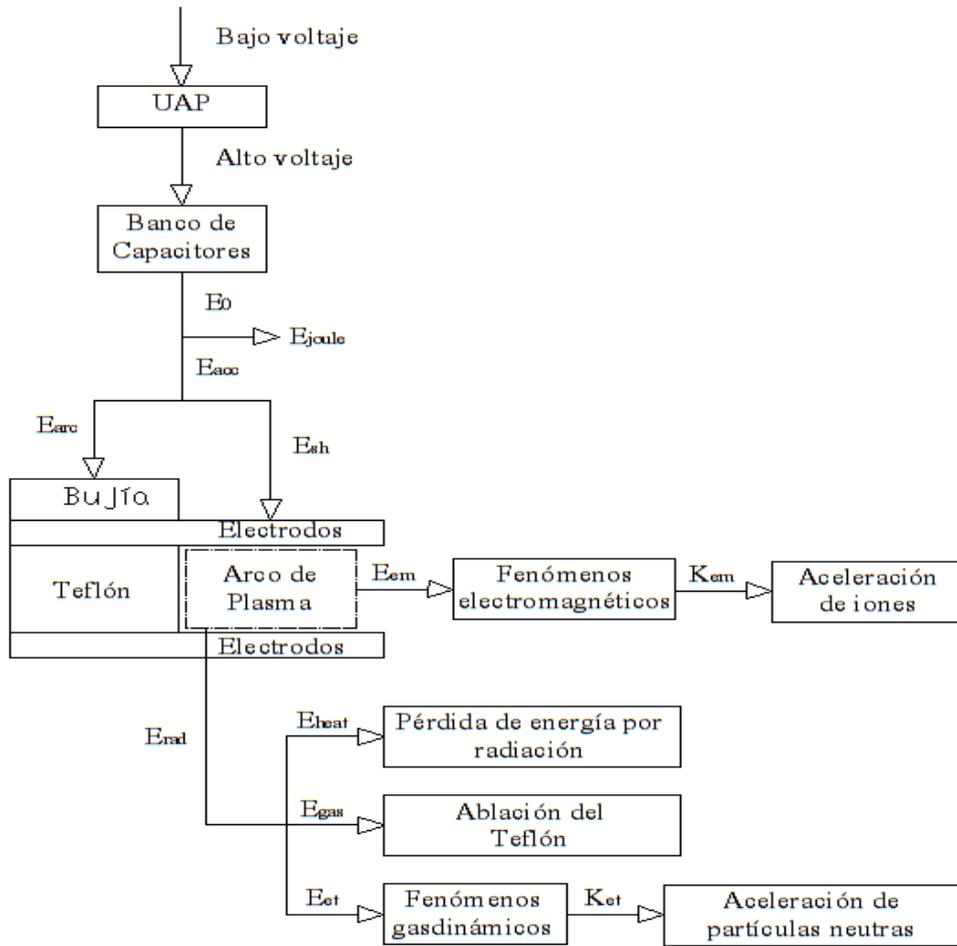


Figura 3: Balance de energías en un PPPA.

Luego de expresar cada una de las energías que intervienen en función de  $E_0$  y/o de eficiencias energéticas  $\eta$ , queda:

$$E_0 = (1 - \eta_{trans})E_0 + (1 - \eta_{sh})\eta_{trans}E_0 + (1 - \alpha_A)(\eta_{trans}\eta_{sh}E_0 - E_{em}) + me_{gas} + C_{em}\frac{E_0^2}{m} + \frac{m}{C_{et}} \quad (2)$$

En la ecuación anterior  $\eta_{trans}$  es la eficiencia en las líneas de transmisión,  $\eta_{sh}$  es la relación entre la energía que es utilizada para la generación del arco y la que ingresa a la cámara de aceleración,  $\alpha_A$  es la relación entre el área expuesta del Teflón y el área de radiación del arco, mientras que  $C_{em}$  y  $C_{et}$  son dos constantes que caracterizan la aceleración electromagnética y gasdinámica.

