

Medición del empuje producido por propulsores de plasma

Rodolfo M. Duelli⁽¹⁾, Julio C. Massa^(1,2) y Héctor H. Brito^(1,3)

⁽¹⁾ *Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nacional 36 Km. 601, (5800) Río Cuarto, Argentina. e-mail: rduelli@ing.unrc.edu.ar*

⁽²⁾ *Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, (5000) Córdoba, Argentina. e-mail: jmassa@efn.uncor.edu*

⁽³⁾ *Centro de Investigaciones Aplicadas, Instituto Universitario Aeronáutico, Avenida Fuerza Aérea 5500, Córdoba, Argentina, e-mail: hbrito@iua.edu.ar*

RESUMEN

Para aprovechar las ventajas comparativas de los micro o nano satélites resulta imprescindible contar con métodos autónomos de corrección de órbita. La solución para el control de órbita de este tipo de satélites se ha orientado hacia la utilización de un propulsor de plasma de funcionamiento estacionario (PPFE) de propulsante sólido, este concepto se encuentra en proceso de estudio y desarrollo en el ámbito del Instituto Universitario Aeronáutico con la participación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto.

En este trabajo se investiga mediante simulaciones numéricas el comportamiento de un banco de ensayos que se está desarrollando para medir el empuje producido por propulsores de plasma de funcionamiento estacionario. Para determinar el empuje se propone medir la deformación por flexión en la base de una de las columnas utilizando un transductor piezocerámico y una placa de adquisición de datos para medir el voltaje en el transductor.

Se estudia la influencia de las dimensiones de las columnas y de las formas de fijación de las columnas sobre la magnitud de la frecuencia natural del banco y sobre la deformación a medir. Se analiza la respuesta del banco durante los ensayos en cámara de alto vacío simulando un ambiente espacial, tanto la bomba mecánica de vacío que posee la cámara como el movimiento micro sísmico del suelo producen ruido de fondo que perturba las mediciones a realizar.

Como el banco sólo permite el desplazamiento horizontal de la plataforma para las mediciones, montada sobre dos vigas biempotradas, se puede utilizar un modelo dinámico simplificado de un único grado de libertad para evaluar el comportamiento dinámico del banco operando con el ruido de fondo. Para caracterizar la calidad de la respuesta con relación al ruido se realizaron simulaciones numéricas para garantizar la aptitud del banco para determinar el empuje de los propulsores de plasma.

Palabras Claves: Propulsor de plasma estacionario, banco de ensayos, simulaciones numéricas.

1. INTRODUCCIÓN

Para aprovechar las ventajas comparativas de los micro o nano satélites resulta imprescindible contar con métodos autónomos de corrección de órbita [1]. La solución para el control de órbita de este tipo de satélites se ha orientado hacia la utilización de un propulsor de plasma de funcionamiento estacionario (PPFE) de propulsante sólido [2], este concepto se encuentra en proceso de estudio y desarrollo en el ámbito del Instituto Universitario Aeronáutico [3] con la participación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto.

Los parámetros básicos de comportamiento que requieren una evaluación experimental son el Impulso Total, definido como la integral en el tiempo del empuje sobre en una misión (o una parte una misión) y el Impulso Específico, es decir el impulso total por unidad de peso de propulsante consumido [4]. Estos son dos parámetros importantes para el diseño y la evaluación del comportamiento del PPFE que es operado en forma continua y ensayado en una cámara de alto vacío con la presencia inevitable de ruido proveniente principalmente de la bomba mecánica de vacío y del movimiento micro sísmico del suelo, que denominaremos ruido mecánico de fondo (RMF) siempre presente durante los ensayos del PPFE.

Los bancos de ensayos comúnmente utilizados para medir pequeños impulsos se basan en el péndulo balístico horizontal, el péndulo balístico vertical o el péndulo de torsión [5]. Estos bancos utilizan como transductor para realizar la medición del desplazamiento un transformador lineal diferencial variable mientras que el desplazamiento angular se mide mediante un transformador rotatorio diferencial variable [6]. Estos dispositivos se aplican para sensar movimientos del orden de una micra, para la medición de magnitudes mas pequeñas se emplean interferómetros ópticos.

Como una innovación a la forma de medición mencionada anteriormente, en este trabajo se propone el diseño de un banco de ensayos (BE) sobre la base de dos láminas flexibles que se utilizan como columnas de un pórtico (Figura 1). Las columnas están biempotradas, en la parte superior están rígidamente unidas al motor y en la parte inferior a una sólida base. Se emplea un transductor piezoeléctrico pegado próximo al empotramiento, como sensor de deformación para medir indirectamente el empuje [6]. En las referencias consultadas no se registran antecedentes de bancos de este tipo, el concepto aquí propuesto es una alternativa de bajo costo.

