

ANÁLISIS TEÓRICO DE PROPULSORES DE PLASMA PULSANTES ABLATIVOS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

THEORETICAL ANALYSIS OF ABLATIVE PULSED PLASMA THRUSTERS AND VALIDATION OF RESULTS

Matías Agüero^a, Emmanuel Gomez^b, Walter Castello^a y Sergio Elaskar^c

^a *Depto. de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina, <http://www.dep.estructuras.efn.uncor.edu>*

^b *Depto. de Aeronáutica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina, ewgomez@unc.edu.ar*

^c *Depto. de Aeronáutica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales e Instituto de Estudios Avanzados, CONICET y Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina, selaskar@unc.edu.ar*

Palabras clave: Propulsor de plasma pulsante, ionización, magnetohidrodinámica, bit de impulso.

Resumen. Los Propulsores de Plasma Pulsantes Ablativos (APPT por sus siglas en inglés) poseen simpleza constructiva, alto impulso específico, bajo impulso unitario, bajo peso, reducidos requerimientos de potencia y no necesitan empaquetamiento de combustible. En este trabajo se presenta la etapa inicial de una herramienta computacional y los resultados obtenidos con la misma, para modelar el comportamiento de APPT inestacionarios, lo que permite una caracterización de su performance. La herramienta trabaja con un modelo unidimensional, haciendo uso de las ecuaciones del electromagnetismo y de la mecánica de los fluidos para poder describir la evolución de la lámina de plasma. Inicialmente se consideran sólo las fuerzas electromagnéticas y luego con mejoras en el modelo también se representan las fuerzas gas dinámicas existentes. Adicionalmente, se deja de considerar la resistencia de la lámina de plasma como constante, ya que varía según la temperatura, la densidad de electrones, el tiempo de descarga y la relación geométrica de la cámara del propulsor.

Keywords: Pulsed Plasma Thrusters, ionization, magneto-hydro-dynamics, impulse bit.

Abstract. Ablative Pulsed Plasma Thrusters (APPT) have simplicity of construction, high specific impulse, low unit impulse, low weight, low power requirements, and do not require fuel packaging. This paper presents the initial stage of a computational tool and the results obtained with it, to model the behavior of unsteady APPT, which allows a characterization of its performance. The tool works with a one-dimensional model, making use of the equations of electromagnetism and fluid mechanics to describe the evolution of the plasma sheet. Initially only the electromagnetic forces are considered and later with improvements in the model the existing dynamic gas forces are also represented. Furthermore, the resistance of the plasma sheet is no longer considered to be constant, since it varies with temperature, electron density, discharge time, and the geometrical relationship of the propellant chamber.

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este trabajo es la simulación numérica del comportamiento de una lámina de plasma de un Propulsor de Plasma Pulsante (PPT por sus siglas en inglés) y el estudio paramétrico del mismo. Los propulsores de plasma pulsantes, son dispositivos capaces de ionizar y acelerar el propelente para producir empuje. Este último se produce por medio de efectos electromagnéticos y gas dinámicos. En general, son utilizados para realizar correcciones de órbita y controles de actitud en pequeños satélites debido a su capacidad de producir un reducido bit impulso y relativamente elevado impulso específico (comparado con otras formas de propulsión). El teflón tiene la ventaja de ser inerte y no tóxico, lo que le da al sistema PPT el beneficio adicional de ser uno de los sistemas de propulsión más seguros (Rayburn Ch., Campbell M., Hoskins W. and Cassady, 2000), sin embargo, poseen una baja eficiencia, alrededor del 12%, aunque teóricamente podrían alcanzar el 60% (Brito C., Elaskar S., Brito H. and Paoletti N., 2004; Gomez E. and Elaskar S., 2016; Gomez, 2018).

La Figura 1 muestra el esquema general de un PPT y de sus componentes principales. La unidad auxiliar de energía (UAP) provee energía al capacitor para cargarlo, el teflón es alimentado por dos electrodos (ánodo y cátodo). La bujía se usa como iniciador de la descarga de corriente o arco eléctrico, la elevada temperatura en cercanías de la lámina de corriente permite la ablación del teflón y la ionización del gas resultante, el cual luego es eliminado mediante fuerzas electromagnéticas y en menor proporción por fuerzas gas dinámicas.

En este trabajo se describen modelos teóricos electromecánicos (RLC) unidimensionales. El primer modelo utiliza una ecuación circuital y la segunda ley de Newton para el movimiento de la lámina de plasma (Laperriere, 2005). El segundo modelo se basa en el modelo anterior y además, asume que detrás de la lámina existe masa acumulada, por lo que, la fuerza proviene de dos efectos, uno electromagnético y otro gas dinámico (Lei Y., Xiangyang L., Zhiwen W. and Ningfei W., 2011). Un nuevo modelo se conforma considerando que la temperatura del plasma (en equilibrio termodinámico) varía durante el pulso, este fenómeno se estudia considerando pérdidas por efecto joule y por radiación. A este modelo se le agrega el efecto sobre la densidad de electrones, mediante la ecuación de Saha (Jahn, 1968) considerando dos especies (carbono y flúor). Finalmente se utiliza un modelo que incluye la energía cinética, magnética y la potencia entregada por la Fuerza de Lorentz (Brito C., Elaskar S., Brito H. and Paoletti N. 2004; Gomez E. and Elaskar S., 2016; Gomez, 2018; Gomez E. Saravia M. Castelló W. and Elaskar S, 2021; Gomez E., Saravia M., Castelló W. and S. Elaskar, 2022). Con estos modelos pueden obtenerse los valores característicos de este tipo de propulsores, para una mejor comparación se muestran el impulso específico, el bit de impulso, la velocidad del plasma y la cantidad de masa ablacionada, y se comparan estos datos entre sí.

