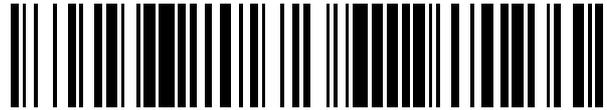


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 668 787**

21 Número de solicitud: 201830135

51 Int. Cl.:

G01L 5/13 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

15.02.2018

43 Fecha de publicación de la solicitud:

22.05.2018

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
(100.0%)**

**Avda. Ramiro de Maeztu nº 7
28040 MADRID ES**

72 Inventor/es:

**BARAJAS FERNANDEZ, Cintia;
BERZAL RUBIO, Miguel y
HERNANDEZ CIFUENTES, Rodrigo**

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

54 Título: **DISPOSITIVO DE MEDIDA DE EMPUJE PARA MOTORES DE PLASMA**

57 Resumen:

Dispositivo de medida de empuje para motores de plasma que comprende una bancada (1), un bastidor (2), un sensor de desplazamiento (7), dos mecanismos (3a,3b) de barras (31, 32, 33, 34, 35, 36), al menos cuatro juntas (41, 42, 43, 44) de articulación entre el bastidor (2) y los mecanismos (3a, 3b), donde cada mecanismo (3) junto con el bastidor (2) conforma un conjunto articulado a modo de mecanismo de cuatro barras de Chebyshev y donde el dispositivo está configurado para medir un empuje ejercido por el motor (5) de plasma a partir de la medida del desplazamiento de dicho motor(5) de plasma.

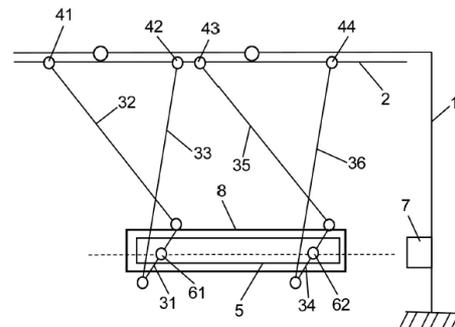


FIG.2

DESCRIPCIÓN

Dispositivo de medida de empuje para motores de plasma

5 **Objeto de la invención**

La presente invención se refiere a una balanza o dispositivo de medida de empuje para motores de plasma. Mediante el dispositivo de la invención, se pueden medir los empujes generados por pequeños motores de plasma, en el interior de cámaras de vacío de dimensiones reducidas.

El dispositivo de medida de empuje para motores de plasma objeto de la presente invención tiene aplicación en el ámbito de la Metrología, especialmente dentro del ámbito académico, para el ensayo de prototipos de motores de plasma de pequeñas dimensiones con accionamiento eléctrico, que son utilizados fundamentalmente en la industria aeroespacial.

Problema técnico a resolver y Antecedentes de la invención

20 Los propulsores de plasma, y particularmente los propulsores de plasma de baja potencia, disponen de empujes muy pequeños, del orden de los mN. Contrariamente a los motores-cohetes químicos, que proporcionan un empuje muy elevado (son útiles para alcanzar la velocidad de escape y salir de la atmósfera terrestre).

25 Los propulsores de plasma son adecuados para pequeños empujes en medio interplanetario (corregir órbitas de satélites por el efecto gravitatorio desigual de la tierra o depositar al satélite en una órbita destinada a los residuos fuera de su vida útil, o desintegrar el satélite forzando su reentrada en la atmósfera terrestre).

30 Si bien los motores-cohete químicos son experimentados en condiciones atmosféricas, los propulsores de plasma deben ser experimentados en cámaras de vacío, pues éstas son sus condiciones de trabajo nominales: el entorno de vacío interplanetario.

Es imperativo conocer el rendimiento del motor (relación entre la energía consumida y la energía dedicada a moverse). La energía que se dedica al movimiento del motor o propulsor es el empuje. Y se necesita medir directamente en el propulsor.

5 El propulsor de plasma está caracterizado por ionizar, mediante colisiones de electrones, los átomos del gas inerte propelente (normalmente un gas noble, como el Xenón). Una vez que estos átomos han dejado de ser neutros, se pueden someter a un campo electrostático y acelerar hacia fuera del propulsor. Cuando están fuera del propulsor, se les suministra de nuevo el electrón, que les neutraliza.

10 En este proceso, se ha promovido un intercambio de energía. A través de un campo electrostático, se ha producido un intercambio de cantidad de movimiento entre el gas ionizado y el propulsor. Esto es lo que provoca el empuje (lo cual es el objeto de caracterización/medición por parte del dispositivo de la presente invención).

15 Se requiere, por tanto, crear algún tipo de mecanismo que se desplace cuando el propulsor comienza a funcionar. Este mecanismo que se desplaza se llama balanza de empuje (o *thrust stand*, en inglés).

20 Las configuraciones preponderantes de balanzas de empuje para propulsores de plasma son las fundamentadas en los péndulos.

Existen fundamentalmente tres tipos de péndulos para ser utilizados en balanzas de empuje: péndulo torsional, péndulo invertido y péndulo colgante.

25 El péndulo de torsión (TP, por sus siglas en inglés) requiere un contrapeso, y por lo tanto, mayor fricción en la articulación. Requiere una cámara de dimensiones muy grandes, pues los brazos (a cada lado del pivote) deben ser lo suficientemente amplios como para ubicar el contrapeso y el motor de plasma cuyo empuje se desea medir.