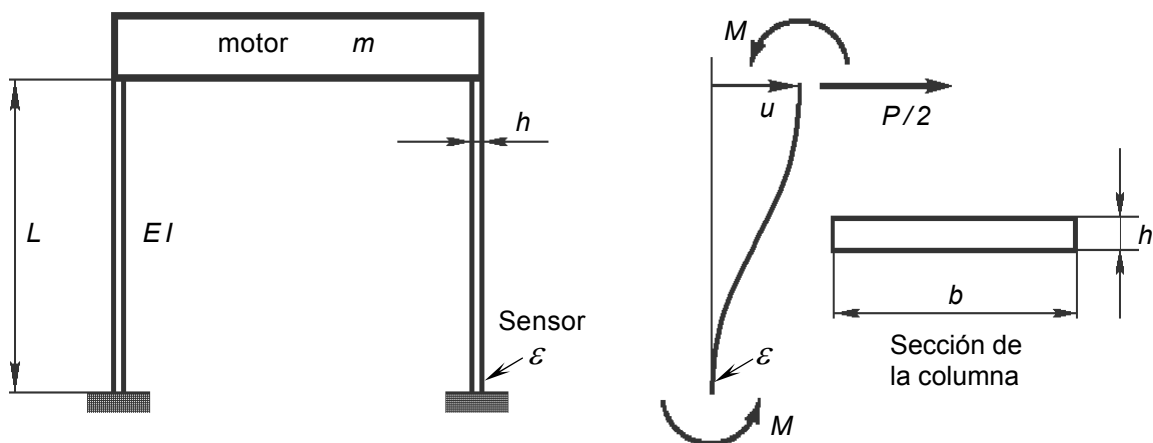


Figura1 Esquema de 1 GLD del Banco de Ensayos (BE). Relación carga desplazamiento.

2. MEDICIÓN DEL EMPUJE

El empuje del motor, fuerza P , se puede medir utilizando un sensor piezoeléctrico en la base de una de las columnas del banco (ver Figura 1). El momento flector M en la base de las columnas es causado por la fuerza horizontal P que se divide en partes iguales en cada una de las dos columnas. Teniendo en cuenta el valor del desplazamiento u se puede determinar la rigidez horizontal del banco K :

$$2M - \frac{P}{2}L = 0 \rightarrow M = \frac{PL}{4} \quad u = \frac{P/2 L^3}{12EI} \quad K = \frac{P}{u} = 24 \frac{EI}{L^3} \quad (1)$$

donde E es el módulo de elasticidad del material de las columnas e I es el momento de inercia. La frecuencia natural del banco es:

$$I = \frac{bh^3}{12} \rightarrow K = 2Eb \left(\frac{h}{L}\right)^3 \quad \omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{2Eb h^3}{mL^3}} \quad (2)$$

donde m es la masa total del motor y su interfase de acople. Teniendo en cuenta el valor del momento flector en la base de la columna donde se ubica el sensor de deformación se obtiene la expresión de la deformación y despejando P podemos determinar el empuje del motor midiendo la deformación ε en la base de la columna.

$$\sigma = \frac{M h}{I} = \frac{3 PL}{2 bh^2} \rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{3 PL}{2 E bh^2} \rightarrow P = \frac{2Eb h^2}{3L} \varepsilon \quad (3)$$

3. INCIDENCIA DEL RUIDO DE FONDO

Como antecedente al Banco de Ensayos que se estudia en este trabajo se cuenta con un desarrollo conjunto entre la Facultad de Ingeniería de la UNRC y el Departamento de Vehículos Espaciales del Centro de Investigaciones Aplicadas del Instituto Universitario Aeronáutico. Se trata de un banco de ensayo para un propulsor de plasma pulsante de propulsante sólido (P4S), consistente en una lámina deformable montada en voladizo con el motor rígidamente unido en su extremo libre, utilizando este concepto por el bajo costo asociado al mismo. El conjunto motor-banco se modeló como un sistema de dos grados de libertad dinámicos [3], uno de traslación "y" y otro de rotación "θ" mostrado en la Figura 2.

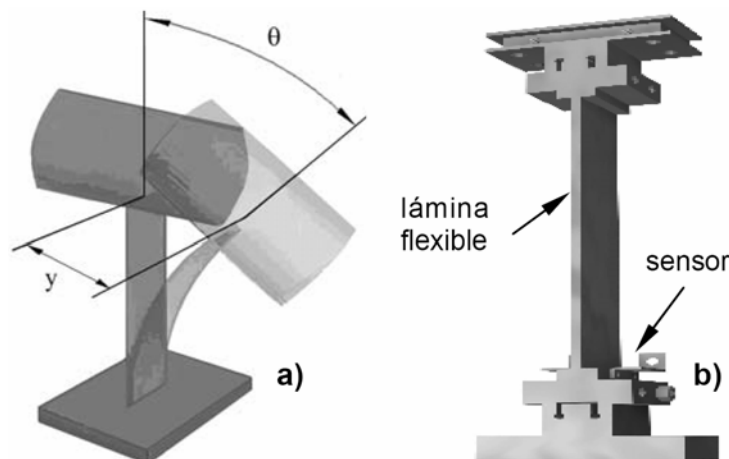


Figura 2 a) Esquema 3D. b) Representación 3D del Banco para el P4S.