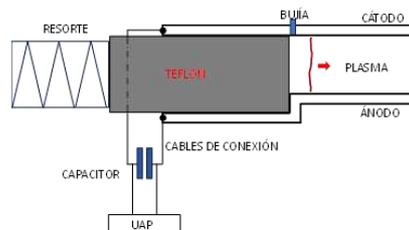


Figura 1: Esquema general de un propulsor de plasma pulsante.

2 TIPO DE PROPULSOR

El propulsor de plasma pulsante pertenece al grupo general de propulsión eléctrica y dentro de este, a los propulsores del tipo electromecánico. Además, estos propulsores suelen clasificarse según la disposición de los electrodos o configuración geométrica: PPT de electrodos paralelos y PPT de electrodos coaxiales. Según la forma de alimentación tendremos: PPT de alimentación longitudinal y PPT de alimentación lateral (Gomez, 2018). En este trabajo se describen los modelos y se muestran resultados de una configuración de cámaras paralelas y con alimentación longitudinal. Los PPT de electrodos paralelos son el tipo de configuración más simple que se puede concebir la cual queda definida por su altura h , su ancho w y su longitud l , parámetros que a su vez determinan el valor de inductancia de los electrodos. Una de las desventajas de este tipo de configuración es la existencia de filos o puntas en las extremidades de los electrodos que pueden provocar distorsiones importantes en el campo de inducción magnético. En el caso de alimentación longitudinal, el propelente se dispone en una única barra en la dirección en la que el propulsor produce empuje.

3 CONCEPTOS FÍSICOS BÁSICOS

Aunque simple en su realización, el PPT une muchas interacciones complejas resultantes de procesos electromagnéticos, electrotérmicos y gas dinámicos. Para la ignición normalmente se utiliza un elemento semiconductor (bujía). La energía y la masa asociadas con el funcionamiento de la bujía son despreciables. La descarga inicial debe causar una suficiente ablación del propelente para sostener las elevadas corrientes, esta descarga es convertida rápidamente en un arco eléctrico. Al inicio del pulso de corriente la descarga suele presentar filamentos y puntos de descarga sobre los electrodos, debido a bajas corrientes y a las bajas presiones. En cuanto incrementa la corriente, aumentan las condiciones para un arco eléctrico difuso, es decir, existe un mejor transporte de calor aguas abajo de la descarga. Experimentalmente se ha encontrado que el arco se concentra en el centro del teflón, es decir existe una ablación no uniforme. El plasma se encuentra compuesto por electrones y partículas pesadas, en una condición de cuasi-neutralidad. La temperatura de los electrones depende de un equilibrio entre el calentamiento resistivo y la pérdida de energía por colisión, principalmente en los estados internos de las partículas pesadas y la radiación. Las condiciones de desequilibrio existen en diversos grados y tipos porque el vacío aguas abajo permite bajas densidades de partículas y altas velocidades de flujo. En las inmediaciones de la superficie propulsora, donde las velocidades son bajas y las densidades son altas, existen más oportunidades para el equilibrio termodinámico local (LTE). La masa de la superficie propelente, que no es acelerada por efecto electromagnético, puede proporcionar contribuciones adicionales por efectos gas dinámicos. La resistencia calórica en la descarga mantiene su alta temperatura, suministrando energía al propelente por conducción y por radiación, lo que libera una fracción de material adicional. La transferencia de energía hacia el propulsor, la estructura y el espacio representa la energía no utilizada para ablacionar el teflón y depende de la posición de la descarga (bujía). Para comprender el comportamiento de este complejo fenómeno, es necesario el uso de las ecuaciones de la dinámica del plasma, las ecuaciones de transporte y de las ecuaciones de circuito eléctrico. Finalmente se destaca que los gradientes de presión magnética pueden invertirse cuando la corriente del circuito disminuye, afectando negativamente el rendimiento (Burton, 1998).