30 El péndulo invertido (IT, por sus siglas en inglés) requiere sistemas de control electrónico y automático PID para impedir la deflexión completa (o vuelque del péndulo) y la pérdida de control sobre el único punto de equilibrio del sistema (punto de equilibrio inestable: "repulsor").

El péndulo colgante (HT, por sus siglas en inglés), por su parte, ofrece poco control sobre el movimiento del motor y permite un desplazamiento mucho menor para cámaras de vacío pequeñas.

- 5 A continuación se enumeran algunas balanzas o dispositivos de medida de empuje para motores de plasma conocidos.

Los que a continuación se enumeran, son una selección de las balanzas consideradas como más representativas de su especie.

10

Estos aparecen reflejados en la siguiente tabla.

Institución	Tipo	Propulsor	Rango	Tolerancia
TASI/INMT/PT	HP	Micro	≤ 1 mN	0,1 μN
NIAIST/KIT	HP	CGT	0,14 - 1,25 N	-
SSC/EADSA	HP/IP	HCT/HDLT	1,2 - 10 / 0,8 - 4,2 mN	-
IU/ANU/EADSA/SSC	HP	PM-HDLT	0 - 3 mN	0,034 mN
PU/NASA	TP	QSMPDT	20 μN - 10 N	10 μN
USC/AFRL	TP	Micro	88,8 nN - 1μN	-
GSFC	TP	CIE	4,4 μN - 222 mN	5%
UH/UM/AA/NASA	PMFS	VASIMR	0 - 1.000 mN	0,1 mN

Los acrónimos usados en la columna encabezada por “Institución” significan:

15

TASI/INMT/PT: Thales Alenia Space Italia - Italian National Metrology Institute - Polytechnic of Turin.

20

NIAIST/KIT: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology - Kyusyu Institute of Technology (Department of Mechanical Engineering).

SSC/EADSA: Surrey Space Centre - EADS Astrium.

25

IU/ANU/EADSA/SSC: Iwate University - Australian National University (Space Plasma, Power and Propulsion Group, Research School of Physics and Engineering) - EADS Astrium - Surrey Space Centre.

PU/NASA: Princeton University – NASA.

USC/AFRL: University of Southern California (Department of Aerospace and Mechanical Engineering) - Air Force Research Laboratory, Propulsion Directorate.

5 Los acrónimos que se muestran en la columna “Tipo” se refieren a que existen, como ya se ha mencionado anteriormente, tres principales configuraciones tradicionales (HP, IP, TP) posibles cuando se miden las fuerzas o empujes ejercidas por propulsores eléctricos (James E Polk, Anthony Pancotti, Thomas Haag, Scott King, Mitchell Walker, Joseph Blakely, and John Ziemer. *Recommended practices in thrust*
10 *measurements*. Technical report, DTIC Document, 2013.).

Además, se han añadido dos tipos adicionales a los estudiados tradicionalmente, que son el cuarto (M) y quinto ítem (PMFS) que siguen:

15 1. Péndulos:

- Péndulo colgante (HP)
- Péndulo invertido (IP)
- Péndulo torsional (TP)

20

2. Mecanismo (M)

3. Sensor de momento del flujo de plasma (PMFS)

25 Los acrónimos que se muestran en la columna “Propulsor” se refieren a:

Micro: Microthruster (ver LISA-Pathfinder, Microscope and GAIA programs).

CGT: Cold Gas Thruster

30

HCT: Hollow Cathode Thruster

HDLT: Helicon Double Layer Thruster

35 PM-HDLT: Permanent Magnet Helicon Double Layer Thruster

QSMPDT: Quasi-steady Magnetoplasma Dynamic Thruster

CIE: Cesium Ion Engine

5 VASIMR: Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket

A continuación se desarrollan los aspectos constructivos de estos dispositivos del estado de la técnica.

10 Balanza TASI/INMT/PT:

Es una nanobalanza de precisión para propulsores eléctricos creada por Thales Alenia Space Italia en cooperación con el Instituto Nacional de Metrología de Italia y la Politécnica de Turin (Stefano Cesare, Fabio Musso, Filippo D'Angelo, Giuseppe
15 Castorina, Marco Bisi, Paolo Cordiale, Enrico Canuto, Davide Nicolini, Eliseo Balaguer, and Pierre-Etienne Frigot. *Nanobalance: the european balance for micro-propulsion. In 31st International Electric Propulsion Conference*, pages 1–20, 2009.). Algunas características de esta herramienta de precisión son:

- 20 - Soporte del propulsor: consiste en dos platos deflectores, elaborados en aleación de cobre y berilio, cada uno conectado a través de una junta elástica a un espaciador rígido elaborado en Zerodur®. En el espaciador rígido está el inclinómetro.
- 25 - Diámetro interior de la cámara de vacío: 1.2 m. Descansa sobre cuatro aislantes neumáticos
- Sistema metrológico y de medida: Es un interferómetro laser Fabry-Perot y una configuración optomecánica.

30

Éste es un ejemplo de una balanza de precisión altamente sensible realizada con materiales de elaboración especializada, sofisticados sistemas de control y filtración de ruido en la señal.

35 Balanza NIAIST/KIT:

Un ejemplo de un péndulo colgante ordinario es el Thrust Stand de Kakami (Akira Kakami, R Hiyamizu, S Masaki, and T Tachibana. *A preliminary study on an active-controlled thrust stand for thrust variation measurement*. In PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPACE TECHNOLOGY AND SCIENCE, volume 5 25, page 212, 2006.).

