

# EFFECTOS PROPULSIVOS INDUCIDOS ELECTROMAGNÉTICAMENTE EN DISPOSITIVOS "RAMA" AUTOCONTENIDOS



HÉCTOR H. BRITO

Egresado de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (Francia). Es asesor tecnológico del Centro de Investigaciones Aplicadas del CRUC-IUA de la UNDEF y Jefe de proyecto del satélite  $\mu$ SAT-3.

Con la colaboración de Roque De Alessandro, Marcos A. Brito y Claude M. Brito.

## Nomenclatura

I = corriente en bobinados, A

I<sub>s</sub> = corriente de batería, A

G = ganancia de amplificador

K = constante dieléctrica

MTF = factor de transmisibilidad mecánica

Q = carga eléctrica, C

t = tiempo, s

$V$  = Tensión en capacitores, V

$\epsilon_r$  = constante dieléctrica relativa

$\sigma$  = desviación standard

$\omega$  = frecuencia de portadora, radianes/s

$\Omega$  = frecuencia de modulación, radianes/s

## Introducción

La idea del vuelo interestelar está siendo objeto de un interés creciente en el seno de la comunidad astronáutica. Sin embargo, la Ciencia de la Propulsión permite asegurar que este problema no posee solución para viajes de duración compatible con la extensión de la vida humana. Deberán hallarse nuevos conceptos propulsivos que trasciendan el marco teórico actualmente aceptado y prescindan de propelente y/o asistencia externa, de manera coherente con la línea de investigación actualmente perseguida por la NASA bajo el título *Breakthrough Propulsion*, o los trabajos de J. Woodward.

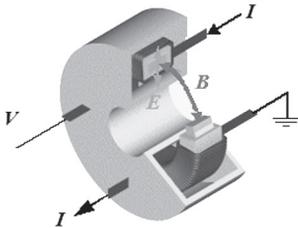


Figura 1.  
Campos EM cruzados en capacitores anulares dentro de bobinados toroidales.

El primer autor viene investigando uno de estos nuevos conceptos basado en la posibilidad de que campos EM puedan exhibir densidades de cantidad de movimiento no-nulas, incluso en regímenes estacionarios. En consecuencia, la cantidad de movimiento total del campo podría alcanzar valores no-nulos, siempre que las interacciones entre campo y materia puedan ser descritas mediante el tensor de energía-impulso de Minkowski.

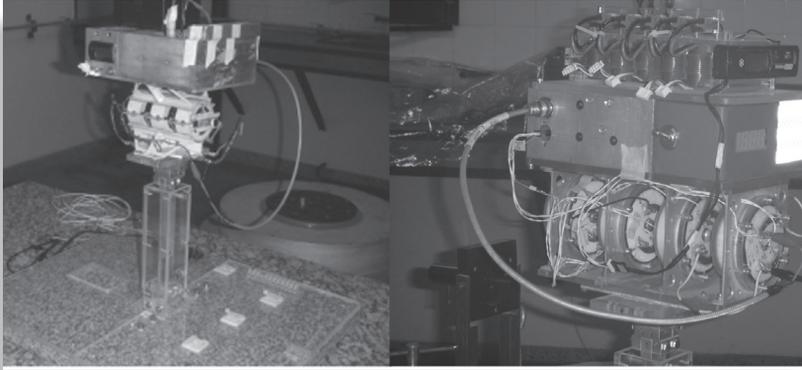


Figura 2.  
Propulsores RAMA-I (a) y RAMA-II (b) sobre el banco de empuje en configuración auto-contenida.

Con el objeto de comprobar dicha hipótesis, se diseñó un experimento usando capacitores cerámicos anulares de alta K con bobinados toroidales alrededor de ellos, como se muestra en la Fig. 1. El experimento fue posteriormente modificado para verificar presuntos efectos propulsivos “sin reacción” debidos a campos EM cruzados con variación armónica en cuadratura de fase. Se implementaron los dispositivos denominados RAMA-I y RAMA-II (ver Fig. 2) en configuración “sistema cerrado” (autocontenido), operando en modo de modulación de tensión de capacitores, sobre un banco de empuje del tipo péndulo de flexión invertido, usando transductores piezo-cerámicos de deformación de alta sensibilidad y técnicas láser de sensado de vibraciones. En la Fig. 3 se muestra un ejemplo genérico de modulación de tensión de los capacitores y la modulación de potencia de entrada resultante, con sus correspondientes densidades de potencia espectral (PSD). Como puede observarse, la modulación de tensión no puede per se inducir efectos que puedan ser detectados por el banco de empuje para frecuencias de modulación próximas al ancho de banda mecánico del montaje y significativamente inferiores a la frecuencia portadora. No obstante, magnitudes derivadas sí pueden hacerlo.

Los dispositivos también se integraron en montajes basados en el uso de un péndulo de torsión unifilar de alta sensibilidad (método de Cavendi-

sh-Coulomb) junto con la técnica de medición de Kelvin con haz de láser, para la detección de empuje en modo de operación no-modulado. No se observaron efectos propulsivos bajo este modo de operación de los dispositivos. No obstante, activándolos en modo modulado sobre el montaje péndulo de flexión, con frecuencias de modulación próximas a la segunda frecuencia natural del montaje, se observaron empujes “anómalos”, representados por los “picos” de densidad espectral de potencia asociados a dichas frecuencias de modulación. Por otra parte, un análisis de datos basado en modelos de cuadripolos eléctricos de los dispositivos ensayados sugiere que los empujes modulados observados derivan de reales empujes alternados a la frecuencia de activación o portadora, con amplitudes del orden del Newton o el kilo-Newton, según si el mecanismo responsable de estos efectos mecánicos depende lineal o cuadráticamente de la frecuencia de modulación.