Para el diseño del Banco de Ensayos propuesto en este trabajo, que se muestra en la Figura 1, es necesario conocer el RMF que estará siempre presente durante los ensayos del PPFE. Como se disponen de mediciones experimentales [7] de la respuesta al RMF realizadas en el Banco para medir el empuje del P4S que se muestra en la Figura 2, es posible obtener la excitación de entrada producida por el RMF a partir de la resolución de un problema inverso.

Los datos experimentales corresponden a la medición del desplazamiento y al giro. El desplazamiento experimental se transformó al dominio de la frecuencia a través del uso de la FFT. Una vez en el dominio de la frecuencia se utilizó descomposición modal.

$$H_k(\omega) = (\omega_k^2 - \omega^2 + i 2 \xi_k \omega_k \omega) \quad k = 1, 2 \quad (4)$$

El modelo modal fue transformado en el modelo físico mediante el uso de la matriz modal $[\Phi]$ conteniendo en sus filas los modos del modelo de 2 GLD de la Figura 2.

$$[\hat{H}(\omega)] = [\Phi] \begin{bmatrix} H_1(\omega) & 0 \\ 0 & H_2(\omega) \end{bmatrix} [\Phi]^T \quad (5)$$

Una vez obtenido el modelo físico $[\hat{H}(\omega)]$ se procede a resolver el problema para encontrar la entrada del sistema $\{F(\omega)\}$ a través del uso de la respuesta experimental $\{X(\omega)\}$.

$$\{F(\omega)\} = [\hat{H}(\omega)] \{X(\omega)\} \quad (6)$$

Una vez caracterizado el ruido mecánico de fondo $\{F(\omega)\}$ como un movimiento de apoyo, se lo utiliza para obtener la respuesta del nuevo modelo de banco de ensayos de un grado de libertad dinámico propuesto en este trabajo, que considera solamente desplazamiento horizontal.

$$\hat{X}(\omega) = H_{BE}(\omega) F(\omega) \quad (7)$$

donde $H_{BE}(\omega)$ es el modelo genérico del BE y $F(\omega)$ es la componente de la fuerza generalizada correspondiente al único GLD. En este modelo genérico del BE, se estudió la incidencia del ruido mecánico en la respuesta en función de su frecuencia natural. El conjunto de respuestas se evaluaron a través de su contenido de energía como el producto interno siguiente:

$$E(\omega) = X^*(\omega) \cdot X(\omega) \quad (8)$$

La energía $E(\omega)$ como función de la frecuencia natural del BE se muestra en la Figura 3. Se consideró una masa fija de 5 Kg y un coeficiente de un amortiguamiento del 1 %. Se observa que la incidencia del ruido de fondo disminuye al aumentar la frecuencia natural del banco.

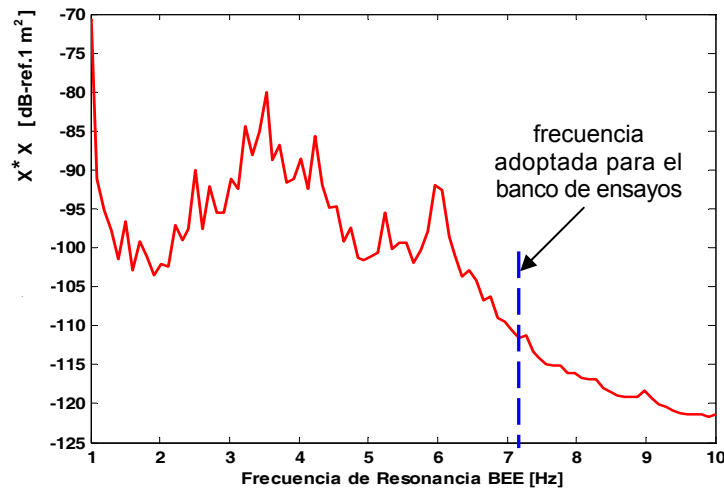


Figura 3 Energía de la respuesta en función de la frecuencia de resonancia del banco de ensayos.