3.1 Propagación del plasma

En general, para modelar la propagación del plasma se tienen dos modelos matemáticos, modo 'SLUG (lámina)' y el modo 'SNOWPLOW (barrido)', ambos modelos están

caracterizados por un parámetro de carga de distribución de masa, el cual es igual a la unidad cuando el modo es 'SLUG' y es nulo cuando se trata del modo 'SNOWPLOW' (Laperriere, 2005). En este trabajo, se muestran los resultados obtenidos con el modo SLUG. En este modo, se considera que la masa de la lámina de plasma generada por la descarga de corriente no cambia su valor en el tiempo y se desplaza en una cámara de aceleración que se encuentra inicialmente vacía, es decir, sin masa previa. El propelente se dispone en forma de barra sólida ubicada al comienzo de la cámara de aceleración. Al iniciarse la descarga principal, una parte de la superficie del propelente sólido es ablacionada y convertida en plasma. Luego, la lámina de corriente o plasma es acelerada hacia la salida como consecuencia de la interacción entre el campo eléctrico entre los electrodos y el campo magnético generado por la circulación de corriente sobre el circuito, sin embargo, como no había previamente propelente en la cámara de aceleración, la masa de la lámina se considera constante en el tiempo (primera aproximación). El condensador se descarga antes de que el gas propulsor haya tenido suficiente tiempo para expandirse y alejarse de la parte posterior del canal.

4 MODELOS ELECTROMECAÑICOS

Para obtener las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del PPT unidimensional, es necesario plantear la ecuación de Kirchhoff, la ecuación de movimiento de Newton y la ecuación para la propagación de la masa de plasma (es decir tres ecuaciones de gobierno). El caso más simple es un RLC de parámetros variables, no obstante, se debe asumir el modo de operación de la lámina de plasma y en función de ello, los valores de masa y de densidad inicial del plasma, además se debe suponer que la resistencia del plasma es constante, al igual que la temperatura y la densidad de electrones. Laperriere considera que, el proceso de aceleración y los componentes del circuito del PPT, pueden modelarse como un sistema dinámico que interactúa con un sistema eléctrico, es decir, como un sistema electromecánico (ver Figura 2). Ahora se deben agregar algunas suposiciones, por ejemplo, que el ancho de la cámara es mucho mayor que el alto de la misma, que los componentes del circuito son perfectamente conductores, que la lámina de plasma es de espesor despreciable y con distribución de densidad de corriente uniforme (Laperriere, 2005). Aparece una ecuación para sumarse a las tres del modelo más simple, esta ecuación permite modelar la resistencia del plasma y se encuentra en función de la geometría de la cámara, la temperatura del plasma, la densidad de electrones y del tiempo de descarga de la corriente (parámetros constantes en este modelo). Lei Yang asume que después de formarse la lámina de plasma y acelerarse aguas abajo, se acumula masa adicional en la cámara, por lo que la fuerza dentro del PPT proviene de la aceleración del gas debido a la acumulación de presión dentro del cámara y debido a la aceleración magnética. La ablación de tiempo tardío (LTA) es la sublimación del propelente que tiene lugar después de la descarga principal, debido a que la temperatura del propulsor está por encima de su punto de sublimación, y se la considera como uno de los principales contribuyentes a la baja eficiencia de la PPT. Por lo tanto, este modelo también analiza el impacto de LTA sobre el rendimiento de PPT (Lei Y., Xiangyang L., Zhiwen W. and Ningfei W., 2011). El siguiente modelo utilizado, considera la variación de la temperatura debido a pérdidas por efecto joule y por radiación, permitiendo mejorar el modelo de la resistencia del plasma, aunque la densidad de electrones y al tiempo de descarga permanecen sin cambios. En cuarto lugar, además de las expresiones anteriores, se va a considerar la ecuación de Saha considerando dos especies (carbono y flúor), esto nos permite modelar la densidad de electrones en función de la temperatura. Por último, al modelo anterior se le añaden los efectos de la fuerza electromotriz sobre la variación de la temperatura, permitiendo tener un modelo más realista del propulsor (Gomez, 2018).

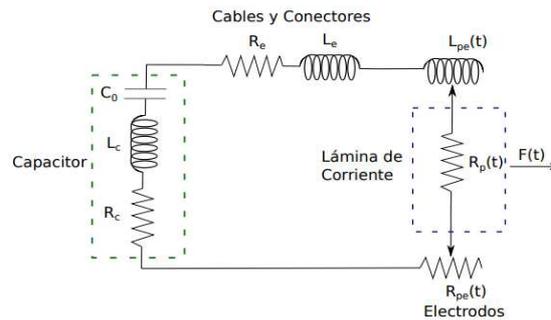


Figura 2: Modelo de PPT (Laperriere, 2005; Gomez, 2018)

5 RESULTADOS

Para mayor comodidad, los cinco modelos mencionados en la Sección 4, serán llamados Modelo A, Modelo B, Modelo C, Modelo D y Modelo E (según el orden en el que se los ha descrito). Al ser el Modelo E el sistema más completo, a partir de sus ecuaciones diferenciales de gobierno, pueden derivarse los modelos restantes. Se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales, ordinario, no lineal, de segundo orden y de coeficientes variables. Para resolver este sistema se trabaja con el concepto de variables de estado, el cual permite reducir el orden del sistema a cambio de tener mayor cantidad de ecuaciones para resolver. El sistema de primer orden puede ser resuelto usando la función *ode45* y la función *ode15s* de Matlab, la primera es utilizada en problemas no rígidos y la segunda función en problemas rígidos. En este trabajo, excepto por el Modelo E, los resultados obtenidos con ambas funciones no poseen diferencia numérica, ni diferencia sustancial en el tiempo de cómputo. En el caso del Modelo E, el tiempo de cómputo incrementó notablemente al usar la función *ode45*. Los principales valores utilizados para la simulación se muestran en la [Tabla 1](#).