Para determinar la influencia de potenciales efectos espurios y establecer la ley de variación de los empujes modulados (o efectivos) en función de la frecuencia de modulación tendiente a identificar el mecanismo físico que produce tales empujes en relación con las magnitudes eléctricas características del montaje, se delineó una campaña de ensayos focalizada en el dispositivo RAMA II. Este artículo se refiere a los aspectos relevantes

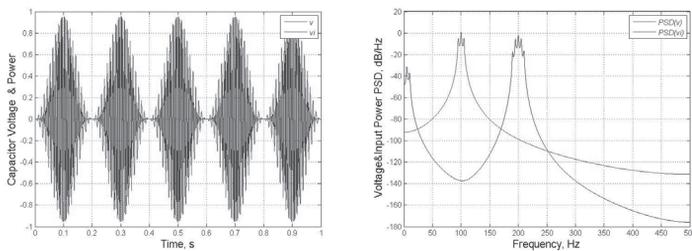


Figura 3. Izq.: ejemplos de modulación de tensión en capacitor y potencia. Der.: PSDs de tensión y potencia de entrada.

de los resultados obtenidos en relación con la instrumentación de ensayo, los procedimientos de adquisición y procesamiento de datos utilizados y la estimación de efectos espurios que puedan ser interpretados erróneamente como efectos propulsivos genuinos.

## Nueva serie de experimentos RAMA-II

El espécimen de ensayo, mostrado en Fig.2 (b), consiste en una unidad autocontenida que incluye los módulos propulsivos y una Unidad de Procesamiento de Potencia (PPU) de 300W/1MHz con alimentación CC provista por baterías. Cada módulo consta de un arrollamiento toroidal de 30 vueltas bobinado alrededor de un capacitor anular de 10 nF con dieléctrico cerámico ( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\epsilon_r \approx 4400$ ), encapsulado en una cazoleta cerámica aislante de alta conductividad térmica. El subconjunto capacitor-bobinado se conecta como circuito tanque y se monta en un alojamiento de acrílico relleno con Material de Cambio de Fase (PCM) a fin de asegurar un control térmico limitado del conjunto. Los módulos se conectan en paralelo a una fuente de 350 V – AC/1 MHz, con la posibilidad de modulación de frecuencia (100% de profundidad) hasta 38 Hz. Las operaciones de ensayo se llevaron a cabo de acuerdo a los mismos procedimientos empleados en experimentos previamente reportados en los que el espécimen de ensayo se ubica sobre el banco de empuje del tipo péndulo de flexión y se opera en modo de modulación de tensión. A diferencia de estos, las mediciones de micro-movimientos se efectuaron mediante el uso de un vibrómetro laser Polytec $\square$  IVS 400, como se muestra en la Fig. 4. La salida del instrumento es una señal de tensión proporcional a la velocidad del objeto iluminado por el haz láser, condicionada a través de un amplificador  $G=100$  para su adaptación a la plaqueta de adquisición de datos, resultando un factor de calibración de 50  $\mu\text{m/s/V}$ .

Se decidió utilizar Vibrometría Laser Doppler (LDV) para la medición de micro-movimientos a fin de poder descartar los eventuales errores debidos a interferencia electromagnética (EMI), generada durante la activación eléctrica del propulsor, sobre los canales de medición de los PCTs, los que podrían haber sido interpretados como efectos propulsivos "anómalos" en experimentos reportados previamente. Sin embargo, durante sesiones preliminares de ensayos se observó que sin las precauciones adecuadas,

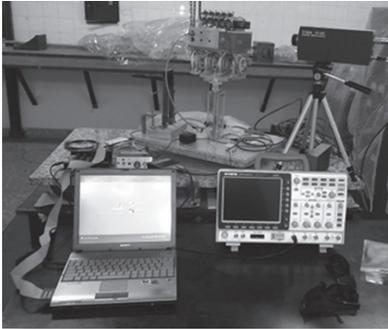


Figura 4.  
Montaje experimental RAMA II con Vibrómetro Laser Doppler.



Figura 5.  
Montaje experimental RAMA II con Vibrometría Laser Doppler y mitigación de efectos EMI.

aún las mediciones con LDV podían ser corruptas por efectos EMI actuando sobre el instrumento y la electrónica de adquisición de datos. Este problema se subsanó mediante la ubicación conveniente de la totalidad del equipo de medición, como se muestra en la Fig. 5, donde la distancia entre la fuente de ruido eléctrico (PPUs de RAMA-II) y dicho equipo asegura aproximadamente 40 dBW de atenuación de los efectos EMI inducidos.

Esta solución presenta la desventaja de que, en lugar de encontrarse el LDV sobre la misma plataforma anti-vibración que el espécimen de ensayo como en la Fig. 4, el instrumento de medición en una ubicación fuera de dicha plataforma se encuentra sujeto al ruido micro-sísmico de fondo a través de una impedancia mecánica completamente diferente. En consecuencia, los movimientos locales contribuyen significativamente al ruido

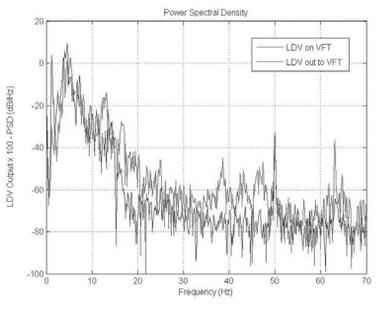


Figura 6.  
Densidades Espectrales de Potencia “Thrust OFF” para LDV ubicado sobre y fuera de la plataforma antivibración (VFT).

de fondo medido, como puede verse comparando las densidades espectrales de potencia del LDV, caso "Thrust OFF" sobre y fuera de la plataforma anti-vibración (Fig. 6).