### 3.3 Cálculo de la masa ablacionada

Si de la ecuación anterior (Ec. 2) despejamos la masa ablacionada  $m$ , obtenemos:

$$m = \frac{\alpha_A\eta_{trans}\eta_{sh}E_0 \pm \sqrt{(\alpha_A\eta_{trans}\eta_{sh}E_0)^2 - 4\alpha_A C_{em}E_0^2(e_{gas} + C_{et}^{-1})}}{2(e_{gas} + C_{et}^{-1})} \quad (3)$$

Como esta ecuación depende del espesor de arco  $\delta$  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 ( $\alpha_A$ ), se introduce el concepto de “espesor de arco ideal”, el cual es un parámetro que verifica la hipótesis 9) y además anula el radicado de la Ec. 3, simplificando dicha ecuación y dando lugar a un único valor de masa ablacionada, es decir:

$$m = \frac{\alpha_A \eta_{trans} \eta_{sh} E_0}{2(e_{gas} + C_{et}^{-1})} \quad (4)$$

Como se podrá apreciar, el proceso de obtener la masa ablacionada resultará iterativo. Inicialmente se obtiene el espesor de arco que verifique  $E_{arc} = 2E_{em}$  y luego se verifica que  $T_{plasma} = T_{rad}$ . En la Figura 4 se presenta de manera esquemática este procedimiento.

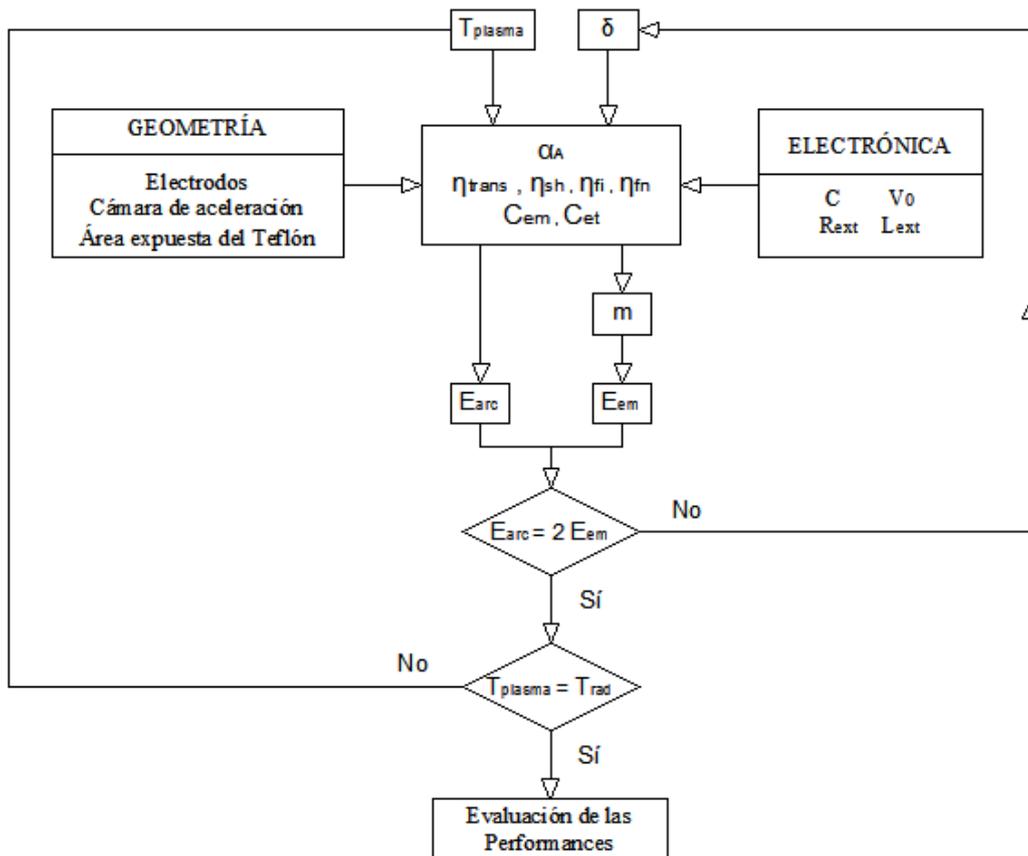


Figura 4: Determinación del espesor de arco ideal en el MCDM.