4. CARACTERÍSTICAS DEL BANCO

El banco de ensayos propuesto en este trabajo consta de dos láminas flexibles montadas como columnas de un pórtico plano como se muestra en la Figura 4. Esto permite adoptar un modelo simplificado de un grado de libertad dinámico (1GLD) con la finalidad de simular el comportamiento del banco de ensayos durante su operación. Los modelos de 1GLD son los más usuales en las referencias bibliográficas consultadas [3].

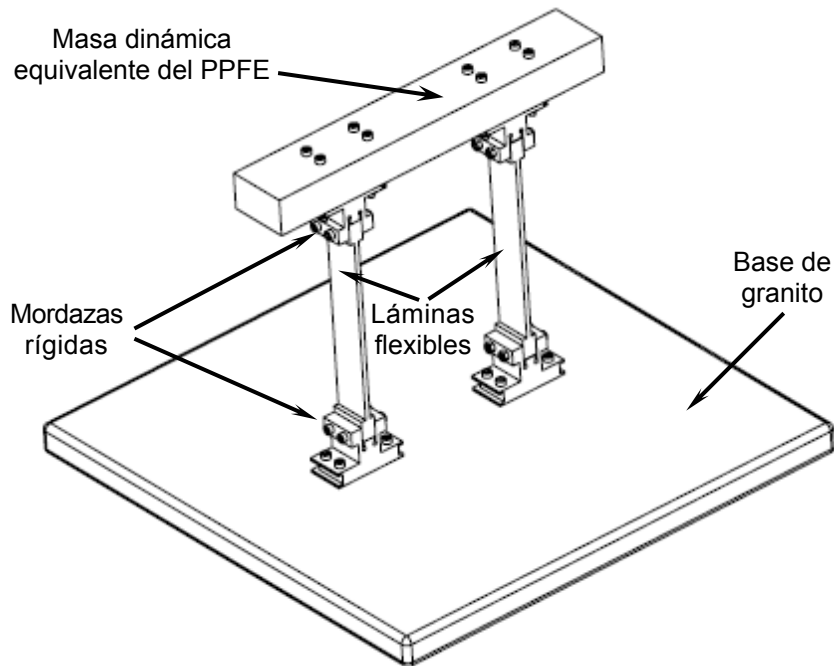


Figura 4 Vista isométrica del prototipo del banco.

Para la construcción del banco que funcionará dentro de una cámara de vacío, se seleccionaron los materiales indicados en la Tabla 1, junto con sus propiedades.

Como parámetro de diseño se tiene una masa dinámica $m = 5 \text{ Kg}$, que estima la masa del PPFE con el propelente sólido (Teflón[®]) y la cuna para su fijación a las mordazas superiores de las columnas. Las dos columnas tienen longitud $L = 15 \text{ cm}$ y ancho $b = 3 \text{ cm}$, para adecuarse a las dimensiones interiores de la cámara de vacío.

El espesor h se seleccionó de manera que la frecuencia tenga un valor suficientemente alto para disminuir el incidencia del ruido mecánico de fondo (ver Figura 3), se consideró que un valor de f mayor a 7 Hz resulta suficiente. En resumen:

| | | | |
|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| $L = 0,15 \text{ m}$ | $b = 0,03 \text{ m}$ | $h = 0,002 \text{ m}$ | $m = 5 \text{ Kg}$ |
|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|

Tabla 1 Propiedades de los materiales seleccionados para el prototipo del BE.

| | Mód. de Young [Pascal] | Coef. de Poisson | Densidad [kg/m^3] |
|---------------------------------|------------------------|------------------|------------------------------|
| Base de Granito | 60×10^9 | 0,27 | $2,3 - 3 \times 10^3$ |
| Aislante Eléctrico de Plexiglas | $2,9 \times 10^9$ | 0,40 | $1,8 \times 10^3$ |
| Columnas de Duraluminio | $7,1 \times 10^{10}$ | 0.34 | $2,6 \times 10^3$ |

Introduciendo estos valores en (2) resulta:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 \times 7,1 \times 10^{10} \times 0,03 \times (0,002)^3}{5 \times (0,15)^3}} = 7,15 \text{ Hz} \quad (9)$$

En la Figura 3 se ha indicado el valor de la frecuencia natural de resonancia el BE (7,15 Hz). Se considera adecuado en el diseño del BE este valor de frecuencia de resonancia para minimizar el efecto del ruido mecánico de fondo que disminuye con el aumento de la frecuencia. Pero el aumento de la frecuencia natural implica menor deformación ε en la base de la columna flexible. Por lo tanto es necesaria mayor sensibilidad en el rango dinámico del sistema de adquisición de datos para la medición de ε y por ende para la determinación del empuje del PPFE.