Aunque no es una balanza creada específicamente para un propulsor de plasma (sino que es para un propulsor de gas frío), se ha determinado incluirla en este apartado de antecedentes.

10

La gran diferencia entre este modelo y el resto de instrumentos mencionados en la tabla anterior es la magnitud de los empujes nominales que mide. El aparato de Kakami es capaz de medir satisfactoriamente fuerzas de 1.25 N. Algunas características de esta balanza son:

15

- Actuador cilíndrico electromagnético, diseñado para el control activo del empuje (que varía con el tiempo).
- Sistema de control PID y RTAI (real application interface); el último creado por el Politécnico de Milán.
- Articulaciones mecánicas: articulaciones sin rozamiento como pivotes flexores.

20

Balanza SSC/EADSA:

25

Otra publicación que cabe destacar es la siguiente, realizada por Pottinger, Lamprou, Knoll y Lappas (SJ Pottinger, D Lamprou, AK Knoll, and VJ Lappas. *Impact of plasma noise on a direct thrust measurement system*. Review of Scientific Instruments, 83(3):033504, 2012.). Estos autores añaden otra herramienta para comparar cada medida que obtienen a través de un sensor opto-mecánico. Lo que usan es un LVDT (*linear variable differential transformer*).

30

Esta publicación se centra en cómo el ruido del plasma puede crear perturbaciones en este tipo de sensores electromagnéticos.

35

Comparando las mediciones realizadas por un LVDT y un láser, cuando el gas inerte es introducido en el sistema, no hay una diferencia significativa en las dos lecturas, pero una vez que el gas es ionizado y se genera un flujo de plasma, no hay comparación con los resultados obtenidos por estos dos sensores.

- 5 El flujo de plasma crea mucho ruido en la señal dada por el LVDT. Si un LVDT es requerido, es completamente obligatorio filtrar la señal. De todos modos, no es el mejor sensor con el que trabajar. Aunque puede ser útil para la caracterización del gas inerte todavía sin ionizar, o quizá para el proceso de calibración.
- 10 El diámetro interior de la cámara de vacío es de 1,2 m.

Balanza IU/ANU/EADSA/SSC:

La configuración siguiente de doble péndulo puede encontrarse en un experimento liderado por la Universidad Nacional Australiana y la Universidad de Iwate, en cooperación con Astrium-EADS y el Surrey Space Centre. Algunos de sus requerimientos previos eran:

- 20 - Cámara de vacío: la cámara Irukandji simula las condiciones del espacio interplanetario y tiene un diámetro de 1m.
- Sensor láser: alta sensibilidad, con un escudo de radio frecuencias Micro-Epsilon, sensor de desplazamiento láser.
- 25 - Proceso de calibración simple. Equivalencia: 340 mN/mm. Resolución: 0.034 mN.

Balanza PU/NASA:

30 El Laboratorio de Propulsión Eléctrica y Dinámica del Plasma de la Universidad de Princeton ha diseñado y estudiado el comportamiento de un péndulo torsional (EA Cubbin, JK Ziemer, EY Choueiri, and RG Jahn. *Pulsed thrust measurements using laser interferometry*. Review of Scientific Instruments, 68(6):2339–2346, 1997.). El diámetro interno de la cámara es de 2 m. La publicación nos da asimismo información acerca de las juntas sin rozamiento que estos investigadores usaron: 6016 *Bendix free-flex pivots*.

35

Con respecto al sistema de calibración, se destacan las múltiples similitudes de PIPTS11 (Princeton Inverted Pendulum Thrust Stand) con el prototipo hecho por la Universidad Nacional Australiana y la Universidad de Iwate.

- 5 Utilizan un sistema de calibración mecánica basado en un par de peso y polea, óptimo desde el punto de vista de simplicidad, y eficiente con vistas a obtener una curva de calibración. En este mismo texto, destacan los efectos adversos de la gestión térmica y su evacuación para evitar desperfectos en las articulaciones. Mencionan además cómo el aumento de temperatura provoca un cambio en la sensibilidad del aparato de
10 medida.

Balanza USC/AFRL:

El sistema de calibración peso-polea no es siempre efectivo. El Departamento de
15 Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de la Universidad del Sur de California (USC) se enfrentó a varios retos en el desarrollo y calibración de su nanobalanza. El rozamiento de la polea tuvo un papel muy significativo en este aspecto, convirtiéndose en algo no despreciable. Sus características principales son:

- 20 - Balanza de péndulo torsional.
- Sensor: LVDT.
- Diámetro interno de la cámara de vacío: 3 m.
- 25 - Para medidas de empuje superiores a $1 \mu\text{N}$, los brazos de la balanza de empuje son de 25 cm de largo desde el centro de rotación.
- Pivote flexor situado en el punto medio de los extremos de los brazos.
- 30 - Para medidas de empuje por debajo de $1 \mu\text{N}$, "la calibración utiliza medidas del empuje de orificios con paredes finas, infraexpandidos, en régimen de flujo de moléculas libres, corregido con los resultados analíticos de simulación DSMC (Direct Simulation Monte Carlo)".

35

- Rango de medida: 88.8 nN a 1 μ N nN.