A pesar del ruido mecánico de fondo desfavorable, intensificado alrededor de los 27.5 Hz (la segunda frecuencia natural del montaje sísmico), se observa en la Fig. 6 una región del espectro suficientemente "calma" entre los 28 y los 38 Hz. Se efectuaron ensayos en condiciones de activación (Thrust ON) con frecuencias de modulación dentro del intervalo mencionado, resultando de manera persistente efectos vibratorios mecánicos sobre el banco de empuje de amplitud claramente superior a los debidos al ruido de fondo a tales frecuencias. Estos nuevos resultados reproducen, al menos cualitativamente, aquellos previamente observados y reportados usando otros dispositivos de detección.

A los fines de establecer la significancia estadística de los resultados positivos mencionados precedentemente, se procedió al promediado de los espectros PSD, tanto para los ensayos con ruido de fondo (condición "Thrust OFF") como para los ensayos con activación del propulsor (condición "Thrust ON"). Los espectros promediados se muestran en la Fig. 7, en la que los ensayos con varias frecuencias de modulación se representan junto con el espectro promediado de ruido de fondo y su versión desplazada de una desviación standard. Los picos de PSD a las frecuencias de modulación son hasta varias  $\sigma$  mayores que los correspondientes niveles de ruido de fondo, con una significancia acumulada (por repetición de eventos) de alrededor de  $3\sigma$ , lo que conduce a una significancia estadística combinada superior a  $10\sigma$ .

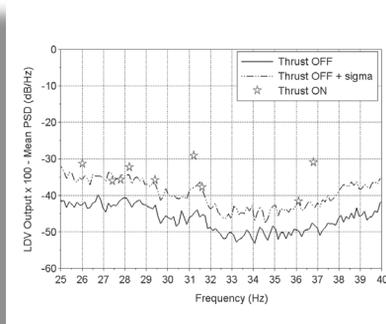


Figura 7.  
Densidades Espectrales de Potencia promediadas "Thrust ON" vs. "Thrust OFF" de mediciones LDV.

## Análisis experimental

### Thrust restitution

A diferencia de lo reportado en artículos previos sobre estos experimentos, los datos de ensayo se procesaron con el objeto de determinar el empuje alternado en el eje del espécimen de ensayo de manera tal que la PSD promediada de la respuesta del montaje sísmico es la efectivamente observada para las condiciones de ensayo “Thrust OFF” y “Thrust ON”.

Las amplitudes de los picos de PSD para distintas frecuencias de modulación se anti-transformaron a amplitudes en dominio de tiempo de las correspondientes señales armónicas, de acuerdo a la Ref. 10. Estas señales resultantes de mediciones con LDV representan velocidades del spot láser sobre el espécimen de ensayo, mediante el factor de calibración mencionado en la sección precedente. La restitución de la fuerza de entrada se obtuvo mediante simulaciones dinámico-estructurales con COMSOL Multiphysics® del montaje sísmico asociado al espécimen de ensayo (dispositivo RAMA II), cuyo modelo FEM se aprecia en la Fig. 8, sometiedolo a cargas armónicas de amplitudes variables para recuperar las velocidades medidas del spot láser. Debe señalarse que el modelizado de dicho montaje supone que el mismo se encuentra fijado a una plataforma rígida, es decir, una versión simplificada de la simulación del sistema mecánico completo incluyendo la plataforma anti-vibración utilizada.

Los resultados obtenidos se resumen en la Fig. 9, en la que también se encuentran graficadas distintas curvas de ajuste de estos datos experimentales. Se observan amplitudes de empuje “efectivo” considerablemente superiores a los niveles del ruido mecánico de fondo (condición “Thrust OFF”), es decir, empujes equivalentes de ruido a iguales frecuencias, con una clara tendencia de diferenciación hacia las frecuencias de modulación más elevadas, manteniendo las características estadísticas ya observadas en sus contrapartes espectrales. Según la bondad de ajuste, resulta como más verosímil una dependencia cuadrática del empuje respecto de esas frecuencias.

EFFECTOS PROPULSIVOS INDUCIDOS ELECTROMAGNÉTICAMENTE  
EN DISPOSITIVOS "RAMA" AUTOCONTENIDOS

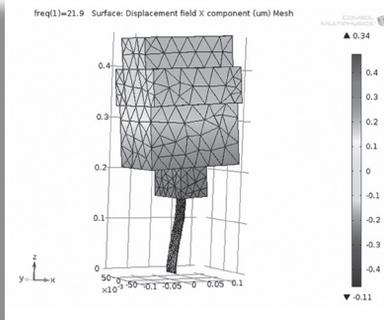


Figura 8.  
Modelo de Elementos Finitos (FEM) del montaje sísmico RAMA II.

## Evaluación de efectos espurios

Las amplitudes de empuje “efectivo” deben ser comparadas con aquellas que podrían deberse a efectos espurios diversos, por mecanismos de interacción que necesariamente se relacionan con las magnitudes eléctricas principales involucradas en la activación del dispositivo RAMA II, i.e., tensión en los capacitores  $V$  y corrientes en los bobinados  $I$ . En Ref. 11 se analizó la contribución de estas cantidades, donde considerando productos binarios entre las mismas  $y/o$  sus derivadas temporales se demuestra que dichos productos se pueden descomponer en términos armónicos con frecuencias en el intervalo  $\Omega - 2(\omega + \Omega)$  y coeficientes (amplitudes) dependientes de  $\Omega$  y  $\omega$ . Dadas las propiedades de filtrado mecánico del montaje de péndulo de flexión, las Ecs. (A.4) a (A.10) de la Ref. 8 muestran que todo mecanismo productor de fuerzas relacionado con las magnitudes eléctricas mencionadas sólo podrá excitar el montaje a la frecuencia de modulación

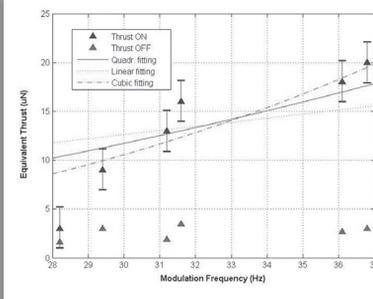


Figura 9.  
Empujes equivalentes “Thrust ON” and “Thrust OFF” vs. frecuencia de modulación, con varias curvas de ajuste.

y su segunda armónica.