La [Figura 3](#) muestra los resultados correspondientes al Modelo A, este modelo considera la resistencia eléctrica de la lámina de plasma como constante y es el modelo más sencillo. En la fila superior se muestran, la posición de la lámina, su velocidad y el impulso específico, mientras que en la fila inferior se muestran, la intensidad de corriente del capacitor, el voltaje del capacitor y la energía del propulsor. Para el tiempo de análisis, la lámina de plasma ha recorrido un tercio de la longitud de la cámara, con una velocidad creciente durante aproximadamente $2\mu s$, que luego permanece constante. El impulso específico y la velocidad se encuentran relacionados mediante la aceleración de la gravedad (constante), por lo que sus comportamientos son análogos. Existe un elevado pico de corriente (alrededor de los $6000A$) coincidente con el tiempo de descarga, luego de este pico la corriente disminuye rápidamente volviéndose nula aproximadamente a los $4\mu s$. El voltaje del capacitor disminuye de forma rápida volviéndose nulo a aproximadamente $4\mu s$. El gráfico correspondiente a la energía del propulsor, muestra las curvas de: energía del capacitor, energía cinética de la lámina, energía perdida por resistencia calórica (óhmica), energía debido a la inductancia del sistema y energía total del sistema, esta última es constante e igual a la suma de las anteriores en cada instante. La energía del capacitor se vuelve nula rápidamente, debido al comportamiento de la intensidad y del voltaje. La energía debido a la inductancia posee un crecimiento inicial con un máximo alrededor de los $0,6J$ y luego decae rápidamente a valores nulos. La energía cinética inicialmente crece y luego se mantiene constante (relacionada directamente con la velocidad). La energía óhmica, crece rápidamente acercándose a los valores de energía total y luego permanece constante, entonces, la mayor parte de la energía aportada al propulsor se transforma en energía perdida por efectos óhmicos y una pequeña parte se transforma en energía cinética, dando una idea del porque el bajo rendimiento de este tipo de propulsor.

Voltaje	$U_0 [V]$	1360	T. de descarga	$\tau [\mu s]$	0,326	C. de Plank	$h_p [Js]$	6,63E-34
Capacitancia	$C [\mu F]$	2	Altura	$h [mm]$	30	C. de Boltzman	$\kappa [J/K^\circ]$	1,38E-23
Inductancia	$L_{ext} [nH]$	34,96	Ancho	$w [mm]$	10	M del electron	$m_e [kg]$	9,10E-31
Resistencia	$R_{ext} [m\Omega]$	30	Largo	$l [mm]$	60	T. inicial	$t_0 [\mu s]$	0
P. magnética	$\mu_0 [H/m]$	1,3E-06	E. de ionización	$e_{ion} [J]$	1,5E-17	T. final	$t_f [\mu s]$	7
R. de calores	γ	1,3	M. de ionización	$m_{ion} [kg]$	1,7E-25	A. de gravedad	$g [m/s^2]$	9,8
C. del gas	$R [J/(kg K^\circ)]$	84,14	Emisividad	ϵ	0,3	C. de calor	$C_p [J/(kg K^\circ)]$	1,4
D. de electrones	$n_e [1/m^3]$	1E+21	C. de S.Boltzman	$\sigma [W^2/m^2W^4]$	5,7E-08	Temperatura	$T_{plasma} [K^\circ]$	17400

Tabla 1: Parámetros utilizados para la simulación.