Balanza GSFC:

Respecto a cómo los prototipos evolucionan con el tiempo, en 1970, Stark and
5 McHugh, en Goddard Space Flight Centre (NASA) realizaron una publicación relevante
(T Dennis, GODDARD SPACEFLIGHT Center, MD Greenbelt, et al. *Design and
development of a micropound extended range thrust stand/merts*. In 8th Electric
Propulsion Conference, page 1111, 1970.), donde se encuentran sugerencias muy
adecuadas para una correcta práctica de la medida del empuje en propulsores
10 diversos. Los siguientes puntos fuerza se fundamentaron en sus experiencias previas
no satisfactorias. Sus diseños evolucionaron al prototipo final, con las siguientes
características:

- Rango de medida: desde 4.4 μ N a 222 mN.
15
- Pesos del propulsor soportados, hasta 133 N.
- Sistema sin rozamientos basado en pivotes flexores.
- Alimentación eléctrica para el propulsor a través del pivote flexor.
20
- Calibración in situ.

Sensor de momento del flujo de plasma UH/UM/AA/NASA:

25 Aunque este método de análisis de empuje se aleja del campo técnico de la presente
invención, cabe mencionar las siguientes dos publicaciones debido a su incipiente
interés para sistemas auxiliares o comparativos entre el empuje efectuado por el
propulsor y la cantidad de movimiento del flujo de plasma:

30 Benjamin W Longmier, Edgar A Bering, JP Squire, TW Glover, FR Chang-Díaz, and M
Brukardt. *Hall thruster and vasimr vx-100 force measurements using a plasma
momentum flux sensor*. In 47th AIAA aerospace sciences meeting including the new
horizons forum and aerospace exposition, AIAA-246, Orlando, 2009;

35

y,

Benjamin W Longmier, Bryan M Reid, Alec D Gallimore, Franklin R Chang-Díaz, Jared P Squire, Tim W Glover, Greg Chavers, and Edgar A Bering. *Validating a plasma momentum flux sensor to an inverted pendulum thrust stand*. Journal of Propulsion and Power, 25(3):746–752, 2009.

El punto positivo de este tipo de sensores es su eficiencia en cuanto al coste y la simplicidad asociada a su construcción. Sirve perfectamente para propulsores que sean muy pesados. Muestran un error relativo, con respecto a los péndulos invertidos de una media del 2% para una amplia gama de fuerzas.

A la vista de los diferentes sistemas del estado de la técnica, se han observado los siguientes problemas técnicos:

15

- Muchos de dichos sistemas precisan de complejos equipos electrónicos (como el LVDT) para aportar un nivel adecuado de sensibilidad y precisión en la medida que, aparte de tener un coste relativamente elevado, son vulnerables a las interferencias ocasionadas por el plasma ionizado;

20

- Los sistemas del estado de la técnica precisan ser implementados en cámaras de vacío de grandes dimensiones, generalmente de dimensiones alrededor de un metro de diámetro, o superiores.

25 **Descripción de la invención**

Con objeto de aportar una solución a los problemas mencionados, se presenta el siguiente dispositivo de medida de empuje para motores de plasma.

30 El dispositivo de medida de empuje para motores de plasma objeto de la presente invención incorpora: una bancada, un bastidor, un sensor de desplazamiento, al menos dos mecanismos, y al menos cuatro juntas de articulación entre el bastidor y los mecanismos.

35 Cada mecanismo comprende:

- una primera barra configurada para unirse con giro loco mediante una unión pivotante a un motor de plasma, donde la unión pivotante está situada en correspondencia con un punto intermedio de la primera barra;
- una segunda barra, unida con giro loco a un primer extremo de la primera barra, y unida también con giro loco a una primera junta de articulación con el bastidor;
- una tercera barra, unida con giro loco a un segundo extremo de la primera barra, y unida también con giro loco a una segunda junta de articulación con el bastidor.

5

10

El dispositivo está configurado para medir un empuje ejercido por el motor de plasma a partir de la medida del desplazamiento de dicho motor de plasma.

15

De manera preferente, el dispositivo de medida de empuje para motores de plasma incorpora un soporte configurado para acomodar y sujetar el motor de plasma y configurado para hacer de intermediación entre las respectivas primeras barras de los mecanismos y el motor de plasma. De esta forma, cada primera barra está configurada para unirse con giro loco mediante su respectiva unión pivotante al soporte del motor de plasma.

20

De manera preferente, el sensor de desplazamiento es un sensor optomecánico. Más preferentemente, dicho sensor de desplazamiento optomecánico es un sensor láser y, aún más preferentemente, dicho sensor de desplazamiento optomecánico láser es un sensor por triangulación.

25

Según una posible forma de realización del dispositivo, el bastidor está articulado con respecto a la bancada. Esto posibilita añadir grados de libertad al movimiento del motor de plasma durante los ensayos.

30

Alternativamente, el bastidor puede estar unido de forma fija con respecto a la bancada.

35

De manera preferente, al menos una de las juntas articuladas comprende un resorte de torsión o pivote flexor. Mediante este resorte de torsión, al menos la segunda barra o tercera barra de al menos uno de los mecanismos presenta una limitación en el giro que es capaz de realizar con respecto al bastidor. Esto acota el movimiento del

dispositivo (es decir, acota el desplazamiento total que puede presentar el motor de plasma una vez montado en el dispositivo de la invención) y minimiza el rozamiento de la posición estática inicial.

5 Breve descripción de las figuras

Como parte de la explicación de al menos una forma de realización preferente del dispositivo de medida de empuje para motores de plasma, se ha incluido la siguiente figura, en donde con carácter ilustrativo y no limitativo se representa lo siguiente.