Se asume que efectos espurios pueden presentarse en las situaciones siguientes:

- a) interacciones electrostáticas con el ambiente circundante (cargas libres e inducidas);
- b) auto-interacciones electrostáticas (cargas libres e inducidas);
- c) interacciones magnéticas con el ambiente circundante (corrientes libres e inducidas);
- d) auto-interacciones magnéticas (corrientes libres e inducidas);
- e) flujos de aire (vientos iónicos y sónicos);
- f) efectos radiométricos;
- g) interacción geomagnética;
- h) dilataciones térmicas por efecto Joule;
- i) potencia irradiada;
- j) intercambio de impulsos electromagnéticos y mecánicos;

Con el fin de lograr una estimación razonablemente precisa de los niveles de empuje espurios esperables, se elaboraron modelos COMSOL Multiphysics® de interacción simplificados aunque altamente conservativos para la mayoría de las situaciones enumeradas, o modelos analíticos para algunas de ellas, que son descriptos en las subsecciones siguientes. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1.

## Interacciones electrostáticas con el ambiente circundante por cargas libres

Los campos eléctricos debidos a cargas eléctricas estáticas en el ambiente circundante pueden actuar, sin duda, sobre cargas eléctricas presentes en las partes móviles del montaje experimental. Estas cargas se desarrollan principalmente sobre la caja electrónica de la PPU, la cual por requerimientos de diseño consiste de dos mitades aisladas eléctricamente con potenciales diferentes, como puede apreciarse en la Fig. 10. Estos potenciales se relacionan fuertemente con  $V$ , constituyendo éste el parámetro eléctrico dominante para el cálculo de cuplas actuantes sobre las cargas eléctricas libres. En consecuencia, su contribución a las cuplas “efectivas” a la frecuencia de modulación es nula.

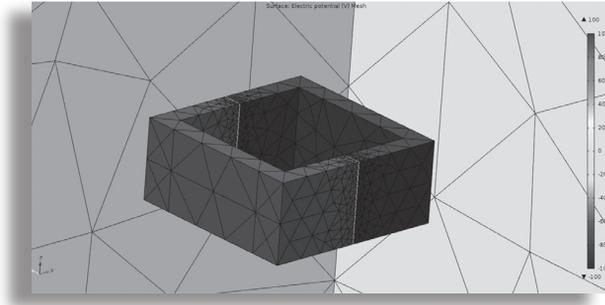


Figura 10.  
Modelo FEM de la  
caja electrónica de  
la PPU.

## Interacciones electrostáticas con el ambiente circundante por cargas inducidas

El campo eléctrico generado por la caja electrónica puede inducir polarización alternada en conductores y/o aisladores en las inmediaciones. La interacción electrostática entre estas cargas inducidas y el campo generador depende, por consiguiente, de  $V^2$ , de manera que las fuerzas efectivas a las frecuencias de modulación son del mismo orden de magnitud que las fuerzas actuales a la frecuencia de activación. La evaluación de los objetos próximos al montaje experimental permite identificar al cilindro de acero de una mesa vibradora como el elemento conductor más significativo entre todas las situaciones de interacción electrostática posibles. Esta situación se modeliza para la simulación COMSOL Multiphysics® como se muestra en la Fig. 11.

La fuerza de interacción se calcula mediante la integración de la presión electrostática (tensor de tensiones de Maxwell) actuantes sobre el contorno del cilindro.

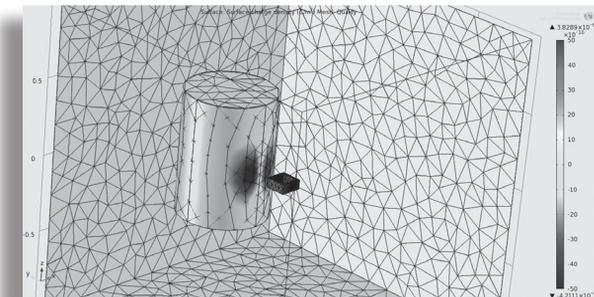


Figura 11.  
Modelo FEM de la  
caja electrónica de la  
PPU y el cilindro de  
la mesa vibradora.

## Auto-interacción por cargas libres

Entre las mitades de la caja electrónica de aluminio, se desarrollan campos eléctricos importantes con tensiones que alternan entre +100 V y -100 V. En consecuencia, se inducen cargas alternadas sobre esas partes dando lugar a fuerzas eléctricas por interacción con los campos generadores, las que por definición dependen de  $V_2$ . Por consiguiente, de acuerdo a la Ref. 8 las fuerzas efectivas a las frecuencias de modulación son del mismo orden de magnitud que las fuerzas actuales a la frecuencia de activación.