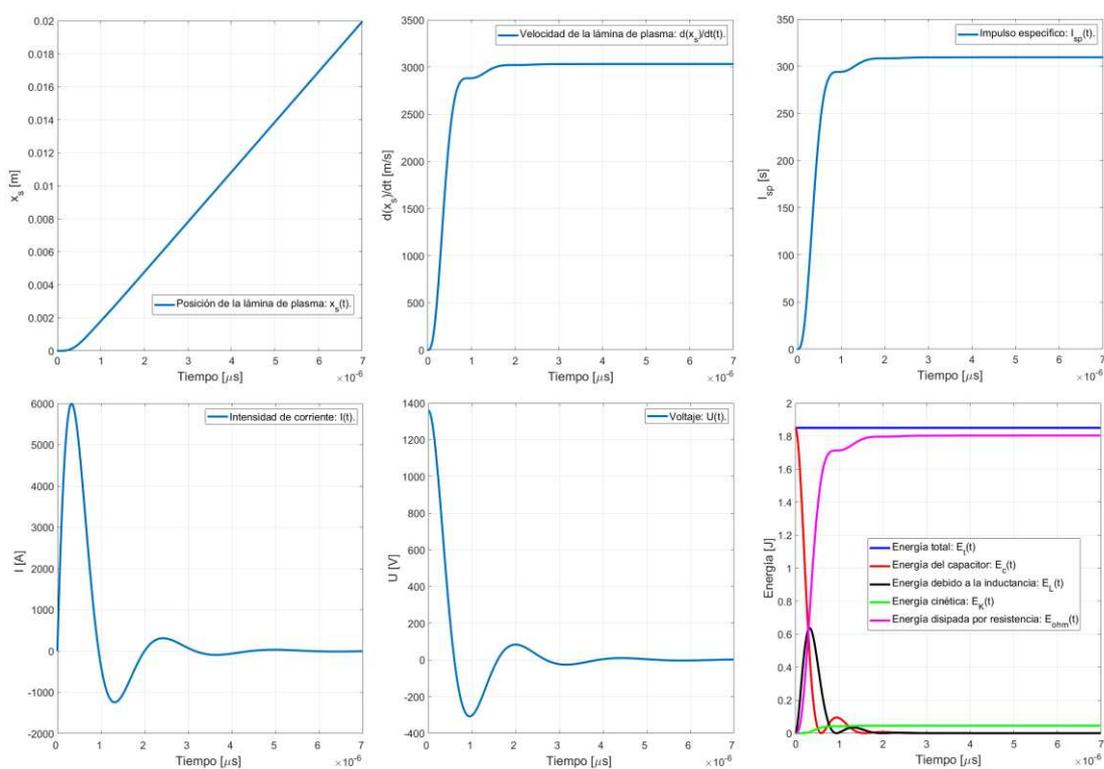


Figura 3: Resultados del Modelo A en función del tiempo. Fila superior: Posición, Velocidad e Impulso específico. Fila inferior: Intensidad de corriente, Voltaje y Energía.

El Modelo B considera el efecto de la masa ablacionada y el efecto del gradiente de presión en la cámara del propulsor, estos efectos se ven reflejados en una fuerza debida al comportamiento gas dinámico. La curva de la masa ablacionada y la curva del caudal de masa ablacionada, correspondientes al Modelo B, se presentan en la Figura 4, en ellas puede verse que luego del tiempo de descarga ($2\mu s$) la cantidad de masa ablacionada permanece constante y su flujo temporal es nulo. En la Tabla 2 se presentan los valores de la velocidad de la lámina, del impulso específico, del bit de impulso, de la masa ablacionada y del error relativo (respecto a los valores experimentales).

Previo a realizar las simulaciones con los modelos C, D y E, se trabajó individualmente con la resistencia eléctrica del plasma. La Figura 5, muestra como varía la resistencia eléctrica del plasma, de una configuración de electrodos paralelos y de alimentación longitudinal de propelente, en función de la temperatura y de los siguientes parámetros: densidad de electrones (n_e), tiempo de descarga (τ) y relación geométrica de la cámara (h/w).

La **Figura 5** muestra que cuando la temperatura incrementa, la resistencia del plasma disminuye. Para el armado de las curvas se considera que la resistencia de la lámina varía con la temperatura y con un tercer parámetro, mientras que los dos parámetros restantes permanecen fijos, los valores utilizados en la simulación son los que se muestran en la **Tabla 1**. En el gráfico de la izquierda, se mantiene fija la relación geométrica y el tiempo de descarga, mientras que la densidad de electrones tiene diferentes valores, en este caso para un valor de temperatura dado la resistencia aumenta si disminuye la densidad de electrones. En el gráfico del centro, se mantiene fija la relación geométrica y la densidad de electrones, mientras que se le dan diferentes valores al tiempo de descarga, vemos que al aumentar el tiempo de descarga la resistencia disminuye. En el gráfico de la derecha se mantiene fijo el tiempo de descarga y la densidad de electrones, mientras que la relación geométrica de la cámara toma diferentes valores, cuando esta relación crece, también lo hace la resistencia. En base a este análisis podemos decir que, los cambios geométricos son mucho más influyentes en la resistencia eléctrica del plasma, que los cambios de la densidad de electrones y del tiempo de descarga, por lo cual en el diseño de un propulsor deberá tenerse en cuenta este tipo incremento (entre otros factores).

Los resultados correspondientes al Modelo C, D y E, se presentan en la **Tabla 2**, esta tabla también muestra los valores experimentales usados (**Lei Y., Xiangyang L., Zhiwen W. and Ningfei W., 2011**), además para cada valor obtenido por los diferentes modelos, se muestra el error porcentual con respecto al valor experimental. El Modelo A no considera la masa ablacionada, por lo que en esta tabla no aparece el error correspondiente.