10

Figura 1: Muestra una representación esquemática simplificada de tres tipos de balanzas de medida de empuje de motores de plasma en el estado de la técnica, cada uno de los tres tipos de balanzas basado respectivamente en un péndulo de torsión (TP), un péndulo invertido (IP) y un péndulo colgante (HP).

15

Figura 2: Muestra una representación esquemática simplificada de una primera forma de realización del dispositivo de medida de empuje para motores de plasma objeto de la presente invención.

20

Figura 3: Muestra un diagrama simplificado del funcionamiento del dispositivo de la invención, según la primera forma de realización del dispositivo.

Figura 4: muestra una representación esquemática de los cabeceos que experimenta el motor de plasma cuando se emplea un dispositivo con un único mecanismo, estando el empuje aplicado sobre una línea que no pasa por el centro de masas del motor de plasma.

25

Descripción detallada

30

La presente invención se refiere, como ya se ha mencionado anteriormente, a un dispositivo de medida de empuje para motores (5) de plasma.

La Figura 1, como ya se ha mencionado, muestra una representación esquemática simplificada de tres tipos de balanza de medida de empuje, E, de motores de plasma, existentes en el estado de la técnica, cada una de dichas balanzas basada

35

respectivamente en un péndulo de torsión (TP), un péndulo invertido (IP) y un péndulo colgante (HP). En dicho péndulo se incorpora una masa de peso, P, y se aplica un contrapeso, C. Para la medida del empuje, E, se mide típicamente un desplazamiento, δ , de la masa.

5

El dispositivo de medida de empuje para motores (5) de plasma objeto de la presente invención comprende una bancada (1), un bastidor (2), al menos dos mecanismos (3a, 3b) de barras (31, 32, 33, 34, 35, 36), al menos cuatro juntas (41, 42, 43, 44) articuladas (o pares cinemáticos) entre el bastidor (2) y los mecanismos (3a, 3b),
10 donde los mecanismos (3a, 3b) están configurados para unirse a un motor (5) de plasma mediante al menos una unión pivotante (61, 62).

Preferentemente, al menos una junta (41) articulada es un pivote flexor/resorte de torsión. El resto de juntas (42, 43, 44) articuladas puede realizarse, por ejemplo, a
15 modo de rodamiento de lubricación (en este caso se trataría de rodamientos de lubricación seca, ya que han de trabajar en condiciones de vacío dentro de la cámara de vacío).

Según una posible forma de realización, el bastidor (2) está articulado con respecto a
20 la bancada (1), de manera que permite más grados de libertad en el desplazamiento del motor (5) de plasma al aplicar el empuje.

Según otra posible forma de realización, el bastidor (2) está anclado a la bancada (1), de modo que el bastidor (2) no aporta grados de libertad al movimiento del motor (5)
25 de plasma.

El dispositivo comprende un sensor de desplazamiento (7), preferentemente optomecánico, y más preferentemente un sensor de desplazamiento (7) configurado para emitir un haz de láser enfocado hacia el motor (5) de plasma y detectar
30 desplazamientos por triangulación.

Según una primera forma de realización del dispositivo, un primer mecanismo (3a) está constituido por tres barras (31, 32, 33) que, junto con el bastidor (2) que une las al menos cuatro juntas (41, 42, 43, 44) articuladas, constituye un mecanismo de cuatro
35 barras de Chebyshev.

Según esta primera forma de realización del dispositivo, un segundo mecanismo (3b) está constituido por tres barras (34, 35, 36) que, junto con el bastidor (2) que une las al menos cuatro juntas (41, 42, 43, 44) articuladas, constituye un mecanismo de cuatro barras de Chebyshev.

5

Según esta primera forma de realización, cada mecanismo (3a, 3b) consta de una primera barra (31, 34) unida con giro loco mediante una unión pivotante (61, 62) al motor (5) de plasma. La unión pivotante (61, 62) se sitúa en correspondencia con un punto intermedio de la primera barra (31, 34), preferentemente en correspondencia con su punto medio. Cada mecanismo (3a, 3b) comprende una segunda barra (32, 35), unida con giro loco a un primer extremo de la primera barra (31, 34), y unida también con giro loco a una primera junta (41, 43) articulada. Cada mecanismo (3a, 3b) incorpora igualmente una tercera barra (33, 36), unida con giro loco a un segundo extremo de la primera barra (31, 34), y unida también con giro loco a una segunda junta (42, 44) articulada.

10

15

La Figura 2 muestra una representación esquemática simplificada de un dispositivo de medida de empuje para un motor (5) de plasma, según la primera forma de realización.

20

Según otras formas de realización (no mostradas en las figuras), el dispositivo incorpora más de dos mecanismos, cada uno de ellos unido mediante su respectiva unión pivotante con el motor de plasma.

25

Preferentemente, el dispositivo comprende un soporte (8) configurado para acomodar y sujetar el motor (5) de plasma, de tal manera que el soporte (8) hace de intermediación entre cada mecanismo (3a, 3b) y el motor (5) de plasma.

30

Frente a las configuraciones de balanzas existentes en el estado de la técnica, basadas fundamentalmente en los tres tipos de péndulo (torsión, invertido, colgante), la principal novedad de la presente invención es la utilización de los mecanismos (3) descritos, cada uno de ellos considerado como un mecanismo de cuatro barras de línea aproximadamente recta de Chebyshev.