La simulación COMSOL Multiphysics® basada en el modelo mostrado en la Fig. 10 produce la fuerza actual de interacción entre las mitades de la caja electrónica. No obstante, la contribución real al movimiento del espécimen de ensayo se ve afectada por el factor de transmisibilidad mecánica (MTF) del material aislante (resina poliéster) intercalado entre las mitades, bajo la hipótesis de que una de las mitades se encuentra vinculada rígidamente al montaje sísmico sensor de vibraciones. Una estimación aproximada aunque altamente conservativa arroja valores de MTF alrededor de  $10^{-5}$ .

## Auto-interacción por cargas inducidas

También se inducen cargas eléctricas sobre las mitades de la caja electrónica por efecto de campos magnéticos alternados. La fuente más importante de estos campos son los bobinados toroidales de los módulos propulsivos RAMA que constan de una capa simple de arrollamiento helicoidal de alambre de cobre, en los que circula corriente alterna de 20 A-pico. Tratándose de bobinados toroidales, el único campo residual externo es aquel debido a la componente azimutal de dicha corriente helicoidal. El modelo asociado consiste en dos piezas conductoras anulares en las que circula la corriente azimutal. El campo magnético alternado resultante actúa sobre las mitades conductoras de la caja electrónica induciendo cargas eléctricas sobre ésta última, como se muestra en la Fig. 12. La fuerza actual de interacción entre las mitades dependen en este caso de  $V(dI/dt)$ ; las fuerzas efectivas a las frecuencias de modulación son, por consiguiente, del mismo orden de magnitud que las fuerzas actuales a la frecuencia de activación. Esta puede

ser calculada como la fuerza ejercida por las cargas libres en una de las mitades (modelo de la Fig.10) sobre las cargas inducidas en la otra mitad.

La fuerza efectiva real actuante sobre el montaje sísmico se ve atenuada por el factor de transmisibilidad ya estimado bajo el sub-encabezado precedente.

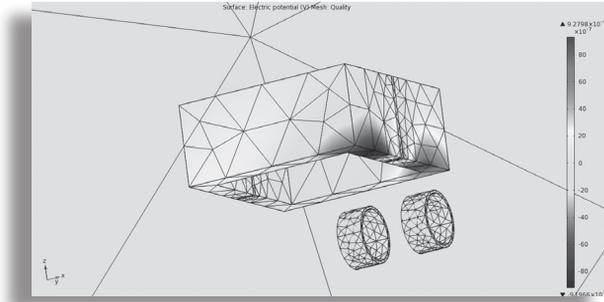


Figura 12.  
Modelo FEM de los  
módulos de propulsi3n  
RAMA y la caja  
electr3nica de  
la PPU.

## Interacci3n magn3tica con el ambiente circundante por corrientes libres

La eventual magnetizaci3n residual en conductores de las inmediaciones puede interactuar con los circuitos de potencia generando fuerzas y cuplas sobre el espec3men de ensayo. Las fuerzas y cuplas actuales de interacci3n dependen de  $I$ , que es el par3metro el3ctrico determinante y, por consiguiente, tales contribuciones a las frecuencias de modulaci3n son nulas.

## Interacci3n magn3tica con el ambiente circundante por corrientes inducidas

Los campos magn3ticos alternados generados por los circuitos de potencia del dispositivo RAMA inducen corrientes de Foucault en materiales conductores de las inmediaciones; estas, a su vez, pueden interactuar magn3ticamente con aquellos circuitos, generando fuerzas y cuplas sobre el espec3men de ensayo. El cilindro de acero de la mesa vibradora nuevamente se considera como la pieza conductora m3s importante de todas las situaciones de interacci3n magn3tica posibles, mientras que los circuitos de potencia se modelizan como dos l3minas cil3ndricas conductoras en las que circula la corriente azimutal alterna de 20 A-pico, como

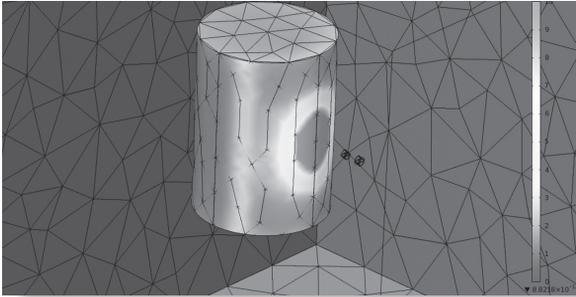


Figura 13.  
Modelo FEM de los módulos propulsivos RAMA y el cilindro de la mesa vibradora.

se muestra en la Fig. 13.

Las fuerzas y cuplas actuales de interacción entre el cilindro (pieza conductora externa) y el espécimen de ensayo dependen en este caso de  $I(dI/dt)$ . Estas se calculan mediante la integración de la presión magnética (tensor de tensiones de Maxwell) actuantes sobre el contorno del cilindro. De acuerdo a la Ref. 8 estas fuerzas actuales se reducen a fuerzas efectivas a las frecuencias de modulación por un factor de atenuación del orden de  $(\Omega/\omega)$ .

## Auto-interacción magnética por corrientes libres

Se identificaron las auto-interacciones magnéticas en cableados y arrollamientos de la PPU como fuentes potenciales importantes de ruido mecánico. Las configuraciones en “Sistema Cerrado” o autocontenidas implican que todos los circuitos involucrados deben ser cerrados y pertenecientes entonces a la masa sísmica (o móvil) completa del banco de empuje. Si se admiten alambres y fijaciones absolutamente rígidas, no pueden aparecer fuerzas desbalanceadas de manera que no habría contribución a los efectos observados. Si, por el contrario, partes de los circuitos son flexibles y/o vinculados flojamente a sus alojamientos, se desarrollarán movimientos internos bajo los efectos de fuerzas magnéticas debidas al resto de los circuitos. Se encontró que la contribución más significativa proviene de la interacción entre el capacitor y el bobinado toroidal dentro de cada módulo propulsivo, en los que tienen lugar las corrientes y campos magnéticos más elevados. Esta situación se modeliza para la simulación con COMSOL Multiphysics®, como se muestra en la Fig.14.

## EFFECTOS PROPULSIVOS INDUCIDOS ELECTROMAGNÉTICAMENTE EN DISPOSITIVOS "RAMA" AUTOCONTENIDOS

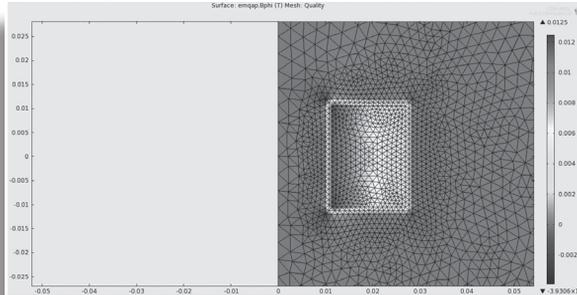


Figura 14.  
Modelo FEM de la interacción entre los componentes principales de los módulos propulsivos RAMA.

Las fuerzas actuales de interacción entre estos componentes dependen de  $I_2$ . Éstas se calculan integrando la presión magnética (tensor de tensiones de Maxwell) actuantes sobre el contorno del capacitor. Las fuerzas efectivas a las frecuencias de modulación son del mismo orden de magnitud que las fuerzas actuales pero estas se ven atenuadas sobre el montaje sísmico por el MTF del subconjunto capacitor-bobinado, incluyendo una pieza intercalar de acrílico. Una estimación altamente conservativa arroja un valor de MTF de alrededor  $10^{-3}$ .

## Auto-interacción magnética por corrientes inducidas

Otra fuente de ruido mecánico es la interacción entre corrientes libres y de Foucault en el espécimen de ensayo; la situación más significativa es la que involucra las corrientes de los bobinados principales y las corrientes inducidas sobre la caja electrónica de la PPU. Esta situación se modeliza

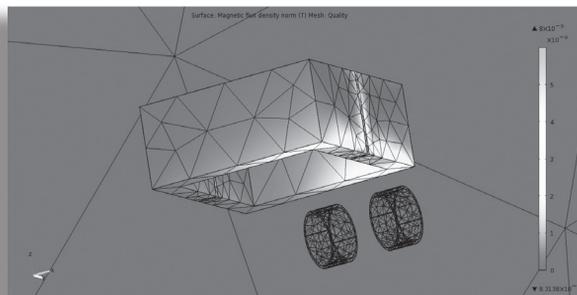


Figura 15.  
Modelo FEM de la interacción bobinados principales-caja electrónica de la PPU.

como se muestra en la Fig. 15. Las fuerzas actuales de interacción entre estas corrientes dependen de  $I(dI/dt)$  y se calculan por integración de la presión magnética (tensor de tensiones de Maxwell) actuante sobre el contorno completo de la caja electrónica. Las fuerzas efectivas a las frecuencias de modulación se obtienen aplicando el factor  $(\Omega/\omega)$  de atenuación a las fuerzas actuales, afectadas a su vez por el MTF del subconjunto bobinados principales-caja electrónica para la estimación de la fuerza residual actuante sobre el montaje sísmico. Una estimación altamente conservativa arroja un valor de MTF de alrededor  $10^{-3}$ .

## Flujos de aire por viento iónico

Se sabe que los ruidos mecánicos debidos a viento iónico son proporcionales a diferencias de potencial entre conductores en medios parcialmente conductores. La máxima diferencia de potencial presente en el dispositivo RAMA es 350 V-pico CA. Si se consideran electrodos con bordes agudos (radio 0.1 mm) con una separación de 2 mm, de acuerdo a la ley de Peek se encuentra que dicho voltaje es considerablemente inferior al valor crítico a partir del cual se produce viento iónico.<sup>12</sup> No surgirán fuerzas actuales debidas a este efecto.

## Flujos de aire por viento sónico

El viento sónico (también llamado “viento de cuarzo”) se produce por la interacción no-lineal del aire con partes vibrantes del montaje, manifestándose especialmente cuando las amplitudes de vibración de varias partes del montaje son diferentes. Es de aplicación en este tipo de montaje dado que la masa sísmica del mismo se mueve con respecto a otras; es el caso de las mitades de la caja electrónica de la PPU sujetas a fuerzas electrostáticas alternadas ya evocadas en la subsección Interacciones electrostáticas con el ambiente circundante por cargas inducidas. El movimiento oscilatorio producido por estas fuerzas genera un viento sónico con densidad de fuerza fluidica que por integración sobre todo el espacio (básicamente el dominio completo de cálculo) da una fuerza total de aproximadamente  $10^{-9}$   $\mu$ N.<sup>13</sup>

## Dilatación térmica por efecto Joule

La dilatación térmica de la caja electrónica de la PPU sujeta a calentamiento por efecto Joule en los transistores FET de potencia durante la operación de los dispositivos RAMA tiene un impacto sobre el comportamiento mecánico del montaje sísmico por los corrimientos asociados de su centro de masa. La situación se modeliza para la simulación COMSOL Multiphysics® como se muestra en la Fig.16, asumiendo una potencia térmica de entrada de 70 W-pico @ 2 MHz y graficando la evolución de la temperatura para el primer microsegundo. La dilatación térmica resultante se toma conservativamente como el desplazamiento total del centro de masa del espécimen de ensayo, cuya aceleración permite calcular las fuerzas actuales actuantes sobre el montaje sísmico. Dado que la temperatura depende de la potencia térmica de entrada, i.e., depende de  $I_2$ , lo mismo se aplica a la dilatación térmica, luego la fuerza actual asociada dependerá de  $d(I_2/dt)/dt$ . Las fuerzas efectivas a las frecuencias de modulación surgen de la atenuación por la cantidad  $(\Omega/\omega)^2$ .

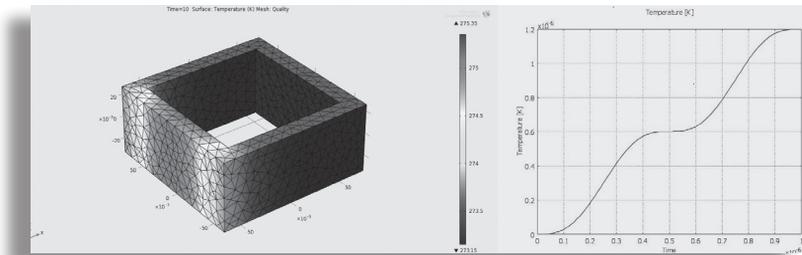


Figura 16. Modelo FEM de la dilatación térmica por efecto Joule de la caja electrónica de la PPU.

## Efectos Radiométricos

Estos efectos se presentan por calentamiento diferencial de distintas partes del espécimen de ensayo de manera tal que las moléculas de aire reflejadas adquieren mayor cantidad de movimiento en algunas regiones que en otras. En este caso, el calor es generado principalmente en la PPU y en los alojamientos de los módulos propulsivos. Una hipótesis altamente conservativa es que la temperatura solo se incrementa sobre un lado de la caja electrónica, siguiendo el patrón ya calculado en la subsección prece-

dente. De acuerdo a la Ref. 14 las fuerzas actuales a 2 Mhz (frecuencia de la portadora) dependen del gradiente de temperatura, i.e., de la potencia térmica de entrada con  $I_2$  como el parámetro eléctrico dominante. Las fuerzas efectivas a las frecuencias de modulación son, por consiguiente, del mismo orden de magnitud.

## Interacción geomagnética

En configuración “sistema cerrado”, el dispositivo generador de fuerzas es autocontenido, con todas sus partes constitutivas incluidas las baterías conformando la masa sísmica suspendida en el dispositivo de sensado de vibraciones. Por consiguiente, es de esperarse un acoplamiento de los circuitos de potencia con el campo geomagnético y, teniendo en cuenta que no hay partes externas de dichos circuitos, la interacción se desarrolla mediante lazos cerrados de corriente resultando necesariamente en la aplicación de cuplas sobre el montaje. Para espiras en las que circulan corrientes proporcionales a  $I$ , las cuplas actuales dependen de  $I$  de manera que las correspondientes cuplas efectivas son nulas. Sin embargo, dado que se requiere modular la tensión de salida de la PPU, la corriente a través de la batería  $I_s$  también resultará modulada en torno a un nivel prácticamente constante sin inversión de signo, generando cuplas a las frecuencias de modulación.

Dado que el dispositivo sensor de vibraciones es solo sensible a la componente de la cupla transversal a la dirección de movimiento, en el plano de la lámina soporte las componentes significativas del campo geomagnético con respecto a la lámina son la vertical (longitudinal) y la perpendicular. Estos componentes se relacionan con las proyecciones vertical (paralela al plano de la lámina) y horizontal del lazo de corriente, respectivamente. En consecuencia, para una orientación determinada de la PPU respecto de la lámina soporte, la cupla debida a la proyección vertical es una característica propia del montaje que no depende del azimut del banco de empuje. Por el contrario, la cupla debida a la proyección horizontal posee una dependencia funcional respecto del coseno de dicho ángulo. Orientando entonces el eje del espécimen de ensayo en la dirección de la proyección horizontal, es posible anular la contribución de esta última a la generación de cupla.

## Potencia irradiada

La presión debida a la radiación electromagnética emitida por el dispositivo se relaciona con  $VI$  (potencia eléctrica aparente). En consecuencia, la fuerza efectiva resulta de la atenuación de la fuerza actual por el factor  $(\Omega/\omega)$ . Admitiendo las condiciones más favorables posibles para la geometría del haz irradiado, las fuerzas actuales ascienden a  $50 \mu\text{N}$  mientras que las correspondientes fuerzas efectivas son de aproximadamente  $1.5 \text{ nN}$ .

## Intercambio de impulsos electromagnéticos y mecánicos

La generación de fuerzas por intercambio de cantidades de movimiento entre campos electromagnéticos y materia subsiste como una posibilidad teórica siempre que sea válida la aplicación del tensor de energía-impulso de Minkowski para la descripción de las interacciones campo EM-materia. Las fuerzas actuales se asocian, por consiguiente, a la derivada temporal de la cantidad de movimiento electromagnética total del sistema autocontenido y dependerán de  $d(VI)/dt$ , de manera que las fuerzas efectivas a las frecuencias de modulación resultarán por atenuación por el factor  $(\Omega/\omega)^2$ .

La observación de la Tabla 1 deja muy poco margen de explicación de los empujes observados invocando mecanismos físicos convencionales del tipo de los listados en ella. Esto significando, con muy alta probabilidad, que estos empujes representan la fracción detectable de niveles de empuje "actuales" del orden del kilo-Newton, actuantes sobre el espécimen de ensayo a la frecuencia de portadora de  $1 \text{ MHz}$  o el doble de esta frecuencia, modulados a frecuencia en el intervalo  $28\text{-}40 \text{ Hz}$ .

Tabla 1. Niveles Espurios de Empuje			
EFEECTO	Magnitud Eléctrica Dominante	Empuje @ Frecuencia Portadora, $\mu\text{N}$	Empuje @ Frecuencia Modulación, $\mu\text{N}$
a - Q libre	V	N.A.	0
a - Q inducida	$V^2$	2.E-3	2.E-3
b - Q libre	$V^2$	500	0.005
b - Q inducida	$V(dI/dt)$	6.E-14	6.E-19
c - I libre	I	N.A.	0
c - I inducida	$I(dI/dt)$	120	3.6E-6
d - I libre	$I^2$	1000	1
d - I inducida	$I(dI/dt)$	4.E-8	4.E-11
e - iónico	V	N.A.	0
e - sónico	$I^2$	1.E-9	1.E-9
f	VI	0.3	9.E-6
g	Is	10	2
h	$d(I dI/dt)/dt$	2.E6	1.8 E-3
i	VI	50	1.5 E-3
j	$d(VI)/dt$	1000	9. E-7

N.A. No Aplicable

## Conclusión

Las diversas mediciones de los efectos propulsivos en dispositivos RAMA han producido hasta el momento resultados contradictorios según el método de detección empleado: negativos en el caso del péndulo de torsión, positivos en el caso del banco de empuje tipo péndulo de flexión invertido. La reiteración de ensayos del dispositivo RAMA II sobre este último banco de empuje usando Vibrometría Laser Doppler arrojó datos experimentales que fueron sometidos a procesamientos numéricos y estadísticos intensivos. Como resultado de esta actividad de procesamiento se corroboró la existencia de empujes anómalos anteriormente observados y reportados para un intervalo de frecuencias de modulación por lo que, a su vez, se pudo establecer con alta verosimilitud una dependencia cuadrática de

estos empujes respecto de dichas frecuencias. Si éste es efectivamente el caso, los empujes modulados observados derivarían de empujes alternados actuales de órdenes del Newton al kilo-Newton. Se estimaron las contribuciones de efectos espurios debidos a mecanismos físicos convencionales mediante simulaciones COMSOL Multiphysics®, y se encontró que éstos no pueden explicar los efectos propulsivos observados. A los fines de descartar definitivamente la ocurrencia de mecanismos aún no considerados, se prevé continuar el trabajo experimental tendiendo a la rectificación del efecto observado, haciendo rotar el dispositivo generador de este efecto en sincronía con las frecuencias de modulación aplicadas. De verificarse tal rectificación, se habrá obtenido un efecto propulsivo utilizable en aplicaciones espaciales. Esto plantea, sin duda, un desafío a los paradigmas teóricos actualmente vigentes y deja abierta la cuestión acerca de su origen.

## Bibliografía

Brady, D. A., White, H. G. et al. (2014). "Anomalous Thrust Production from an RF Test Device Measured on a Low-Thrust Torsion Pendulum," 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. AIAA Paper 2014-4029, Cleveland, Estados Unidos.

Brito, H. H. (1999). "Propellantless Propulsion by Electromagnetic Inertia Manipulation: Theory and Experiment," AIP Conference Proceedings 458, American Institute of Physics, pp. 994-1004, Nueva York, Estados Unidos.

Brito, H. H. (2001). "Experimental Status of Thrusting by Electromagnetic Inertia Manipulation," Paper IAF-01-S.6.02, 52nd International Astronautical Congress, Toulouse, Francia. Acta Astronautica Journal, abril de 2004, Vol. 54/8, pp. 547-558.

Brito, H. H., Elaskar, S. A. (2006). "Advances in Electromagnetic Inertia Propulsion," Paper IAC-06-C.4.3.1, 57th International Astronautical Congress, Valencia, España.

Brito, H. H., Elaskar, S. A. (2007). "Direct Experimental Evidence of Electromagnetic Inertia Manipulation Thrusting," AIAA Jnl. of Propulsion and Power, Vol. 23, No. 2, Marzo-abril, pp. 489-494, Estados Unidos.

Brito, H. H., Marini, R. y Galian, E. S. (2009). "Null Findings on Electromagnetic Inertia Thrusting Experiments using a Torsion Pendulum," 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. AIAA Paper 2009-5070, AIAA, Washington DC, Estados Unidos.

Brito, H. H., Dominguez, C. A., De Alessandro, R. y Galian, E. S. (2012). "RAMA Experiment – Persistence of Anomalous Thrusting Effects using Laser Vibration Sensing," 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA Paper 2012-3862, Atlanta, Estados Unidos.

Fearn, H., Woodward, J. (2012). "Recent Results of an Investigation on Mach Effect Thrusters," 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA Paper 2012-3861, Atlanta, Estados Unidos.

Marini, R. y Galian, E. S. (2010). "Torsion Pendulum Investigation of Electromagnetic Inertia Manipulation Thrusting," AIAA Jnl. of Propulsion and Power, Vol. 26, No. 6, Noviembre-diciembre, pp. 1283-1290, Estados Unidos..

NASA Technology Roadmaps – TA 2: In-Space Propulsion Technologies(2015). Julio de 2015, Estados Unidos.

Nobili, A. M, et al. (2001). "Radiometer in space missions to test the equivalence principle," Physical Review D, Vol. 63, pp. (101101-1)-(101101-3).

Peek, F. W. (1929). "Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering," McGraw-Hill, Estados Unidos.

Squires, J. M., Quake, S. R. (2005). "Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale," *Reviews of Modern Physics*, Volume 77, Iss. 3, Julio–septiembre, Estados Unidos.

Technical Tips, "Converting between Sine Amplitude and PSD," m+p International [online database]. Recuperado de: <https://www.mpihome.com/en/service-support/technical-tips/converting-between-sine-amplitude-and-psd.html> [citado el 17 de junio de 2016].