La Figura 4 muestra una vista isométrica donde se pueden observar las dos láminas flexibles empotradas en sus extremos. En el extremo inferior se encuentran unas mordazas rígidas que fijan las láminas flexibles a una base de granito y los extremos superiores de las mismas se fijan con unas mordazas rígidas a la cuna de unión al banco de ensayo que sostiene la masa dinámica equivalente del PPFE. La Figura 5 muestra una vista de frente y una vista tridimensional del prototipo.

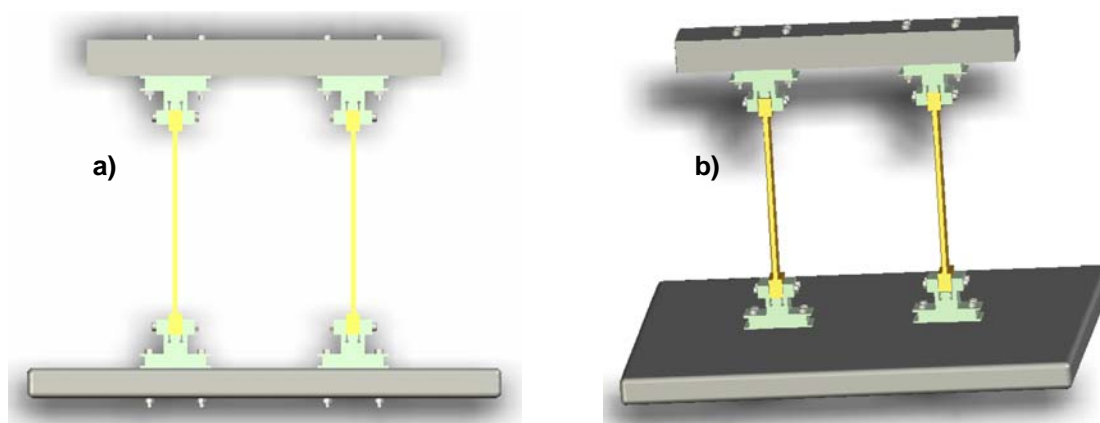


Figura 5 (a) vista de frente, (b) vista tridimensional.

4.1 Medición de la deformación ε

Teniendo en cuenta la Ecuación (3), se puede medir indirectamente el empuje del motor midiendo la deformación ε en la base de la columna con un transductor piezocerámico. En el transductor, la deformación mecánica debida al empuje actuante genera una diferencia de potencial por el efecto piezoeléctrico. En la Tabla 2 se pueden observar las características del sensor utilizado.

Tabla 2: Propiedades de sensor piezoeléctrico. Material: PZT Lead Zirconate Titanate [8]

| | |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Designación: PSI-5H-S4-ENH | Densidad: $\rho = 7,8 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ |
| Dimensiones del sensor: | Coeficiente: $d_{31} = -320 \times 10^{-12} \text{ m/volt}$ |
| longitud: $L_s = 0,249 \text{ m}$ | Coeficiente: $g_{31} = -9,5 \times 10^{-3} \text{ volt m/N}$ |
| ancho: $b_s = 0,060 \text{ m}$ | Electrodo de níquel |
| espesor: $h_s = 0,005 \text{ m}$ | Lámina central de acero inoxidable |
| Módulo de Young: $Y_{E1} = 6,2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ | Polarizado para ser operado en serie |

La deformación que se produce en la cara de la columna debido a la flexión de la misma, provoca una diferencia de potencial entre el electrodo superior y el inferior del sensor. Se supone que el transductor está perfectamente pegado a la columna y que la interfase tiene un único valor de deformación ($\varepsilon_{\text{columna}} = \varepsilon_{\text{sensor}} = \varepsilon$).

Adicionalmente se asume que el espesor del transductor es "pequeño" y no afecta materialmente las características de la respuesta dinámica de la estructura, ya que los transductores son elementos con frecuencias naturales altas.

El campo de tensiones en la sección del transductor esta dado por:

$$\sigma(y) = E_s \varepsilon(y) \quad \text{donde: } \varepsilon(y) = \varepsilon \left(\frac{y}{h/2} \right) \quad (10)$$

donde la variable y es igual a cero en la mitad del espesor de la columna, h es el espesor de la columna (ver Figura 1), ε es la deformación específica en la parte exterior de la columna dado por la Ecuación (3) y E_s es el módulo de Young del transductor bilaminar (ver Y_{E1} en la Tabla 2). Teniendo en cuenta la proporcionalidad entre el campo eléctrico y el campo de tensiones mecánicas, representada por la constante de acoplamiento g , se obtiene:

$$V = \int g(y) \sigma(y) dy \quad \text{donde: } g(y) = \begin{cases} g & \text{para } \frac{h}{2} + \frac{h_s}{2} < y \leq \frac{h}{2} + h_s \\ -g & \text{para } \frac{h}{2} \leq y \leq \frac{h}{2} + \frac{h_s}{2} \end{cases} \quad (11)$$

donde h_s es el espesor del piezoeléctrico y g se obtiene de la Tabla 2 (g_{31}). Efectuando la integral se tiene:

$$V = E_s \frac{h_s^2}{h} \frac{g}{2} \varepsilon \quad (12)$$

Esto permite despejar ε y llevarlo a la Ecuación (3):

$$\varepsilon = \frac{2h}{E_s h_s^2 g} V \quad \rightarrow \quad P = \frac{2Eb h^2}{3L} \varepsilon \quad (13)$$

Se supone un transductor lineal. La tensión indicada depende de la capacidad del transductor, y del circuito de medición asociado [7]. Debido a que la resistencia de aislamiento es finita, la carga generada en el transductor decrece gradualmente, por lo tanto se debe utilizar un instrumento de medición de muy alta impedancia de entrada, del tipo electrómetro, para evitar que la respuesta decaiga al valor cero.

4.2 Medición del voltaje V

Resulta crucial que la tensión eléctrica V_{min} en el sensor, producido por el empuje P_{min} , pueda ser captado por el sistema de adquisición de datos utilizado en el BE con un error aceptable. El rango de empuje a medir previsto para el banco de ensayos es el siguiente:

$$0,0001 \text{ N} < P < 0,001 \text{ N}$$

Utilizando la Ecuación (3), las propiedades de la Tabla 2 y las dimensiones de la columna

flexible se puede calcular el valor de ε_{min} producido por P_{min}

$$\varepsilon_{min} = \frac{3}{2} \frac{0,0001 \times 0,15}{7,1 \times 10^{10} \times 0,03 \times (0,002)^2} = 2,64 \times 10^{-9} \quad (14)$$

Según la Ecuación (14) el empuje P_{min} provocará un voltaje V_{min} que se calcula empleando la Ecuación (13), con las propiedades del transductor de la Tabla 2.

$$V = 6,2 \times 10^{10} \frac{(0,0005)^2}{0,002} \frac{9,5 \times 10^{-3}}{2} \varepsilon = 3,68 \times 10^4 \varepsilon \quad (15)$$

El valor mínimo de apreciación de la medición depende del número de subdivisiones del rango dinámico y de la ganancia de su etapa de entrada [9, 10], que normalmente para una excursión de ± 1 volt se fija en 100. Además la señal analógica del sensor requiere un acondicionamiento de impedancia para la correcta interconexión con el sistema digital de adquisición de datos.

El empuje se mide en régimen permanente, para acondicionar la señal se utilizará un amplificador de corriente continua de muy alta impedancia de entrada del orden de 200 T Ω y con una ganancia de 5 para mejorar su propia atenuación [11]. Por lo tanto la relación entre la tensión eléctrica afectada por las ganancias V_G y la deformación ε es:

$$V_G = 5 \times 100 \times 3,68 \times 10^4 \varepsilon = 1,84 \times 10^7 \varepsilon \text{ [volt]} \quad (16)$$

Utilizando el resultado dado en la Ecuación (14) la tensión eléctrica V_{Gmin} resulta:

$$V_{Gmin} = 1,84 \times 10^7 \times 2,64 \times 10^{-9} \approx 0,05 \text{ volt} \quad (17)$$

Se propone utilizar una tarjeta de adquisición de datos de 16 bits, teniendo en cuenta que dos bits se emplean: uno para tener en cuenta la paridad y otro para la corrección de errores [10]. Por lo tanto, con una excursión de ± 1 volt, obtenemos una apreciación mínima de la tarjeta de adquisición de datos de:

$$\Delta V_{min} = \frac{2}{2^{14}} \approx 0,0001 \text{ volt} \quad (18)$$

En la Ecuación (18) se observa que una tarjeta de adquisición de datos de 16 bits es suficiente para medir la tensión eléctrica producida por el empuje mínimo.

Comparando las Ecuaciones (17) y (18) se deduce que el voltaje mínimo a medir ($V_{Gmin} = 0,05$ volt) es 500 veces la apreciación del sistema de medición ($\Delta V_{min} = 0,0001$ volt).

5. SIMULACIONES NUMÉRICAS

En la Figura 6 se muestra la simulación de la tensión eléctrica medida por el sistema de adquisición de datos cuando el propulsor produce el empuje mínimo en presencia del inevitable ruido de fondo estudiado en la sección 2. Se ha indicado el valor medio (0,05 volt) asociado al empuje mínimo y las bandas correspondientes a ese valor medio mas menos la raíz cuadrada del voltaje cuadrático medio asociado al ruido ($\pm 0,38$ volt).

El cociente ruido/empuje mínimo en la señal obtenida es alto ($0,38/0,05 \approx 7$), no obstante la incidencia del ruido puede eliminarse promediando la señal en el tiempo, obteniéndose el valor 0,05 volt correspondiente al empuje sin ruido.

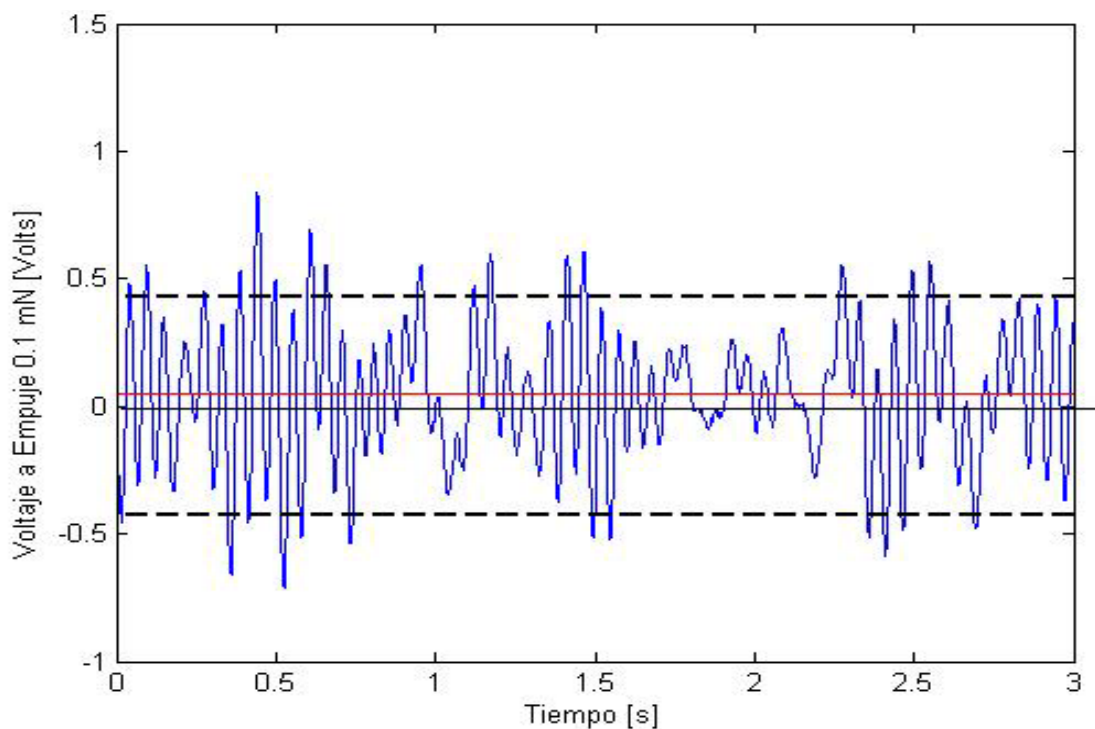


Figura 6 Simulación de la medición del voltaje para el empuje mínimo más ruido.

La Figura 7 es similar a la Figura 6 pero está referida al empuje máximo que se espera obtener con el propulsor actualmente en desarrollo. Se observa que el cociente ruido/empuje máximo en la señal obtenida es notablemente menor ($0,38/0,5 \approx 0,7$). Aquí nuevamente la incidencia del ruido se puede "filtrar" promediando la señal en el tiempo, obteniendo el valor $V = 0,5$ volt.

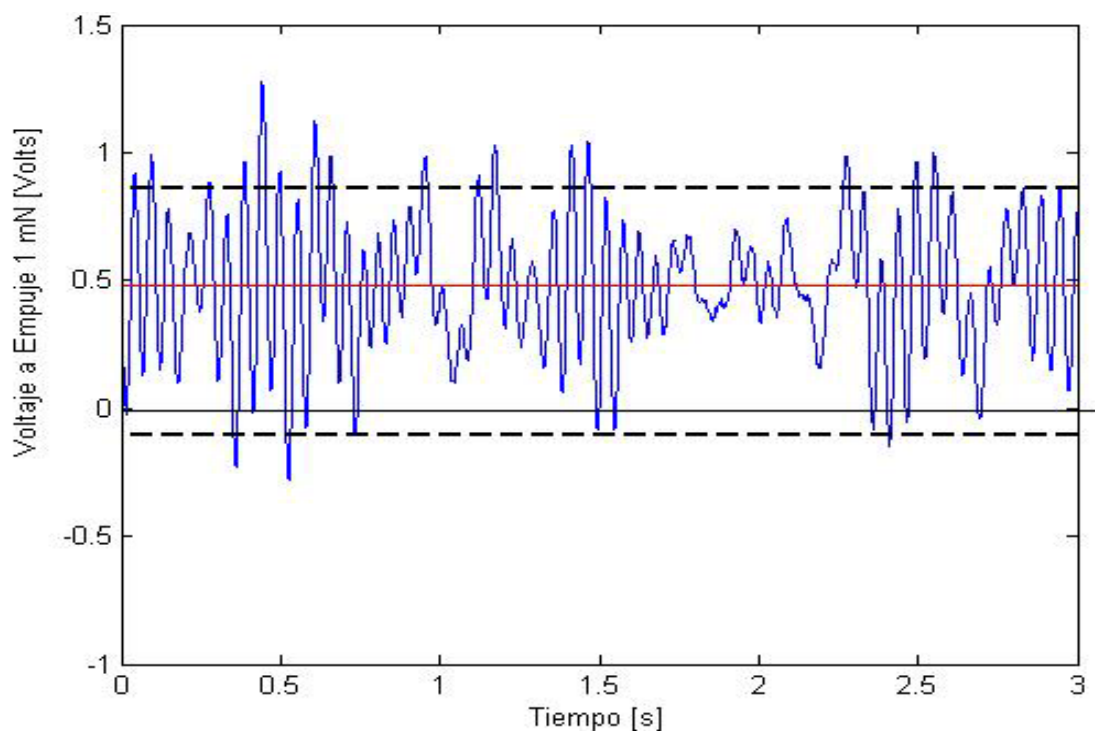


Figura 7 Simulación de la medición del voltaje para el empuje máximo más ruido

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se investigó mediante simulaciones numéricas el comportamiento de un banco de ensayos estático para predecir su respuesta dinámica cuando se utiliza un propulsor de plasma de funcionamiento estacionario de propulsante sólido. Se demostró que la respuesta del banco a través de la cual se mide el empuje depende de la frecuencia natural del banco.

El modelo simplificado adoptado permitió dimensionar el banco de ensayos y evaluar el comportamiento dinámico del mismo ante la presencia inevitable de ruido. Para determinar la excitación aleatoria del ruido se resolvió un problema inverso utilizando la respuesta al ruido medida en otro banco que está operando en condiciones similares al que se está desarrollando en este esfuerzo.

El comportamiento del sistema de medición fue simulado con la finalidad de garantizar su aptitud al ser utilizado en la determinación del empuje de los propulsores de plasma. Se encontró que la relación señal/ruido crece con la frecuencia natural del banco y con la magnitud del empuje y que la incidencia del ruido se puede "filtrar" promediando la señal en el tiempo, obteniendo el valor correspondiente al empuje del propulsor.

El diseño que se propone para el banco de ensayos es una solución de compromiso. La frecuencia natural consecuencia de los parámetros adoptados permite conciliar dos efectos antagónicos: mejorar la relación ruido/señal y posibilitar la medición de los pequeños voltajes obtenidos cuando el banco opera en su límite inferior de empuje.

7. REFERENCIAS

- [1] W. Sun, J.P. Stephens, M. Sweeting, Micro-Mini-Satellites for Affordable Constellations: Rapad-Eye & DMC, *Paper IAA-B3-0603*, 2003.
- [2] G. Paccani, L. Petrucci, Experimental Analysis of a Solid Propellant MPD Thruster With Different Anode Radii, *Proceedings of the 26th International Electric Propulsion Conference*. Kitakyushu, Japón, 1999.
- [3] H.H. Brito, C.A. Bortis, C.A. Dominguez, L.A. Lifschitz, Electric Propulsion Activities in Argentina, *IAF-Paper N^o. 00-S.4.01, 51st. International Astronautical Congress*, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- [4] M.M. Micci, A.D. Ketsdever, Micropropulsion for Small Spacecraft, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 187 AIAA, 2000.
- [5] R.A. Dean, R.M. Duelli, L.A. Lifschitz, H.H. Brito, Revisión Sobre Bancos de Ensayos Para la Medición de Pequeños Impulsos, *IV Congreso Anual Sociedad Mejicana de Ingeniería Mecánica*, Ciudad Juárez, Chih. México, 288-297, 1998.
- [6] E.O. Doebelin, *Measurement Systems Application and Design*, 4th Edition, Mc Graw Hill, 1990.
- [7] H.H. Brito, Comunicación Personal, Departamento de Vehículos Espaciales, *Centro de Investigaciones Aplicadas, Instituto Universitario Aeronáutico*, Córdoba, 2006.
- [8] Piezo Systems, Inc. Product Catalog #7. <http://www.piezo.com>, 2006.
- [9] S. Figliola, D.E. Beasley, *Mediciones Mecánicas Teoría y Diseño*, Alfaomega, 2003.
- [10] National Instruments, *Measurement and Automation Catalogue*, <http://www.ni.com>, 1999.
- [11] Keithley, *High Accuracy Electrometers for Low Current / High Resistance Applications*, <http://keithley.com>, 2007.