35

El mecanismo de Chebyshev presenta la posibilidad de una trayectoria rectilínea aproximada en el punto central de las barras acopladoras. Se conoce como línea recta

aproximada porque la trayectoria presenta un ligero desplazamiento perpendicular al grado de libertad. El efecto es tan insignificante (al menos en la presente invención), que el error de desplazamiento vertical se desprecia, pudiéndose considerar como línea recta real y no aproximada.

5

Las barras (31, 32, 33, 34, 35, 36) de los mecanismos (3a, 3b) giran para que el desplazamiento lineal del motor (5) se dé en línea recta (ver la línea recta discontinua en la Figura 2), teniendo en cuenta que todo el desplazamiento realizado se da debido a un empuje coaxial al motor (5) (1 grado de libertad). Si existieran componentes
10 verticales del empuje, no se tendrían en cuenta (o se considerarían despreciables para 1 grado de libertad).

La Figura 3 muestra un motor (5) de plasma montado en un dispositivo de medida de empuje, según la primera forma de realización de la invención. Se observa una flecha
15 que indica la dirección del empuje ejercido por el motor (5) de plasma, así como las posiciones inicial (arriba) antes de aplicar el empuje ($t=0$), y final (abajo) después de aplicar el empuje ($t=\Delta t$). En el centro de la Figura 3 se observa el desplazamiento, δx , unidireccional que experimenta el motor (5) de plasma al aplicar el empuje, y en líneas discontinuas se observa la configuración de las barras (31, 32, 33, 34, 35, 36) de cada
20 mecanismo (3a, 3b) en cada una de las posiciones inicial y final.

Mediante una configuración equilibrada de dos mecanismos (3a, 3b) como la correspondiente a la primera forma de realización del dispositivo, se evitan posibles cabeceos del motor (5) de plasma durante la aplicación del empuje.

25

La Figura 4 muestra un pequeño esquema de los cabeceos que experimentaría el motor (5) de plasma si se emplease un dispositivo con un único mecanismo (3), estando el empuje aplicado sobre una línea que no pasa por el centro de masas del motor (5) de plasma.

30

Mediante la primera forma de realización del dispositivo, se consigue un equilibrado mecánico del motor (5) de plasma al duplicarse el mecanismo (3) del dispositivo.

El carácter modular del dispositivo activa la posibilidad de añadir más grados de
35 libertad al dispositivo, permitiendo el movimiento del bastidor (2) o introduciendo más

bastidores, se hace posible que el dispositivo de la invención pueda medir desplazamientos no necesariamente unidireccionales.

5 El sensor de desplazamiento (7) láser mediante triangulación proporciona sensibilidades de medida de 1 μm o menos.

El dispositivo de medida de empuje para motores (5) de plasma objeto de la presente invención está configurado preferentemente para medir empujes del orden de 1 mN, con una sensibilidad de 0,1 mN.

10

El punto sobre el cual se efectúa la medida de desplazamiento es arbitrario, si bien es preferible que el sensor de desplazamiento (7) no se sitúe en la parte trasera del motor (5) de plasma, ya que el chorro de plasma generado por el motor (5) puede resultar altamente perjudicial para el sensor de desplazamiento (7).

15

La localización del sensor (7) de desplazamiento o de cualquier otro sensor secundario estará preferentemente lejos del flujo de plasma del motor (5) debido a su elevada temperatura y a su carácter de gas ionizado, que es fuente de interacciones electromagnéticas indeseables con dispositivos electrónicos, como puede ser un LVDT (en caso de que decidiera usarse un LVDT en combinación con el dispositivo de la invención).

20

El dispositivo de medida de empuje para motores (5) de plasma objeto de la presente invención, está configurado para funcionar en el interior de una cámara de vacío (no representada), que simula las condiciones reales de vacío en las que funcionan los motores (5) de plasma de satélites artificiales.

25

El dispositivo permite ser realizado en dimensiones reducidas (dependiendo del tamaño del motor de plasma a ensayar), estando capacitado para funcionar en cámaras de vacío de diferentes tamaños, preferentemente cámaras de vacío de 500 mm de diámetro o inferiores.

30

Para dimensionar el dispositivo, se tendrá en cuenta preferentemente el tamaño del motor (5) de plasma y la posición de reposo inicial para estabilizar el motor (5) de plasma.

35

La capacidad del dispositivo de ser empleado en cámaras de vacío de dimensiones reducidas posibilita que el dispositivo de la invención sea de gran utilidad para instituciones académicas, que en ocasiones cuentan con un presupuesto limitado, y no pueden permitirse los elevados costes de adquisición y manejo de una cámara de
5 vacío de grandes dimensiones.

Asimismo, las barras (31, 32, 33, 34, 35, 36) de los mecanismos (3a, 3b) del dispositivo se fabrican preferentemente mediante corte por láser, siendo las barras (31, 32, 33, 34, 35, 36) preferentemente láminas de aluminio. Este hecho asegura un
10 carácter fácilmente comercializable del dispositivo, ya que se estima que el coste total del dispositivo de la invención es de aproximadamente la décima parte que otras balanzas de medida de empuje del estado de la técnica.

El empleo de un sensor de desplazamiento (7) de tipo optomecánico (preferentemente
15 láser) para medir desplazamientos del motor (5) de plasma aporta (frente a otros sistemas de medida como el LVDT mencionado en el apartado de antecedentes) la ventaja diferencial de que se consigue poder realizar medidas en ausencia de ruido creado por las interferencias que el gas ionizado (plasma) en movimiento (con el consecuente campo electromagnético inducido) crea sobre un sensor como el LVDT
20 que se fundamenta en la variación de campos electromagnéticos con el desplazamiento de un núcleo que induce un campo magnético variable (por una corriente alterna que circula en una bobina primaria). Asimismo cualquier tipo de sensor o motor electrónico (que eventualmente decidiese utilizarse) se vería afectado por la presencia de un gas ionizado en movimiento, que genera campos
25 electromagnéticos descontrolados, en definitiva, ruido en la señal medible.