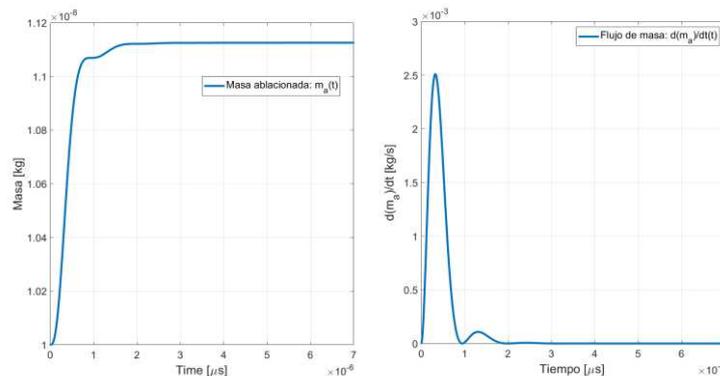


Figura 4: Masa ablacionada y flujo de masa ablacionada en función del tiempo, correspondientes al Modelo B.

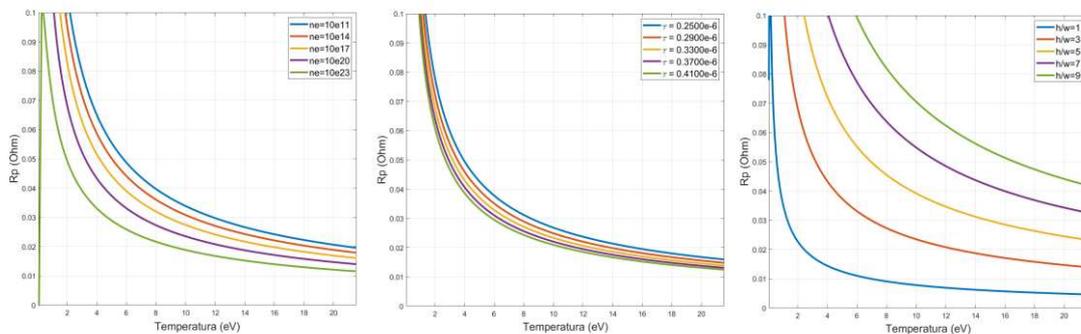


Figura 5: Variación de la resistencia eléctrica del plasma con diferentes parámetros. A la izquierda para diferentes valores de temperatura y densidad de electrones. Al centro para diferentes valores de temperatura y tiempo de descarga. A la derecha para diferentes valores de temperatura y relación geométrica de la cámara.

	Exp.	A	Error [%]	B	Error [%]	C	Error [%]	D	Error [%]	E	Error [%]
$V [m/s]$	3000,00	3032,90	1,10	2954,14	-1,53	2647,00	-11,77	2620,00	-12,67	2638,00	-12,07
$I_{sp} [s]$	300,00	309,48	3,16	301,44	0,48	270,97	-9,68	267,40	-10,87	269,68	-10,11
$I_{BIT} [\mu N s]$	31,20	30,36	-2,69	32,87	5,35	27,88	-10,64	28,07	-10,03	27,16	-12,95
$M_{abl} [\mu g]$	10,00	-	-	11,12	11,20	11,00	10,00	11,01	10,10	11,00	10,00

Tabla 2: Valores de velocidad, impulso específico, bit de impulso y masa ablacionada, obtenidos con los diferentes modelos computacionales. Los valores experimentales corresponden al LES 6.

La [Tabla 2](#) muestra que la velocidad de la lámina presenta un error, en términos absolutos, entre 2% y 12%, mientras que el error del impulso específico se encuentra en un intervalo de 0,5% a 11%, el bit de impulso posee un intervalo de error entre 2,5% a 13% y finalmente la masa ablacionada posee un error alrededor del 10%. Estos valores se encuentran en el orden de los valores encontrados en las diferentes referencias. Con los Modelos D y E, puede obtenerse la variación de la densidad de electrones según la temperatura, usando la ecuación de Saha para dos especies, además con la densidad de electrones y la temperatura también es posible obtener la presión ([Filip Rysanek and Rodney Burton, 2001](#)), estas variaciones no se muestran en este trabajo.

5.1 Variación de parámetros

En esta sección se presentan los resultados correspondientes al análisis paramétrico, se ha optado por variar la relación geométrica de la cámara, el voltaje inicial del capacitor y la capacitancia inicial del capacitor. La [Figura 6](#) muestra un ejemplo del comportamiento del voltaje del capacitor, de la intensidad del capacitor y del impulso específico, para diferentes valores del voltaje inicial. A medida que aumenta el voltaje inicial, el valor máximo de la intensidad de corriente también incrementa, como consecuencia se prolonga el tiempo de amortiguamiento (existe mayor oscilación de la corriente), además, incrementa el impulso específico, el valor de la masa ablacionada y los valores de energía, también disminuye el tiempo de duración de la lámina de plasma en la cámara.

La [Figura 6](#), solo muestra las curvas correspondientes al Modelo A (más simple), pero el mismo trabajo se ha realizado con los diferentes modelos mencionados, durante este análisis se ha encontrado que la diferencia entre los modelos C, D y E es significativa, por ejemplo en la [Tabla 2](#) se puede ver que entre estos modelos los resultados obtenidos son similares, por lo tanto, en lo que resta del trabajo sólo se muestran los resultados de uno de ellos, el Modelo E.