De esta manera, para poder calcular el espesor de arco ideal y correr el modelo será necesario ingresar y conocer los siguientes parámetros:

- 1) Tipo de alimentación del teflón (Breech-Fed o Side-Fed).
- 2) Área expuesta del Teflón.
- 3) Geometría de los electrodos (coaxial o paralela) y de la cámara de aceleración.
- 4) Parámetros Eléctricos (capacidad  $C$ , voltaje de operación del capacitor  $V_0$ , resistencia equivalente del banco de capacitores  $R_{ESR}$ , resistencia de las líneas de transmisión  $R_{trans}$ , inductancia del banco de capacitores  $L_c$ , e inductancia de las líneas de transmisión  $L_{trans}$ ).
- 5) Constantes físicas ( $e_{gas}$ , constante universal de los gases ideales  $R$ , y la constante de Stephan Boltzman  $\sigma$ ) y parámetros invariantes (relación de calores específicos  $\gamma$ , porcentaje de masa iónica ablacionada  $\alpha_i$ , masa atómica de los productos neutros del plasma  $M$ , y la resistividad del plasma  $\rho_{ppt}$ ).

En la Fig. 4,  $\eta_{fi}$  y  $\eta_{fn}$  son las eficiencias de los flujos congelados de la materia ionizada y neutra

respectivamente, de acuerdo con [4,12].

### 3.4 Cálculo de la temperatura de radiación

La temperatura de radiación  $T_{rad}$  surge del balance de energías presentado en la Figura 3, del cual tenemos que:

$$E_{arc} = E_{em} + E_{rad} \quad (5)$$

Luego, como  $E_{rad} = \varepsilon\sigma A_{rad}T_{rad}^4 t_{rad}$ , despejando  $T_{rad}$  obtenemos:

$$T_{rad} = \left( \frac{E_{arc} - E_{em}}{\varepsilon\sigma A_{rad} t_{rad}} \right)^{1/4} \quad (6)$$

Siendo  $t_{rad}$  el tiempo de radiación el cual se toma igual a un cuarto del período  $T_{RLC}$ , que surge de analizar el circuito equivalente mostrado en la Figura 2, es decir:

$$t_{rad} = \frac{T_{RLC}}{4} = \frac{\pi}{2} \left[ \frac{1}{L_{tot}C} - \left( \frac{R_{tot}}{2L_{tot}} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (7)$$

### 3.5 Impulso producido durante un pulso

El bit impulso  $I_{bit}$ , lo podemos obtener como la suma del aporte magnetodinámico y gasdinámico, es decir:

$$I_{bit} = \frac{L'_{ppt}E_0}{2R_{tot}} + \alpha_n m a \quad (8)$$

En la cual  $a$  es la velocidad del sonido,  $\alpha_n$  es la proporción de masa neutra en relación a 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.

## 4. APLICACIÓN DEL MODELO CERO DIMENSIONAL MODIFICADO

Los resultados obtenidos en [11] al aplicar el MCDM se muestran en la Tabla 1. Los motores estudiados son el Les-6 de acuerdo con [13,14], el XPPT-1 según [15], el APPT de acuerdo con [16], y el PPT-4 según [17]. Los dos primeros motores tienen una alimentación del tipo Breech-Fed, mientras que los dos últimos, del tipo Side-Fed. La Geometría de electrodos y cámara de aceleración es del tipo rectilínea o paralela para los tres primeros motores mencionados anteriormente, mientras que para el último, es de tipo coaxial.

Parámetros	LES-6	XPPT-1	PPPA	PPT-4
$m_{exp}$ [ugr]	10	28,5	1780	45
$I_{exp}$ [uNs]	31,2	279,5	17000	252
$M_{mod}$ [ugr]	5,03	31,3	1839,14	42,53
$I_{mod}$ [uNs]	29,84	190,98	13215,41	255,41
$e_m$ [%]	50%	10%	3%	5%
$e_l$ [%]	4%	32%	22%	1%

Tabla 1: Resultados obtenidos utilizando el MCDM

Como se puede ver, el error promedio en la masa ablacionada es de 17% mientras que respecto al bit impulso, es de 15%. En la Tabla 2 siguiente se muestran los valores de los parámetros de entrada utilizados para obtener los resultados que figuran en la Tabla 1:

Variable	$\gamma$	$\varepsilon$	$z$	$n_{sh}$	$n_{fn}$	$n_{fi}$	$\alpha_n$
Valor	1,40	0,30	1,00	0,95	0,15	0,68	0,90

Tabla 2: Parámetros de entrada utilizados

## 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Utilizando el MCDM se realiza un análisis de sensibilidad en relación a la masa ablacionada y el bit impulso, respecto a los siguientes parámetros de entrada:

- Eficiencia en las vainas de potencial ( $\eta_{sh}$ )
- Eficiencia de flujo congelado de la materia neutra ( $\eta_{fn}$ )
- Eficiencia de flujo congelado de la materia ionizada ( $\eta_{fi}$ )
- Relación de masa neutra y masa total ( $\alpha_n$ )

En cuanto a la relación de calores específicos, la emisividad y el grado de ionización se toma  $\gamma = 1.4$ ,  $\varepsilon = 0.3$  y  $z = 1$ , de acuerdo con [9,11].

### 5.1 Análisis de la eficiencia en las vainas de potencial ( $n_{sh}$ )

La eficiencia en las vainas de potencial puede asumirse entre 0.9 y 0.98 según [4], sin embargo se analiza su influencia en el cálculo de las performances variando dicho parámetro entre 0.5 y 1. En las Figuras 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos:

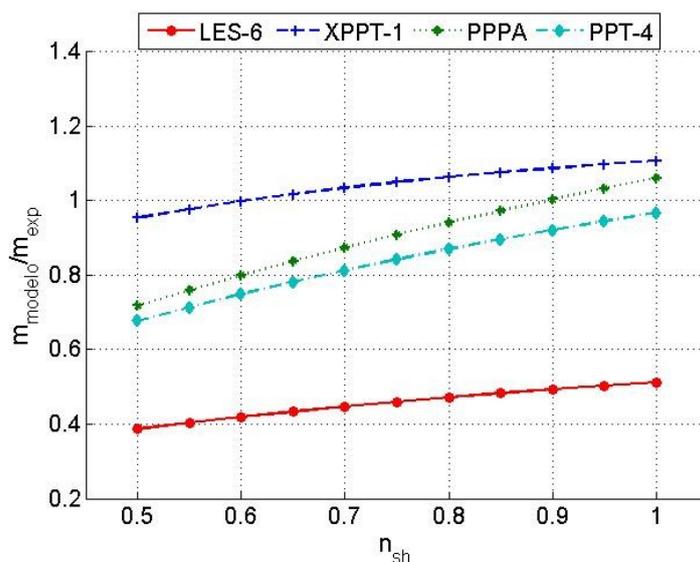


Figura 5: Masa ablacionada en función de  $n_{sh}$  utilizando el MCDM.

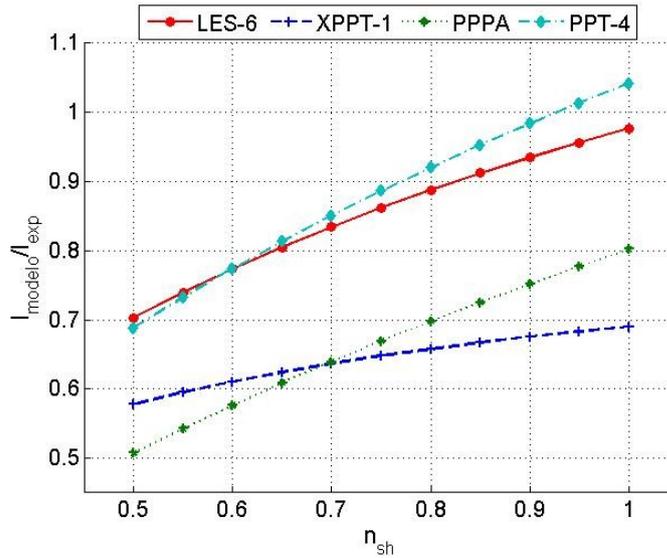


Figura 6: Bit Impulso en función de  $n_{sh}$  utilizando el MCDM.

Como se puede ver de las figuras anteriores, el valor de  $n_{sh}$  tiene una gran influencia en el cálculo de las performances. En tal sentido, a medida que aumenta  $n_{sh}$ , también lo hace la masa ablacionada y el bit impulso. Por otro lado, se aprecia que el valor de  $n_{sh} = 0.95$  utilizado en el modelo base es un valor adecuado para obtener buenas estimaciones.

## 5.2 Análisis de la eficiencia de flujo congelado de la materia neutra ( $\eta_{fn}$ )

La eficiencia de flujo congelado para la materia neutra puede tomarse igual a  $\eta_{fn} = 0.15$  de acuerdo con [4], que reporta estos y otros valores de parámetros para el motor LES-6. Si bien este valor puede tomarse como valor de referencia, no necesariamente aplicaría a otros motores de geometría similar o distinta. Es por ello que se analiza la influencia de este parámetro en la determinación de la masa ablacionada y el bit impulso. Se realizan simulaciones utilizando el MCDM variando  $\eta_{fn}$  desde 0.05 a 0.3. En las Figuras 7 y 8 se muestran los resultados.

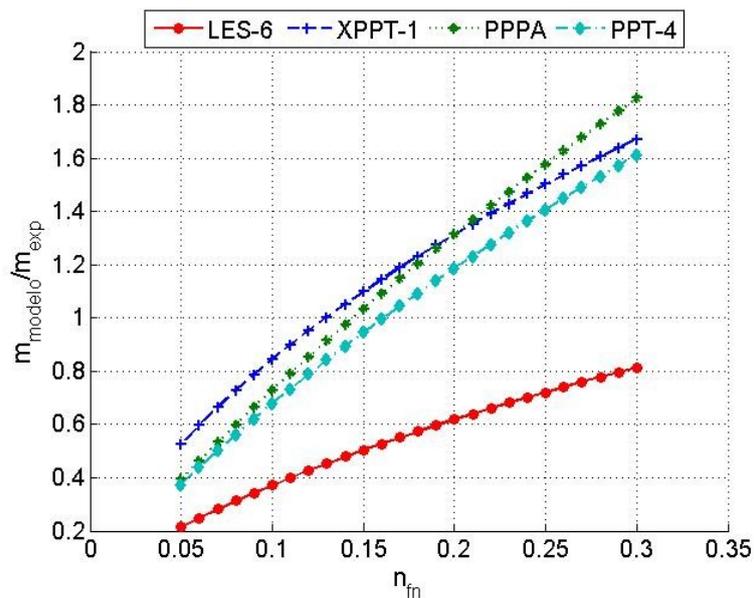


Figura 7: Masa ablacionada en función de  $\eta_{fn}$  utilizando el MCDM.

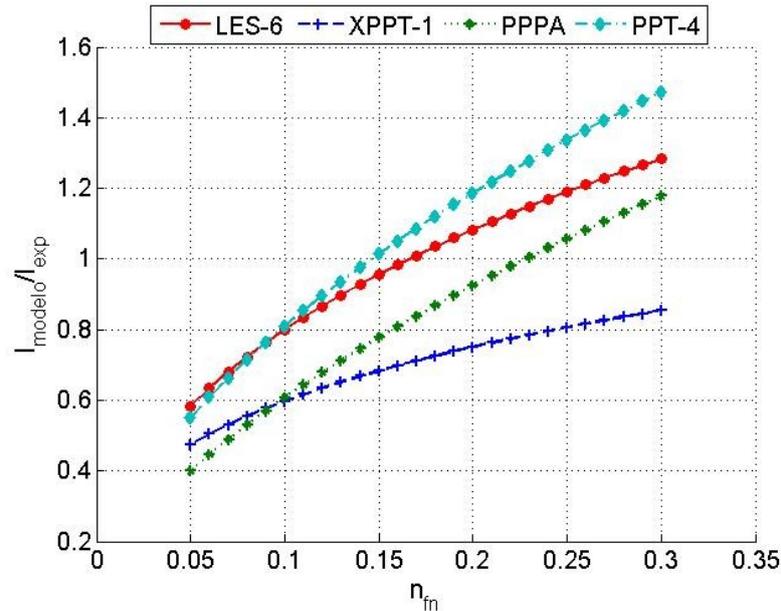


Figura 8: Bit Impulso en función de  $n_{fn}$  utilizando el MCDM.

Como vemos en las figuras anteriores, la variable  $n_{fn}$  tiene una gran influencia en la determinación de las performances. También se observa que utilizar  $n_{fn} = 0.15$  es un valor de compromiso que en promedio nos permite obtener buenas estimaciones de la masa y el bit impulso.

### 5.3 Análisis de la eficiencia de flujo congelado de la materia ionizada ( $\eta_{fi}$ )

La eficiencia de flujo congelado para la materia ionizada puede tomarse igual a  $n_{fi} = 0.68$  según [4], que reporta estos y otros valores de parámetros para el motor LES-6. Al igual que en el caso anterior, este valor puede tomarse como valor de referencia, sin embargo no necesariamente aplicaría a otros motores de geometría similar o distinta. Es por ello que se analiza la influencia de este parámetro en la determinación de la masa ablacionada y el bit impulso. Se realizan simulaciones utilizando el MCDM variando  $n_{fi}$  desde 0.3 a 0.98. En las Figuras 9 y 10 se muestran los resultados.

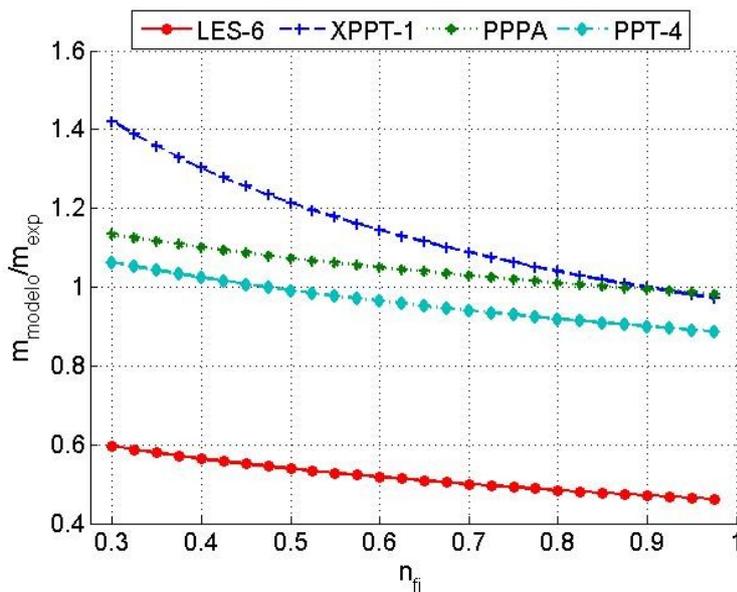


Figura 9: Masa ablacionada en función de  $n_{fi}$  utilizando el MCDM.

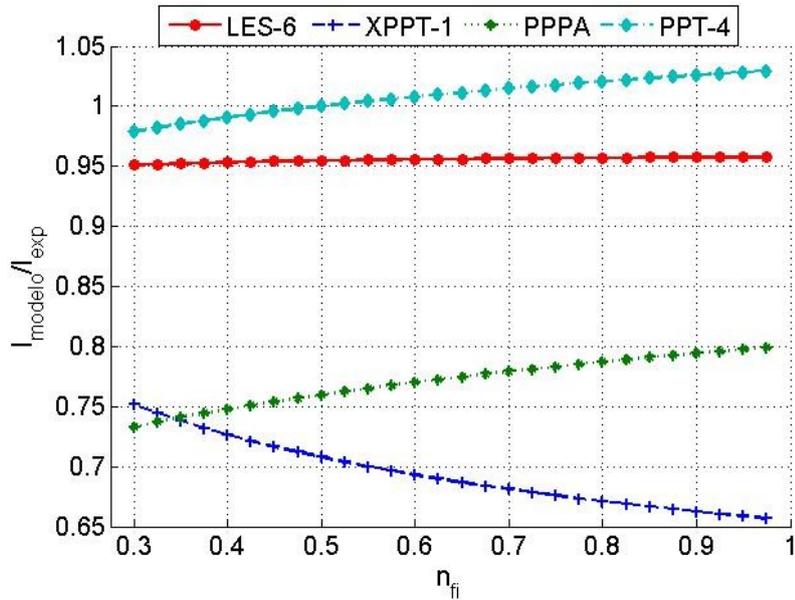


Figura 10: Bit Impulso en función de  $n_{fi}$  utilizando el MCDM.

Como se puede ver en las figuras anteriores, la masa ablacionada disminuye al aumentar  $n_{fi}$  mientras que el bit impulso aumenta excepto para el caso del motor XPPT-1. Se observa que la variable  $n_{fi}$  tiene mayor influencia en el motor antes mencionado que en el resto de los propulsores analizados. Por otro lado, se ve que utilizar  $n_{fi} = 0.68$  es un valor de compromiso que en promedio nos permite obtener buenas estimaciones de la masa y el bit impulso.

El motivo de que el bit impulso aumente mientras que la masa ablacionada disminuye a medida que crece  $n_{fi}$ , se debe a que la componente magnetogasdinámico  $\frac{L'_{ppt}E_0}{2R_{tot}}$  del bit impulso aumenta, es decir,  $R_{tot}$  disminuye.

#### 5.4 Análisis de la relación masa neutra y masa total ( $\alpha_n$ )

En este caso se ha reportado un valor de  $\alpha_n = 0.9$  para el motor LES-6 de acuerdo con [4]. Para evaluar su efecto se realizaron simulaciones utilizando el MDCM variando dicho parámetro entre 0.5 y 0.95. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 11 y 12.

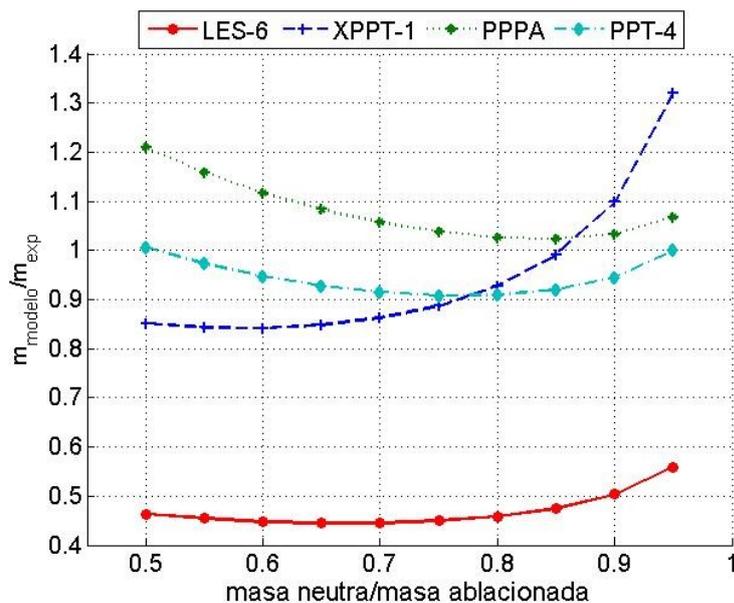


Figura 11: Masa ablacionada en función de  $\alpha_n$  utilizando el MCDM.

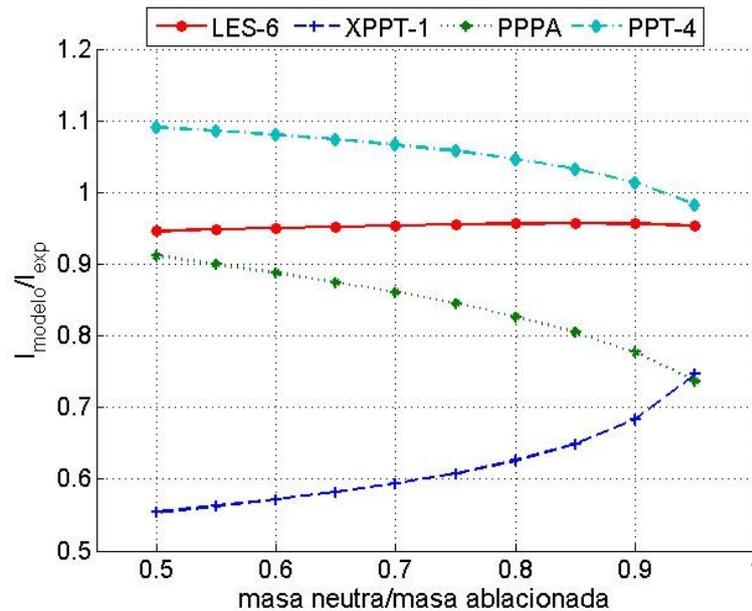


Figura 12: Bit Impulso en función de  $\alpha_n$  utilizando el MCDM.

De acuerdo a la Figura 11, se puede ver que al comienzo la masa ablacionada disminuye hasta llegar aproximadamente a  $\alpha_n = 0.8$  para luego comenzar a aumentar, excepto para el motor XPPT-1 en el cual la masa ablacionada aumenta en todo el rango de variación de  $\alpha_n$ . En el caso del bit impulso, este disminuye o se mantiene aproximadamente constante al aumentar  $\alpha_n$ , excepto para el motor XPPT-1 en el cual el bit impulso aumenta. Por último, se observa que utilizar  $\alpha_n = 0.9$  es un valor de compromiso que en promedio nos permite obtener buenas estimaciones.

## 6. CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis de sensibilidad utilizando el MCDM respecto a la eficiencia en las vainas de potencial, la eficiencia de flujo congelado de la materia neutra e ionizada, y la relación de masa neutra a masa ablacionada. Se ha encontrado que en general todas estas variables tienen una gran influencia en la determinación de la masa ablacionada y del bit impulso, por lo cual para obtener mejores estimaciones habría que conocer con anterioridad sus valores lo que llevaría a realizar ensayos para cada motor o simulaciones numéricas más complejas.

Si se analizan con más detalle los resultados obtenidos se podrá apreciar que no es posible adoptar un rango de variación acotado de algún parámetro que estime con un error menor a los presentados en la Tabla 1 la masa ablacionada y el bit impulso para los cuatro motores analizados, es decir, si se adopta un valor de una variable, por ejemplo  $n_{fn} = 0.16 - 0.22$ , para que ajuste bien la masa ablacionada, estos valores de  $n_{fn}$  no ajustaran bien el bit impulso, y viceversa. Por otro lado, no es posible mediante el ajuste de una única variable ajustar los resultados numéricos obtenidos con los resultados experimentales.

Debido a la alta sensibilidad del modelo y la incertidumbre en el valor de muchos de los parámetros de entrada del mismo, se considera que es necesario recurrir a simulaciones computacional más complejas y validar las mismas con resultados experimentales o en la literatura específica, de manera de estimar con una mejor aproximación los valores de las variables de entrada a este tipo de modelos simplificados.

## REFERENCIAS

- [1] R. Burton and P. Turchi, "Pulsed Plasma Thruster," *Journal of Propulsion and Power*, 1998, Vol. 14, No. 5, pp. 716-735.
- [2] R. Myers and R. Cassady, "Overview of Mayor U.S. Industrial Program in Electric Propulsion," *AIAA*, 1998, pp. 98-3179.
- [3] R. Vondra and K. Thoassen, "Flight qualified pulsed plasma thruster for satellite control," *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1974, Vol. 11, No. 9, pp. 613-617.
- [4] R. Burton, M. Wilson and S. Bushman, "Energy Balance and Efficiency of the Pulsed Plasma Thruster,"

- AIAA*, Cleveland, 1998.
- [5] C. Rayburn, M. Campbell, W. Hoskins and R. Cassady, "Development of a Micro Pulsed Plasma Thruster for the Dawgstar Nanosatellite," *AIAA*, 2000, pp. 2000–3256.
- [6] M. Andrenucci, R. Lenci, V. Naso and R. Melli, "Design of Solid-Propellant MPD thrusters," *IEPC*, 14th, 1979.
- [7] E. Choueiri, "Scaling of Thrust in Self-Field Magnetoplasmadynamic Thrusters", *Journal of Propulsion and Power*, 1998, pp. 744-753.
- [8] C. Brito, S. Elaskar, H. Brito and N. Paoletti, "Zero-Dimensional Model for Preliminary Design of Ablative Pulsed Plasma Thrusters," *Journal of Propulsion and Power*, 2004, pp. 970-977.
- [9] N. Paoletti, S. Elaskar and H. Brito, "Aplicación del Modelo Cero Dimensional para el Cálculo de Performances del Propulsor de Plasma Pulsante Ablativo de Teflón P<sup>4</sup>S," *Mecánica Computacional*, 2004, Vol. 23, pp. 2561-2573.
- [10] L. Spitzer, *Physique des gas completamente ionisés*. Dunod, París, 1959.
- [11] E. Gómez and S. Elaskar, "Simulación Numérica de Propulsores de Plasma Pulsantes Ablativos de Teflón Mediante un Modelo Cero Dimensional". *Mecánica Computacional*, 2016, Vol. 34 (en revisión).
- [12] R. Jahn, *Physics of Electric Propulsion*. McGraw-Hill Book Co., 1968.
- [13] P. Turchi, I. Mikellides, P. Mikellides and C. Schmahl, "Theoretical Investigation of Pulsed Plasma Thrusters," *AIAA*, 1998, pp. 98-3807.
- [14] P. Mikellides and P. Turchi, "Modeling of Late-Time Ablation in Teflon Pulsed Plasma Thrusters," *AIAA*, 1996, pp. 96-2733.
- [15] G. Spanjers, K. McFall, F. Gulczinski, and R. Spores, "Investigation of Propellant Inefficiencies in a Pulsed Plasma Thruster," *AIAA*, 1996, pp. 96-2723.
- [16] D. Palumbo and W. Guman, "Effects of Propellant and Electrode Geometry on Pulsed Ablative Plasma Thruster Performance," *AIAA*, 1975, pp. 75-409.
- [17] S. Bushman, R. Burton and E. Antonsen, "Arc Measurements and Performance Characteristics of a Coaxial Pulsed Plasma Thruster," *AIAA*, 1998, pp. 98-3660.