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de medida de empuje para motores de plasma **caracterizado** por que comprende: una bancada (1), un bastidor (2), un sensor de desplazamiento (7), al menos dos mecanismos (3a, 3b), al menos cuatro juntas (41, 42, 43, 44) de articulación entre el bastidor (2) y los mecanismos (3a, 3b), donde cada mecanismo (3a, 3b) comprende:

- una primera barra (31, 34) configurada para unirse con giro loco mediante una unión pivotante (61, 62) a un motor (5) de plasma, donde la unión pivotante (61, 62) está situada en correspondencia con un punto intermedio de la primera barra (31, 34);

- una segunda barra (32, 35), unida con giro loco a un primer extremo de la primera barra (31, 34), y unida también con giro loco a una primera junta (41, 43) de articulación con el bastidor (2);

- una tercera barra (33, 36), unida con giro loco a un segundo extremo de la primera barra (31, 34), y unida también con giro loco a una segunda junta (42, 44) de articulación con el bastidor (2);

donde el dispositivo está configurado para medir un empuje ejercido por el motor (5) de plasma a partir de la medida del desplazamiento de dicho motor (5) de plasma.

2. Dispositivo de medida de empuje para motores de plasma según la reivindicación 1, **caracterizado** por que comprende un soporte (8) configurado para acomodar y sujetar el motor (5) de plasma y configurado para hacer de intermediación entre las respectivas primeras barras (31, 34) de los mecanismos (3a, 3b) y el motor (5) de plasma, de manera que cada primera barra (31, 34) está configurada para unirse con giro loco mediante su respectiva unión pivotante (61, 62) al soporte (8) del motor (5) de plasma.

3. Dispositivo de medida de empuje para motores de plasma según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** por que el sensor de desplazamiento (7) es un sensor optomecánico.

4. Dispositivo de medida de empuje para motores de plasma según la reivindicación 3, **caracterizado** por que el sensor de desplazamiento (7) optomecánico es un sensor láser.
- 5 5. Dispositivo de medida de empuje para motores de plasma según la reivindicación 4, **caracterizado** por que el sensor de desplazamiento (7) optomecánico láser es un sensor por triangulación.
- 10 6. Dispositivo de medida de empuje para motores de plasma según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** por que el bastidor (2) está articulado con respecto a la bancada (1).
- 15 7. Dispositivo de medida de empuje para motores de plasma según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado** por que el bastidor (2) está unido de forma fija con respecto a la bancada (1).
- 20 8. Dispositivo de medida de empuje para motores de plasma según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** por que al menos una de las juntas articuladas (41, 42, 43, 44) comprende un resorte de torsión.