La [Figura 7](#) presenta la variación de la relación entre impulso específico e impulso específico de diseño y la variación de la relación entre bit de impulso y el bit de impulso de diseño, para los Modelos A, B y E (tomando como parámetros de diseño o nominales los valores experimentales mostrados en la [Tabla 2](#)).

Al aumentar el voltaje inicial, el impulso específico y el bit de impulso crecen rápidamente, por ejemplo, al duplicar el voltaje con respecto al valor nominal, el impulso específico aumenta entre 300% a 450% (según el modelo utilizado), mientras que el bit de impulso aumenta entre 400% y 450%, con respecto a los valores de diseño (según el modelo utilizado). Por el contrario, en caso de disminuir el voltaje inicial a la mitad, el impulso específico y el bit de impulso disminuyen alrededor del 50%.

La variación con respecto al valor de capacitancia inicial tiene un comportamiento más lineal, por ejemplo, al duplicar la capacitancia inicial respecto el valor nominal, se obtiene un incremento del impulso específico entre el 75% y el 100%, mientras que el bit de impulso incrementa entre el 100% y el 115% (dependiendo del modelo utilizado). Al disminuir la capacitancia a la mitad, los valores de impulso específico y de bit de impulso disminuyen alrededor de un 50%.

Finalmente, se obtuvo que, a partir de ciertos valores de la relación geométrica de la

cámara, los cambios en el impulso específico y en el bit de impulso, respecto a los valores nominales, no son elevados. Por ejemplo, al duplicar la relación h/w nominal, el incremento del impulso específico se encuentra entre el 1% y el 18%, mientras que el bit de impulso incrementa entre el 5% y el 25% (según el modelo utilizado). Para un incremento de 7 veces el valor de la relación h/w nominal, el impulso específico logra aumentos entre el 5% y el 30% y el bit de impulso aumentos entre un 12% a 38%. A partir de este valor de h/w y según el modelo utilizado, los valores de impulso específico y bit de impulso no cambian demasiado.

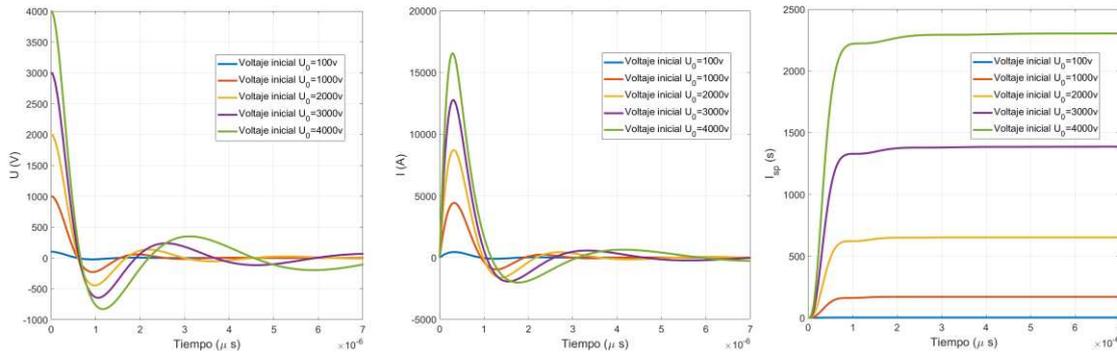


Figura 6: Variación del voltaje, intensidad e impulso específico, para diferentes valores de voltaje inicial. Las figuras corresponden al Modelo A.