20

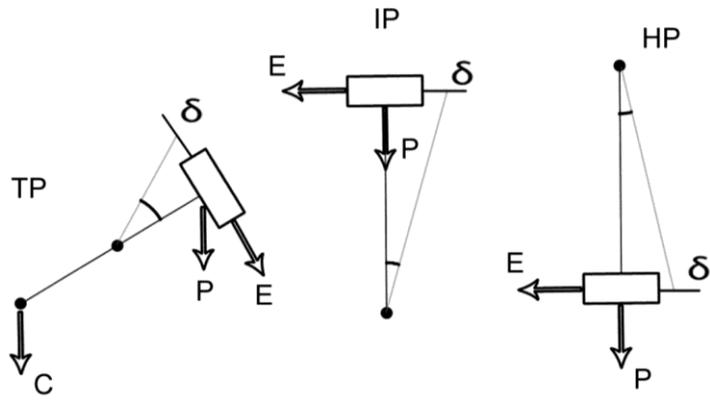


FIG.1

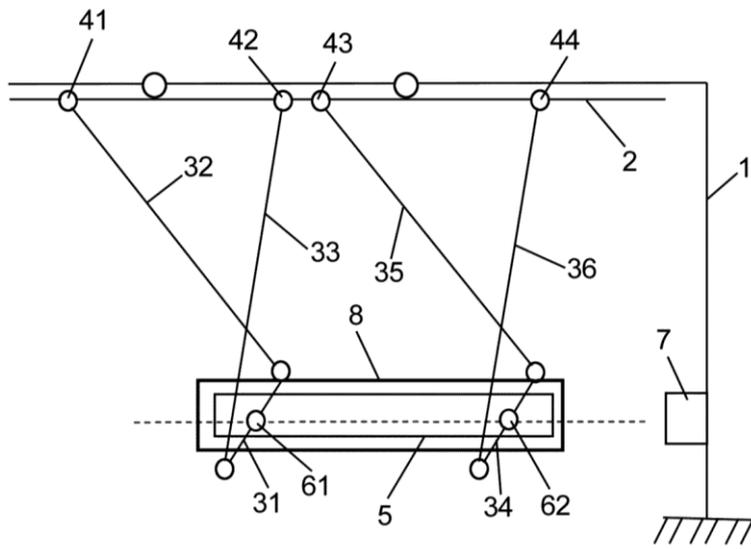


FIG.2

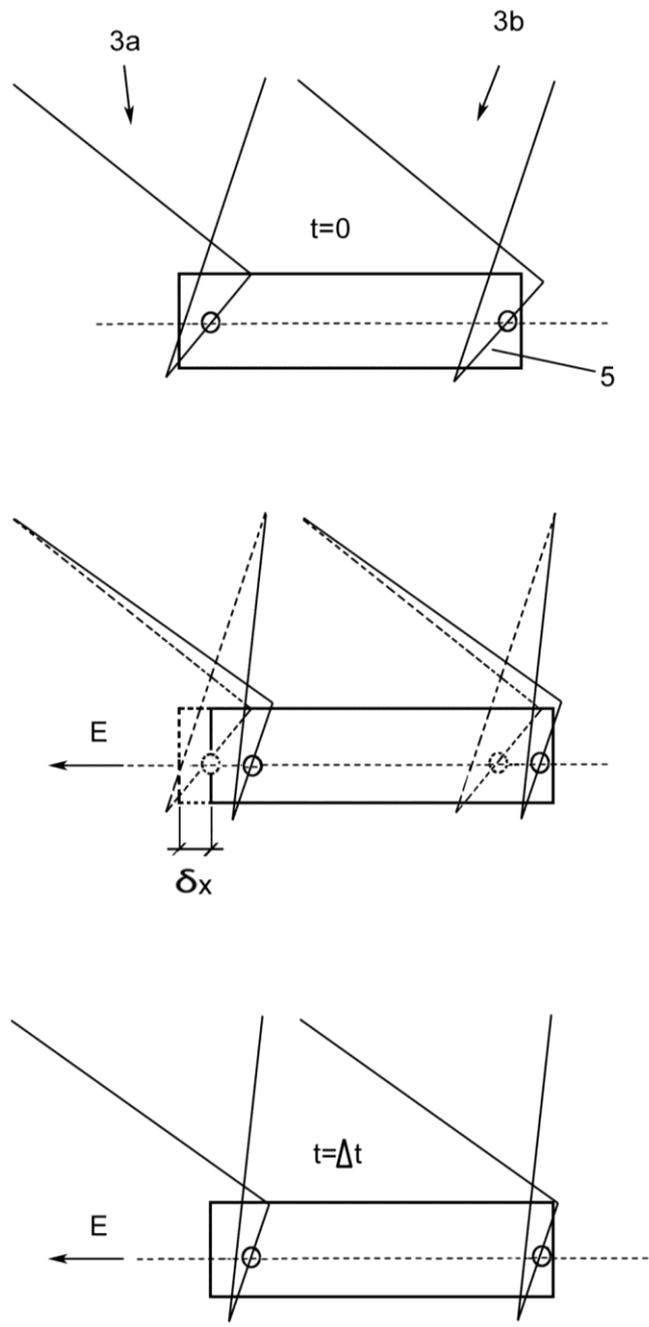


FIG.3

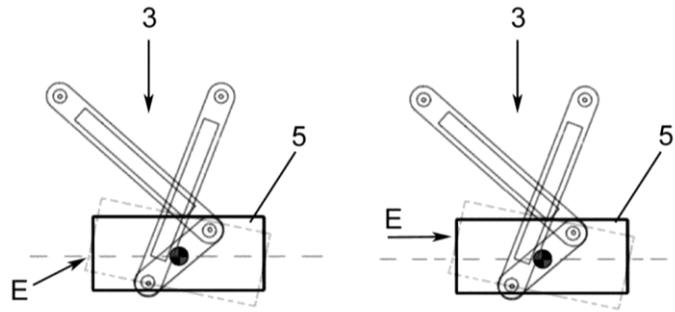


FIG.4



- ②¹ N.º solicitud: 201830135
 ②² Fecha de presentación de la solicitud: 15.02.2018
 ③² Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤¹ Int. Cl.: **G01L5/13** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤ ⁶ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	(GUARDUCCI et al.) "Quasi steady MPD performance analysis". ACTA ASTRONAUTICA, Vol. 68, N° 7, páginas 904 – 914. Apartado 3; figura 3. 28/08/2010, ISSN 0094-5765, DOI: doi:10.1016/j.actaastro.2010.08.033	1-8
A	CN 102537250 A (ZHEJIANG WANXIANG SYS CO LTD et al.) 04/07/2012, resumen; figura 2	1-8
A	(KUWAHARA et al.) "Development of direct thrust measurement system for the completely electrodeless helicon plasma thruster". Plasma and Fusion Research, Vol. 9, N° 3406025. Apartados 2, 3; figuras 1,2; 2014 ISSN 1880-6821 DOI: 10.1585/pfr.9.3406025	1-8
A	CN 101745915 A (SHENYANG INST AUTOMATION) 23/06/2010, figuras; resumen	1-8
A	(KNOLL et al.) "Thrust Balance Characterization of a 200 W Quad Confinement Thruster for High Thrust Regimes". IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, Vol. 43, N° 1, Páginas 185 – 189. Apartado II; figuras 5,6. 2015, ISSN 0093-3813 DOI: 10.1109/TPS.2014.2323417	1-8

Categoría de los documentos citados

- X: de particular relevancia
 Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
 A: refleja el estado de la técnica

- O: referido a divulgación no escrita
 P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
 E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

<p>Fecha de realización del informe 09.05.2018</p>	<p>Examinador F. J. Olalde Sánchez</p>	<p>Página 1/2</p>
---	---	------------------------------

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01L

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, ELSEVIER