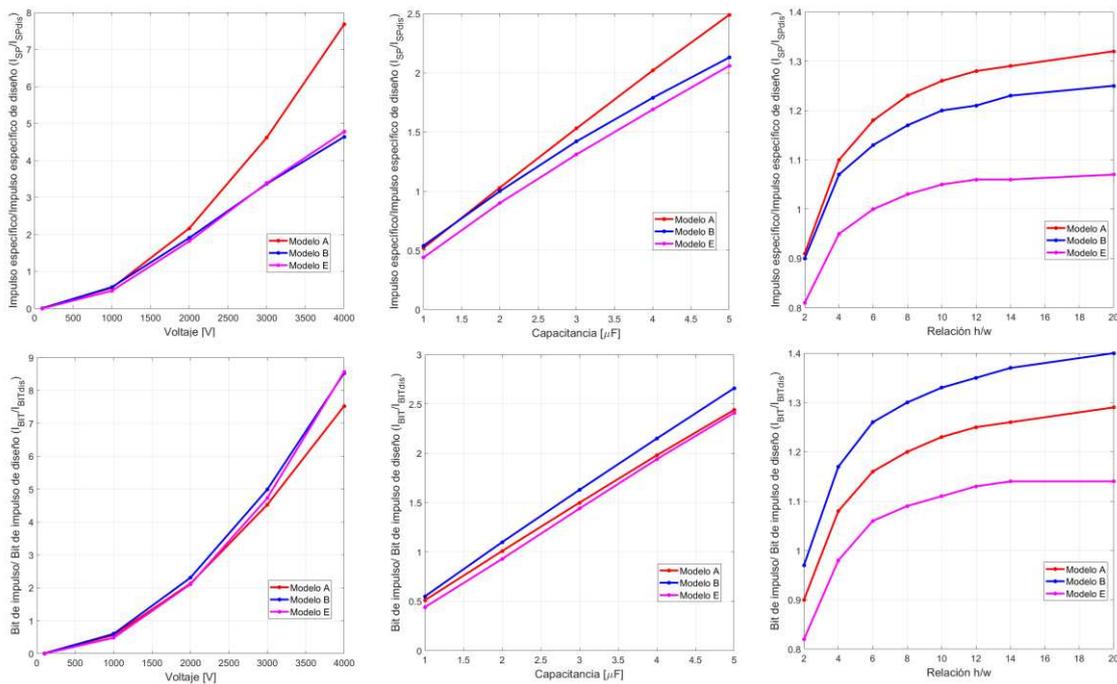


Figura 7: Variación del impulso específico y el bit de impulso según el voltaje, la capacitancia y la relación h/w .

6 CONCLUSIONES

En este trabajo, se han realizado simulaciones numéricas con diferentes modelos unidimensionales de PPT. Las ecuaciones de gobierno conforman un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODEs), no lineales, de segundo orden a coeficientes variables, que

deben resolverse de forma simultánea. Para poder resolver el sistema de ecuaciones con las funciones de Matlab es necesario el uso de variables de estado, esto permite reducir el orden del sistema. Usando las funciones *ode45* y *ode15s*, los Modelos A, B, C y D entregaron valores numéricos similares y los tiempos de cómputo se mantuvieron en el mismo orden, podemos decir que, en estos modelos, el problema es no rígido. Por otro lado, con el Modelo E, el tiempo de cómputo utilizando la función *ode45*, incremento considerablemente, pero los resultados no sufrieron grandes cambios, podemos decir que se trata de un problema rígido.

Los resultados obtenidos con los diferentes modelos y los errores relativos a los valores experimentales, se muestran en la [Tabla 2](#). Estos valores se encuentran en el orden de los mencionados en las distintas referencias.

Finalmente, se ha realizado un estudio paramétrico utilizando los diferentes modelos, permitiendo obtener una mejor comprensión del comportamiento del PPT ([Figura 6](#) y [Figura 7](#)). De manera general podemos decir que, un incremento del voltaje inicial implica grandes aumentos en los valores de impulso específico y del bit de impulso, además, el impulso específico y el bit de impulso, tienen una variación aproximadamente lineal con respecto a la capacitancia inicial, por último, los incrementos en la relación geométrica de la cámara, no son tan influyentes como si los son los incrementos de voltaje y de capacitancia inicial, incluso a partir de ciertos valores de h/w , las curvas tienden a mantenerse constantes.

REFERENCIAS

- Brito C., Elaskar S., Brito H. and Paoletti N., 2004. Zero-dimensional analytical model for preliminary design of Teflon pulsed plasma thruster. *Journal of Propulsion and Power*, AIAA., Volumen 20, p. 970 – 977.
- Burton, R. L. a. T. P., 1998. Pulsed plasma thruster. *Journal of Propulsion and Power*, Volumen 5, pp. 716--735.
- Filip Rysanek and Rodney Burton, 2001. Performance and Heat Loss of a Coaxial Teflon Pulsed Plasma Thruster. *University of Illinois Urbana-Champaign. 306 Talbot Lab 104 South Wright St.*
- Gomez E. and Elaskar S., 2016. Simulación numérica de propulsores pulsantes ablativos de Teflón mediante un modelo cero-dimensional. *Mecánica Computacional*, 34((ISSN 1666-6070)), pp. 3491-3504.
- Gomez E., Saravia M., Castelló W. and Elaskar S, 2021. Evaluation of PTFE-fed PPT performance by means of an unsteady electromechanical model.. *Space Propulsion Conference* .
- Gomez E., Saravia M., Castelló W. and S. Elaskar, 2022. Modelo Electromecánico no Estacionario para la Evaluación del Comportamiento de Propulsores de Plasma Pulsantes Ablativos. Septiembre, San Juan.. *IEEE Xplore*.
- Gomez E., 2018. *Optimización de propulsores de plasma pulsantes ablativos de teflón utilizando algoritmos evolutivos del tipo genéticos. Tesis de Mestría.*. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales: s.n.
- Jahn, R. G., 1968. *Physics of Electric Propulsion*. New York: McGraw-Hill Book Co..
- Laperriere, D., 2005. *Electromechanical modeling and open-loop control of parallel-plate*. s.l.:Worcester Polytechnic Institute.
- Lei Y., Xiangyang L., Zhiwen W. and Ningfei W., 2011. Analysis of Teflon Pulsed Plasma Thrusters Using a Modified Slug Parallel Plate Model. *AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. San Diego, California*, Volumen 47th.
- Rayburn Ch., Campbell M., Hoskins W and Cassady, 2000. *Development of a micro pulsed plasma thruster for the Dawgstar nanosatellite*. s.l.:36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit.