(12) SOLICITUD INTERNACIONAL PUBLICADA EN VIRTUD DEL TRATADO DE COOPERACIÓN EN MATERIA DE PATENTES (PCT)

(19) Organización Mundial de la Propiedad Intelectual
Oficina internacional

(43) Fecha de publicación internacional
11 de junio de 2015 (11.06.2015)

WIPO | PCT

(10) Número de Publicación Internacional
WO 2015/082739 A1

(51) Clasificación Internacional de Patentes:
F03H 1/00 (2006.01)

(21) Número de la solicitud internacional:
PCT/ES2014/070858

(22) Fecha de presentación internacional:
20 de noviembre de 2014 (20.11.2014)

(25) Idioma de presentación: español

(26) Idioma de publicación: español

(30) Datos relativos a la prioridad:
P201331790
5 de diciembre de 2013 (05.12.2013) ES

(71) Solicitante: **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID** [ES/ES]; OTRI - Vicerrectorado de Investigación, Universidad Politécnica de Madrid, Calle Ramiro de Maeztu, 7, E-28040 Madrid (ES).

(72) Inventores: **MERINO MARTÍNEZ, Mario**; OTRI - Vicerrectorado de Investigación, Universidad Politécnica de Madrid, Calle Ramiro de Maeztu, 7, E-28040 Madrid (ES). **AHEDO GALILEA, Eduardo**; OTRI - Vicerrectorado de Investigación, Universidad Politécnica de Madrid, Calle Ramiro de Maeztu, 7, E-28040 Madrid (ES).

(81) Estados designados *(a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección nacional admisible)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Estados designados *(a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección regional admisible)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europea (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

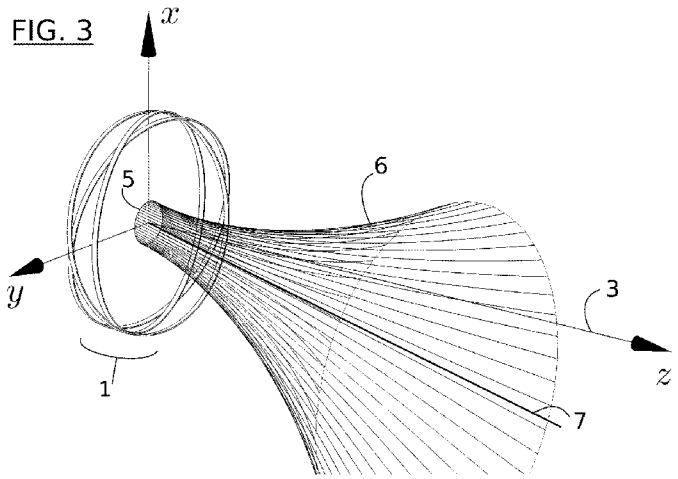
Publicada:

— *con informe de búsqueda internacional (Art. 21(3))*

(54) **Title**: THRUST VECTORING SYSTEM AND METHOD FOR SPACE PLASMA THRUSTERS

(54) **Título** : SISTEMA Y PROCEDIMIENTO PARA VECTORIZAR EL EMPUJE EN MOTORES ESPACIALES DE PLASMA

FIG. 3



(57) **Abstract**: The invention relates to a system, without moving parts or electrodes, for obtaining thrust vectoring capability in space plasma thrusters with a substantially axial magnetic field or without an applied magnetic field, as well as to the associated operating method. The system comprises three or more non-aligned conductive coils (1) located at the outlet of the thruster, coaxially therewith, which coils are powered electrically and independently with direct current and capable of generating a magnetic nozzle (6) that guides the expansion of the plasma and optionally laterally deflects same. The operating method comprises the selection of the electric current in each coil in order to alter the direction of the magnetic nozzle as desired and, consequently, that of the ejected plasma jet and the thrust vector within a wide angular range.

(57) **Resumen**:

[Continúa en la página siguiente]

WO 2015/082739 A1

Sistema sin partes móviles ni electrodos para obtener capacidad de empuje vectorial en motores espaciales de plasma con campo magnético esencialmente axial o carentes de campo magnético aplicado, más procedimiento de operación asociado. El sistema comprende tres o más bobinas conductoras no alineadas (1) que se sitúan a la salida del motor coaxialmente con el mismo, alimentadas eléctricamente con corriente continua de forma independiente, capaces de generar una tobera magnética (6) que guía la expansión del plasma y opcionalmente lo deflecta lateralmente. El procedimiento de operación comprende la elección de la corriente eléctrica en cada bobina para cambiar a voluntad la dirección de la tobera magnética y por tanto del chorro de plasma eyectado y el vector empuje dentro de un amplio rango angular.

SISTEMA Y PROCEDIMIENTO PARA VECTORIZAR EL EMPUJE EN MOTORES ESPACIALES DE PLASMA

DESCRIPCIÓN

Sector técnico

La presente invención se enmarca en el sector de la ingeniería aeroespacial, dentro de los sistemas de propulsión espacial primaria o secundaria para vehículos espaciales y satélites. En concreto, la invención se encuadra dentro de los sistemas y procedimientos de control del vector de empuje de motores espaciales de plasmas (propulsión eléctrica).

Antecedentes de la invención

Los motores espaciales de plasma permiten obtener un impulso específico unas 10 veces mayor que los sistemas de propulsión químicos tradicionales. Gracias al mayor impulso específico, los motores de plasma llevan asociada una reducción de consumo de combustible, y por ende, de los costes totales de la misión. Los motores de plasma pueden clasificarse según posean un campo magnético aplicado esencialmente axial, esencialmente radial, o carezcan de campo aplicado.

En un vehículo espacial o satélite, la existencia de defectos iniciales de fabricación y tolerancias mecánicas en su construcción produce desalineamientos entre su centro de masas y la línea de acción del vector empuje del sistema de propulsión. Esto haceque el centro de masas no esté dentro de la línea de acción del vector empuje. Cuando esto sucede, el empleo del sistema de propulsión genera un par de fuerzas sobre el vehículo/satélite, que lo pone en rotación. La situación puede agravarse sustancialmente a lo largo de la vida útil del mismo, a medida que el consumo de propulsante haga que se desplace su centro de masas, aumentando así el desalineamiento.

El par de fuerzas secular que producen estos desalineamientos constituye un serio problema tecnológico en la propulsión espacial. A modo de solución, actualmente se emplean los sistemas de control de actitud del satélite para contrarrestar la perturbación. No obstante, el par de fuerzas secular eventualmente causa la indeseable saturación de los sistemas de control de actitud. Cuando mantener la orientación del satélite durante la etapa propulsiva no es importante, también se resuelve este problema proporcionando una rotación (spin) al satélite a lo largo del eje de propulsión con el objeto de modular

angularmente el par de fuerzas producido y conseguir cancelar en promedio su acción sobre la actitud del satélite.

Una solución mucho más atractiva consiste en controlar la dirección del vector de empuje para corregir el desalineamiento, de forma que no sea necesario emplear el sistema de control de actitud ni poner en rotación el satélite. Dicho control del vectorde empuje constituye una capacidad muy deseable (o incluso imprescindible) en los sistemas de propulsión espacial. Se estima que una deflexión del vector de empuje de 5–8 grados sería más que suficiente para mantener el empuje alineado a lo largo de la vida útil del vehículo, evitando maniobras de de-saturación y períodos no operativos. Adicionalmente, la capacidad de empuje vectorial aporta una gran flexibilidad propulsiva a la plataforma. Por ejemplo, permite reducir la saturación de los sistemas de control de actitud en dos ejes de forma sencilla durante las etapas propulsivas de la misión.

En la Técnica Previa existen varios sistemas y/o procedimientos para obtener cierto control del vector de empuje en motores espaciales de plasma. El sistema más extendido y utilizado en la actualidad consiste en montar el motor sobre una plataforma con cardanes (gimbals), que permita reorientarlo dentro de un rango angular limitado (e.g. Patente EP0937644). Una idea similar, aunque de mayor complejidad, consiste en montar el motor sobre un brazo robótico orientable (Patente US 6565043). Estos sistemas mecánicos poseen partes móviles, por lo que son pesados, complejos, y con altas probabilidades de fallo.

En motores iónicos de rejillas, en los que los iones del plasma del motor son acelerados a través de una diferencia de potencial generada entre diversas rejillas conductoras, se ha explorado laposibilidad de desplazar lateralmente o angularmente las rejillas del motor mediante un sistema móvil para desviar lateralmente el chorro de plasma resultante y obtener empuje vectorial (EP0468706A2). No obstante, el dispositivo es complejo, proporciona una direccionalidad de empuje reducida, y destruye el delicado alineamiento entre rejillas en estos motores, lo cual puede disminuir notablemente la vida útil de las mismas al incrementarse el bombardeo de iones.

En el afán de eliminar las problemáticas partes móviles, otras alternativas existentes se basan en la utilización de una agrupación (cluster) de motores de plasma semejantes montados en un plano, y opcionalmente cada uno de ellos apuntando en una dirección ligeramente distinta (Patente US6279314). Esto requiere un mínimo de tres motores para

poder vectorizar el empuje en todas las direcciones, con el consecuente aumento de la complejidad y peso del sistema.

Asimismo, se ha considerado la posibilidad de situar placas de electrodos a la salida del motor, perpendiculares al chorro de plasma, capaces de ejercer un campo eléctrico que lo deflecte (Patente US4277939). No obstante, aparte de la complejidad añadida, los electrodos están sometidos al constante bombardeo de iones, lo que limita su vida útil, y los campos eléctricos generados tienden a concentrarse en una capa delgada en el bordedel plasma, lo que limita considerablemente su capacidad para deflectar el grueso del chorro.

Por otra parte, los plasmas reaccionan ante campos magnéticos externos, modificando su movimiento. En concreto, un campo magnético axilsimétrico divergente, suficientemente intenso como para magnetizar el plasma, es capaz de guiar la expansión de un plasma caliente al vacío, generando una “tobera magnética” (Ahedo y Merino, Phys. Plasmas 17, 073501, 2010). El plasma sufre una transición sónica en torno a la sección de máximo estrechamiento magnético, y posteriormente se expande supersónicamente, acelerándose y produciendo así un mayor empuje, de forma similar a cómo se expande un gas en una tobera de Laval sólida. Este fenómeno ha sido extensamente comprobado experimentalmente (Andersen et al, Phys. Fluids 12, 557, 1969), y constituye el fundamento de varios motores espaciales de plasma, como el motor de fuente helicón, el motor Magnetoplasmadinámico de campo aplicado, y el motor VASIMR. No obstante, las toberas magnéticas existentes en estos motores son estáticas y no permiten el control vectorial de empuje.

Recientemente, se están explorando distintas formas de obtener capacidad de vectorizar el empuje en algunos motores de plasma particulares mediante deflexión magnética. Un ejemplo son losmotores de efecto Hall (los cuales no poseen tobera magnética), en los que existe un campo magnético esencialmente radial. Para estos motores en particular se ha propuesto variar el campo magnético radial del motor, rompiendo la axilsimetría del mismo (WO2011/151636A1). No obstante, romper la axilsimetría del campo magnético en este motor reduce la capacidad del campo magnético para confinar electrones, los cuales adquieren la capacidad de desplazarse fácilmente en sentido axial y contra las paredes del motor, reduciendo notablemente la eficiencia del motor.

Asimismo, en motores de tipo helicón, se ha propuesto montar un solenoide perpendicular a la fuente de plasma y posicionado en un lateral de la misma, a cierta distancia, para generar campos magnéticos radiales que modifiquen la dirección de la tobera magnética del motor

(Cox et al., IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 39, NO. 11, pag. 2460, 2011). No obstante, la configuración propuesta en ese caso modifica más el campo magnético interno del motor que la tobera magnética del mismo, dañando la eficiencia de la fuente de plasma, y supone un alto peso adicional en un motor, pues al encontrarse el solenoide alejado del flujo de plasma, es necesario un fuerte campo magnético (y por tanto, un solenoide pesado) para actuar sobre el campo magnético ya existente del propio motor.

En resumen, para superar las limitaciones de estos procedimientos es necesario un sistema sencillo, eficaz y sin partes móviles o electrodos en contacto con el plasma que posibilite el control vectorial del empuje en motores de plasma con campo magnético esencialmente axial o sin campo magnético aplicado, en al menos unos 10 grados.

Descripción de la invención

La invención se refiere a un sistema sin partes móviles ni electrodos en contacto con el plasma y procedimiento para vectorizar el empuje en motores espaciales de plasma con campo magnético esencialmente axial o sin campo magnético aplicado mediante la generación de una tobera magnética dirigible a voluntad para obtener capacidad de empuje vectorial en todas las direcciones dentro de un amplio espacio angular de acuerdo con la reivindicación 1 y 3. Realizaciones preferidas del sistema y del procedimiento se definen en las reivindicaciones dependientes.

Al no poseer partes móviles ni electrodos susceptibles de ser atacados directamente por el plasma, y gracias a que actúa principalmente sobre el chorro a la salida del motor, el sistema no aumenta la complejidad del sistema sustancialmente nidisminuye la vida útil del motor.

En motores espaciales de plasma con campo aplicado esencialmente axial, el sistema puede sustituir a parte del sistema generador de campo magnético para aportar la capacidad de empuje vectorial, por lo que prácticamente no añade peso ni complejidad adicional. Esto cubre buena parte de motores espaciales de plasma existentes o en desarrollo, incluyendo los motores helicón, los motores magnetoplasmadinámicos (MPD) de campo aplicado, el motor VASIMR, los motores de efecto Hall cilíndricos, los motores HEMP, y los motores de efecto Hall con cúspides magnéticas.

En motores carentes de campo magnético aplicado, el sistema puede acoplarse de forma sencilla a la salida del motor, proporcionando la capacidad de empuje vectorial con un mínimo coste adicional, esencialmente sin modificar el funcionamiento interno del mismo.

Esto atañe a motores como el motor iónico de rejillas (en todas sus subclases) y el motor MPD de campo propio.

Físicamente, la invención comprende un generador de campo magnético dirigible capaz de acelerar, guiar y opcionalmente deflectar magnéticamente chorros de plasma. El sistema (FIGURA 1) comprende $n > 2$ bobinas (1) de material conductor, por las cuales se hacen circular distintas corrientes eléctricas. Las bobinas están entrelazadas entre sí y dispuestas de forma simétrica respecto al centro del sistema (0), y orientadas de manera que el vector director (2) del eje de cada bobina forme un ángulo α con el eje de referencia del sistema (3). Los vectores directores (2) de los ejes de las bobinas forman entre sí dos a dos un mismo ángulo $\beta = 2arcsin[sin(\alpha)sin(\pi/n)]$ (es decir, los ejes de las bobinas están angularmente equiespaciados en la dirección azimutal, i.e., en el plano XY). Cada bobina posee un sistema de alimentación (4) que controla de forma independiente la corriente que circula por ella. La invención se sitúa en el plano de salida de la fuente de plasma del motor o en un plano cercano al mismo, con el eje de referencia (3) coincidente con el eje de la fuente de plasma.

El procedimiento de operación es el siguiente: al hacer circular corrientes eléctricas por las bobinas, se genera un campo magnético cuyos tubos de líneas magnéticas conforman una tobera magnética convergente-divergente. La corriente media que se hace circular por las bobinas genera un campo magnético aplicado capaz de magnetizar, confinar y guiar la expansión del plasma del motor.

Si el número de amperios-vuelta en cada bobina es igual en magnitud y sentido, el campo magnético generado es esencialmente axilsimétrico (FIGURA 2), con el eje dirigido en la dirección del eje de referencia (3). Los tubos magnéticos (6) que parten de una circunferencia (5) centrada en el centro del sistema (0) y cuyo eje es paralelo al eje del sistema (3) son por tanto esencialmente axilsimétricos, y la tobera magnética divergente resultante acelera y guía el plasma, pero no lo deflecta lateralmente. La línea magnética central (7), que pasa por el origen del sistema (0), no sufre deflexión.

Si se modifican de forma diferencial los amperios-vuelta que circulan por cada bobina, el campo magnético generado deja de ser axilsimétrico (FIGURA 3). Ahora, los tubos de campo magnético (6) están deflectados lateralmente, y la tobera magnética acelera, guía y también deflecta el chorro de plasma lateralmente un cierto ángulo de forma controlada. La dirección y ángulo de la deflexión magnética producida, definido como el ángulo formado en

el infinito entre el eje del sistema (3) y la línea magnética (7) que pasa por el origen del sistema (0), puede controlarse variando la intensidad que circula por cada bobina. El ángulo de deflexión magnética máximo no está limitado por el ángulo α de las bobinas conductoras, y de hecho puede ser superior al ánguloα, haciendo circular por alguna de las bobinas conductoras corrientes en sentido contrario al del resto de las bobinas.El ángulo de deflexión magnética puede elegirse de modo que sea igual a, proporcional a, o una función no lineal del ángulo dedeflexión deseado del vector empuje $\boldsymbol{F}$.

Breve descripción de los dibujos

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, se acompaña como parte integrante de dicha descripción un conjunto de dibujos. En dichos dibujos, se han utilizado las siguientes referencias:

(0): Origen del sistema.

(1): Bobinas conductoras. Cada bobina se referencia con un segundo índice: (1.1), (1.2), (1.3), etc.

(2): Vectores directores de los ejes de las bobinas. Cada vector director se referencia con un segundo índice, coincidente con el índice de la bobina correspondiente: (2.1), (2.2), (2.3), etc.

(3): Eje de referencia del sistema.

(4): Sistema de alimentación propio de cada bobina. Cada sistema de alimentación se referencia con un segundo índice, coincidente con el índice de la bobina correspondiente: (4.1), (4.2), (4.3), etc.

(5): Circunferencia centrada en (0) contenida en un plano perpendicular a (3) y de radio igual al radio del chorro de plasma saliente del motor.

(6): Tubo magnético que pasa por la circunferencia (5).

(7): Línea magnética que parte del origen del sistema (0).

(8): Carrete circular.

(XYZ): Triedro a derechas centrado en el origen del sistema (0),con el eje (Z) coincidente con el eje de referencia del sistema (3) y el eje (X) elegido de forma que el vector director del eje de la primera bobina (1.1) quede contenido en el plano (YZ).

En dichos dibujos, con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

La **FIGURA 1** muestra una vista esquemática de los elementos fundamentales del sistema, para una particularización del sistema con $n = 3$ bobinas conductoras (1) y $\alpha = 10$ grados.

La **FIGURA 2** muestra el campo magnético (calculado) generado por una particularización del sistema con $n = 3$ bobinas (1) y $\alpha = 10$ grados, cuando la corriente que circula por cada bobina es idéntica en dirección y sentido a las demás.

La **FIGURA 3** muestra el campo magnético (calculado) generado por la misma particularización que en la FIGURA 2, pero cuando la corriente que circula por cada bobina está en proporción 0:0:1 para las bobinas (1.1), (1.2), y (1.3) respectivamente.

La **FIGURA 4** muestra, en forma de gráfica polar, las deflexiones de la línea magnética central (7) que parte del origen del sistema (0) obtenidas aguas abajo, ante diversas proporciones de la corriente que circula por las tres bobinas (1.1), (1.2) y (1.3) de la particularización del sistema de las FIGURAS 1, 2 y 3. Se muestran como puntos los distintos casos, anotados con la proporción [*a*:*b*:*c*] de las corrientes por cada una de las tres bobinas, respectivamente. El ángulo polar de la gráfica es el ángulo que la línea magnética (7) forma con el eje X (azimut), y el radio de la gráfica es el ángulo de deflexión en el infinito de la línea magnética (7) (i.e., el ángulo formado con el eje de referencia del sistema (3)). Las circunferencias a trazos de la gráfica indican valores constantes de este último ángulo. El triángulo a trazos delimita el espacio de deflexiones accesibles sin corrientes negativas por las bobinas.

La **FIGURA 5** muestra de forma esquemática una realización del sistema con $n = 3$ bobinas conductoras circulares y $\alpha = 10$ grados.

La **FIGURA 6** muestra de forma esquemática una realización del sistema con $n = 3$ bobinas elípticas apoyadas sobre un carrete circular y $\alpha = 15$ grados.

La **FIGURA 7** muestra de forma esquemática una posible forma de entretejer las distintas espiras de las bobinas (1) en la realización mostrada en la FIGURA 6. Para facilitar la visualización sólo se muestran unas pocas espiras de cada bobina.

Descripción detallada de la invención

La siguiente descripción detallada ilustra varios modos de realización de la invención. Esta descripción no debe tomarse en sentido limitante, si no que trata de ilustrar los principios

generales de la invención. En concreto, se obtienen resultados similares variando el número de bobinas utilizadas, siempre que el número n de las mismas sea 3 ó más, variando la geometría de las espiras (circulares o elípticas), o variando la forma en que estas son entrelazadas y fijadas.

Una posible realización del sistema comprende tres ($n = 3$) bobinas conductoras (1) circulares rígidas, todas ellas de un mismo radio R_L (mayor que el radio interno de la fuente de plasma del motor), espesor t_L y ancho w_L, con $R_L \gg t_L, w_L$, entrelazadas entre sí como muestra la FIGURA 5. Las bobinas están dispuestas de forma que dejen libre esencialmente la mayor circunferencia posible en su interior. Los centros de las bobinas no coinciden con el centro del sistema (0), siendo la separación aproximadamente igual a t_L. Los vectores directores unitarios $\boldsymbol{a}_i$ (2) del eje de cada bobina i(1) forman un ángulo $\alpha \leq arctan(w_L/R_L)$ con elvector director unitario $\hat{\boldsymbol{z}}$ del eje de referencia del sistema (3), y un mismo ángulo $\beta = 2arcsin[sin(\alpha)sin(\pi/n)]$ dos a dos.

Una segunda posible realización del sistema comprende tres bobinas conductoras (1) ligeramente elípticas arrolladas sobre un carrete cilíndrico (8) de radio R_C (mayor que el radio interno de la fuente de plasma del motor) y ancho w_C. El hilo (conductor y forrado de material aislante) de cada bobina está arrollado elípticamente sobre el carrete, dejando una separación angular $2\,\pi/n$ entre cada bobina, tal y como muestra la figura FIGURA 6. En los puntos de encuentro entre dos bobinas sobre el carrete, el hilo de una de ellas pasa por encima del de la otra, por ejemplo como muestra la FIGURA 7. Los centros de cada bobina coinciden con el centro del sistema (0). Los vectores directores unitarios $\boldsymbol{a}_i$ (2) del eje de cada bobina i(1) forman un ángulo $\alpha \simeq arctan(w_C/R_C)$ con elvector director unitario $\hat{\boldsymbol{z}}$ del eje de referencia del sistema (3), y un mismo ángulo $\beta = 2arcsin[sin(\alpha)sin(\pi/n)]$ dos a dos.

Una tercera variante de realización de la invención comprende la versión elíptica de las bobinas descrita en la realización anterior, pero con bobinas fijadas en la posición descrita, y eliminando el carrete de soporte (8).

En las tres realizaciones descritas, el sistema se sitúa y fija a la salida del motor, coaxialmente con el mismo, ylas bobinas están conectadas eléctricamente a una fuente de alimentación de corriente eléctrica continua (4) capaz de alimentar cada una de las bobinas conductoras (1) de forma independiente y controlable.

El modo de operación es idéntico en los tres modos de realización descritos: se hace pasar un número de amperios-vuelta w_i por cada bobina i tales que la suma vectorial de los vectores directores $\boldsymbol{a}_i$ (2) del eje de cada bobina i, multiplicados por el peso respectivo de amperios-vuelta cada bobina, sea $\boldsymbol{A} = \sum w_i \, \boldsymbol{a}_i$. El vector $\boldsymbol{A}$define en primera aproximación la dirección de la línea magnética (7) que parte del origen del sistema (0). La cantidad total de amperios-vuelta necesarios, $\sum w_i$ es tal que las bobinas generan un campo magnético total cuya intensidad es suficiente para magnetizar al plasma del motor a la salida del motor, de modo que el plasma es encauzado, acelerado y opcionalmente deflectado.

Para operar de forma axilsimétrica (sin deflexión del vector de empuje$\boldsymbol{F}$), se hace pasar una misma cantidad de amperios-vueltaw_i por cada bobina$i$. El campo magnético total generado por las bobinas es esencialmente axilsimétrico respecto al eje del sistema (3), el vector $\boldsymbol{A}$ es paralelo al vector director unitario $\hat{\boldsymbol{z}}$ del eje de referencia del sistema (3), y consecuentemente la línea magnética (7) que pasa por el origen del sistema (0) no sufre deflexión. Al fluir el plasma del motor en el campo magnético del sistema, se genera un chorro de plasma no deflectado lateralmente, y no se generan pares de fuerzas laterales.

Para operar de forma no-axilsimétrica (con deflexión del vector de empuje$\boldsymbol{F}$), se hace pasar por cada bobina $i$un número de amperio-vueltas $w_i$distinto, de forma que el vector $\boldsymbol{A}$ apunte en la dirección deseada del vector de empuje $\boldsymbol{F}$.

Una variante de este modo de operación consiste en elegir el número de amperios-vuelta w_i por cada bobina $i$de modo que el vector $\boldsymbol{A}$sea tal que $(\boldsymbol{F} \times \boldsymbol{A}) \cdot \hat{\boldsymbol{z}} = 0$ (es decir, que los vectores $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{F}$ y $\hat{\boldsymbol{z}}$ sean coplanarios), y $\boldsymbol{A} \cdot \hat{\boldsymbol{z}} / \sum w_i$ sea proporcional a $\boldsymbol{F} \cdot \hat{\boldsymbol{z}} / |\boldsymbol{F}|$.

Aún otra variante consiste en elegir el número de amperios-vuelta w_i por cada bobina $i$de modo que el vector $\boldsymbol{A}$sea tal que $(\boldsymbol{F} \times \boldsymbol{A}) \cdot \hat{\boldsymbol{z}} = 0$ y $\boldsymbol{A} \cdot \hat{\boldsymbol{z}} / \sum w_i$ seauna función no lineal de$\boldsymbol{F} \cdot \hat{\boldsymbol{z}} / |\boldsymbol{F}|$.

De cualquiera de estas formas no-axilsimétricas de operar, el campo total generado por las bobinas no es axilsimétrico, y los tubos magnéticos se deflectan lateralmente. Al fluir el plasma del motor por el campo magnético del sistema, el sistema genera un chorro de plasma deflectado lateralmente, y el vector de empuje queda deflectado.Con este procedimiento es posible obtener deflexiones del vector de empuje de ángulos del orden de

α en cualquier dirección. Los amperio-vueltas por cada bobina, w_i, no tienen por qué tener todos el mismo signo.

REIVINDICACIONES

1. **Sistema** sin partes móviles ni electrodos en contacto con el plasma para vectorizar el empuje en motores espaciales de plasma con campo magnético aplicado esencialmente axial o carentes de campo magnético aplicado mediante la generación de una tobera magnética dirigible, **caracterizado por comprender**:

   1.1 Al menos tres bobinas conductoras circulares o elípticas (1), entrelazadas entre sí de forma que los vectores directores unitarios $\boldsymbol{a}_i$ (2) del eje de cada bobina i formen un ángulo α respecto al eje de referencia del sistema (3) y un mismo ángulo β dos a dos, y fijadas de forma que el eje del sistema (3) coincida con el eje de la fuente de plasma;

   1.2 Una fuente de alimentación de corriente eléctrica continua (4) capaz de alimentar cada una de las bobinas conductoras (1) de forma independiente y controlable.

2. Sistema descrito según la reivindicación 1, caracterizado porque las bobinas (1) están arrolladas sobre un carrete circular (8).

3. **Procedimiento** para deflectar el vector empuje en motores espaciales de plasma con campo magnético aplicado esencialmente axial o carentes de campo magnético aplicado utilizando el sistema descrito por la reivindicación 1 ó 2, **caracterizado porque** hace circular una cantidad de amperios-vuelta w_i por cada bobina conductora i(1) de modo que el vector $\boldsymbol{A} = \sum w_i \, \boldsymbol{a}_i$apunte en la dirección del vector de empuje deseado $\boldsymbol{F}$, siendo $\boldsymbol{a}_i$ el vector director unitario (2) del eje de la bobina i (1).

4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que los amperios-vuelta w_i por cada bobina conductora i (1) se eligen de forma que:

   4.1 $(\boldsymbol{F} \times \boldsymbol{A}) \cdot \hat{\boldsymbol{z}} = 0$, siendo $\hat{\boldsymbol{z}}$ el vector director unitario del eje de referencia del sistema (3);

   4.2 $\boldsymbol{A} \cdot \hat{\boldsymbol{z}} / \sum w_i$ es proporcional a $\boldsymbol{F} \cdot \hat{\boldsymbol{z}} / |\boldsymbol{F}|$.

5. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que los amperios-vuelta w_i por cada bobina conductora i (1) se eligen de forma que $\boldsymbol{A} \cdot \hat{\boldsymbol{z}} / \sum w_i$ es una función no lineal de $\boldsymbol{F} \cdot \hat{\boldsymbol{z}} / |\boldsymbol{F}|$.

DIBUJOS

FIG. 1

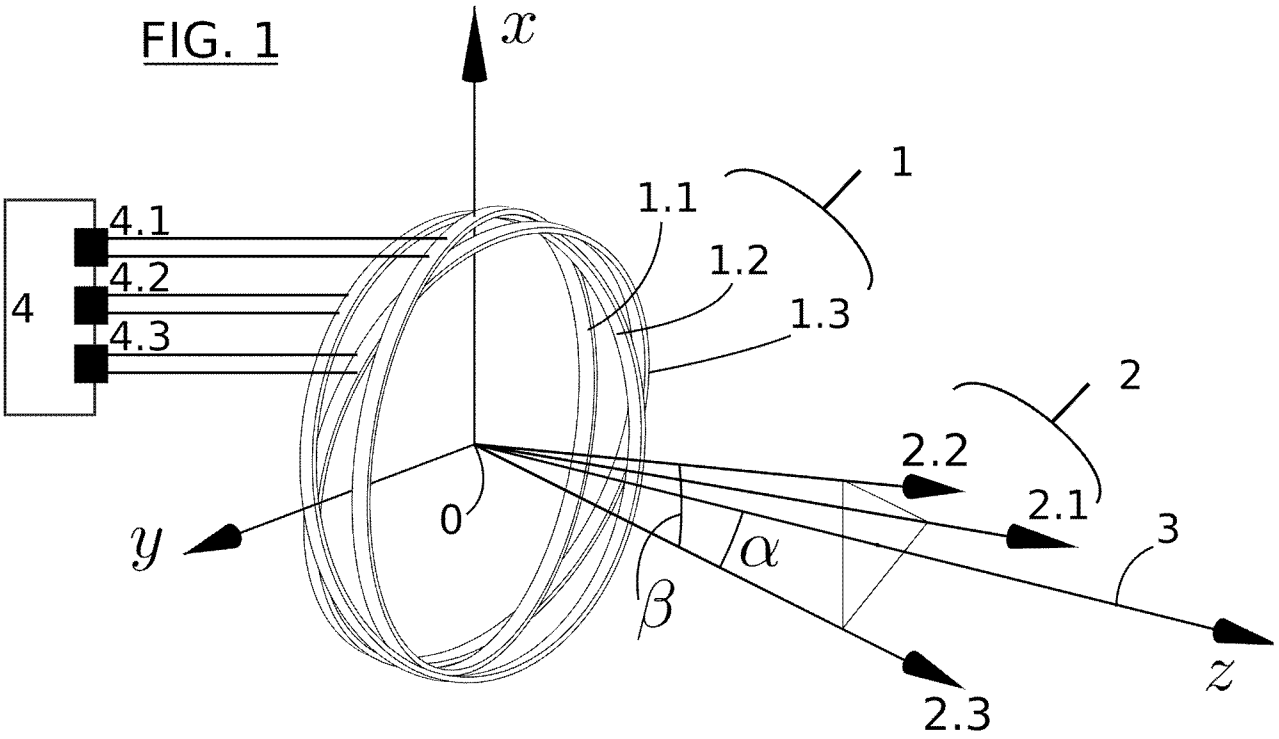


FIG. 2

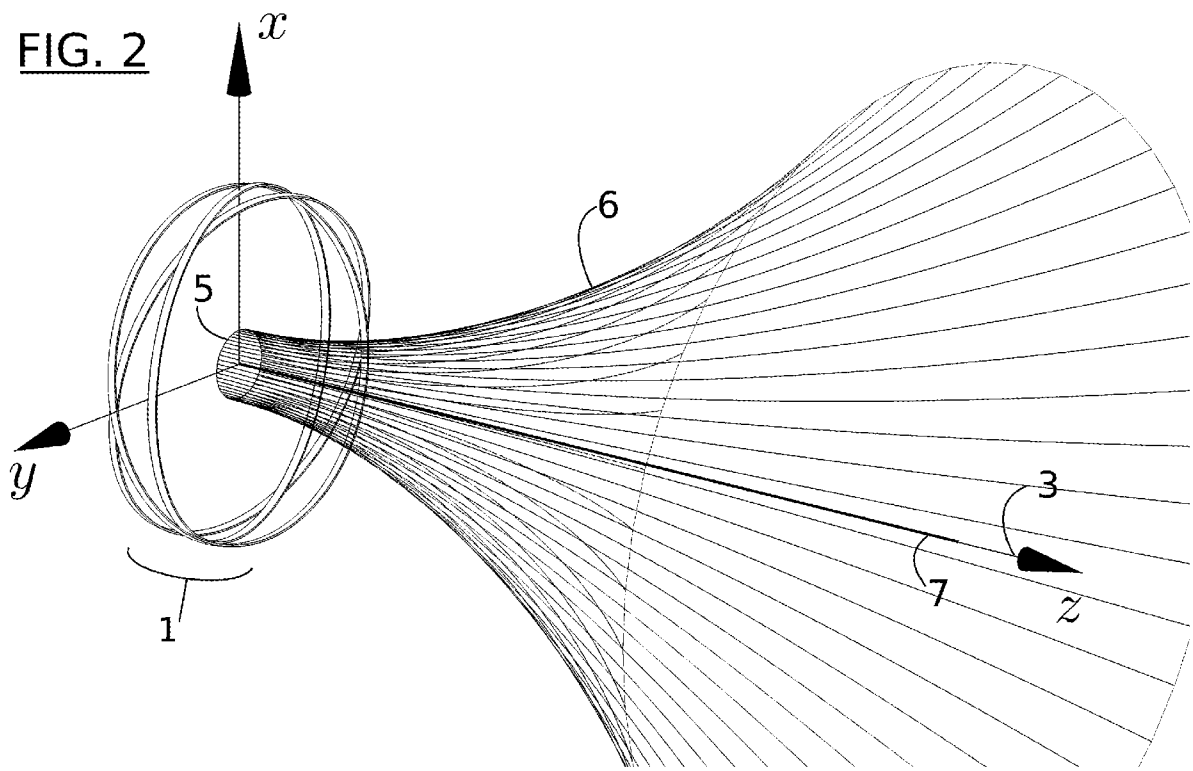


FIG. 3

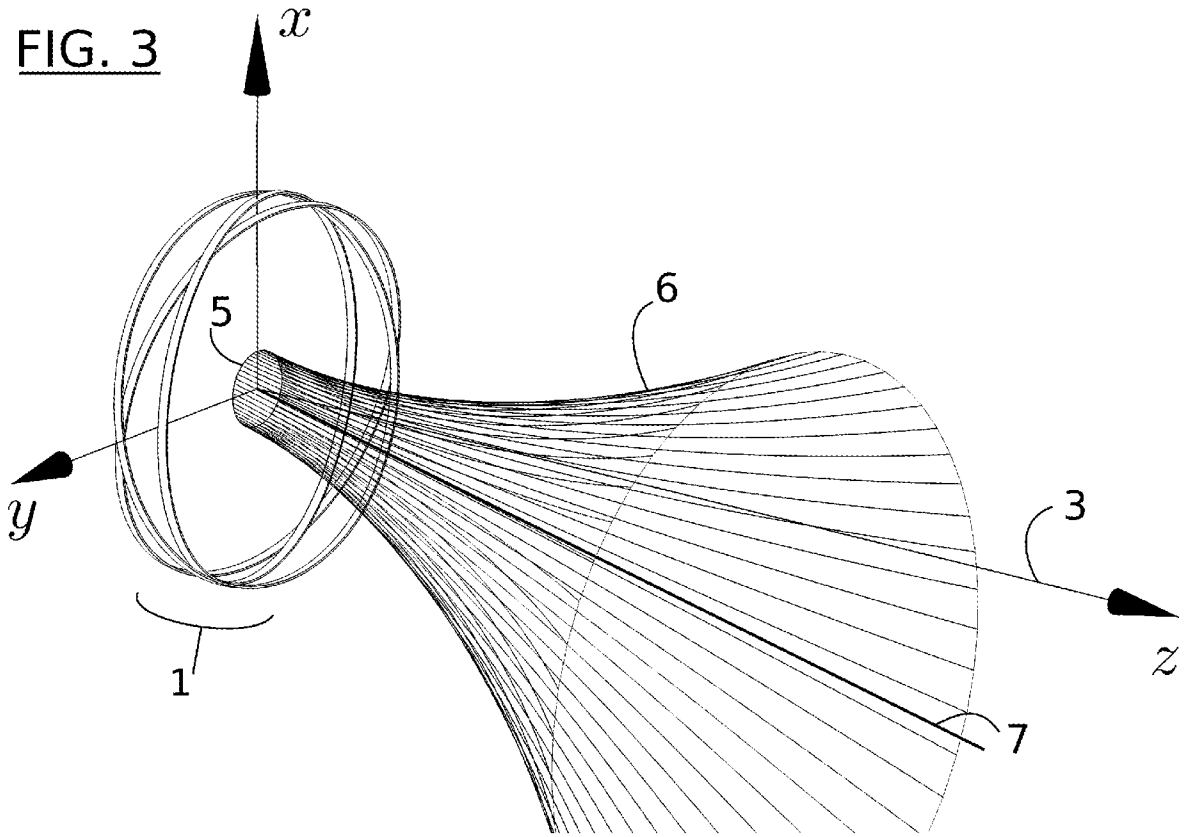


FIG. 4

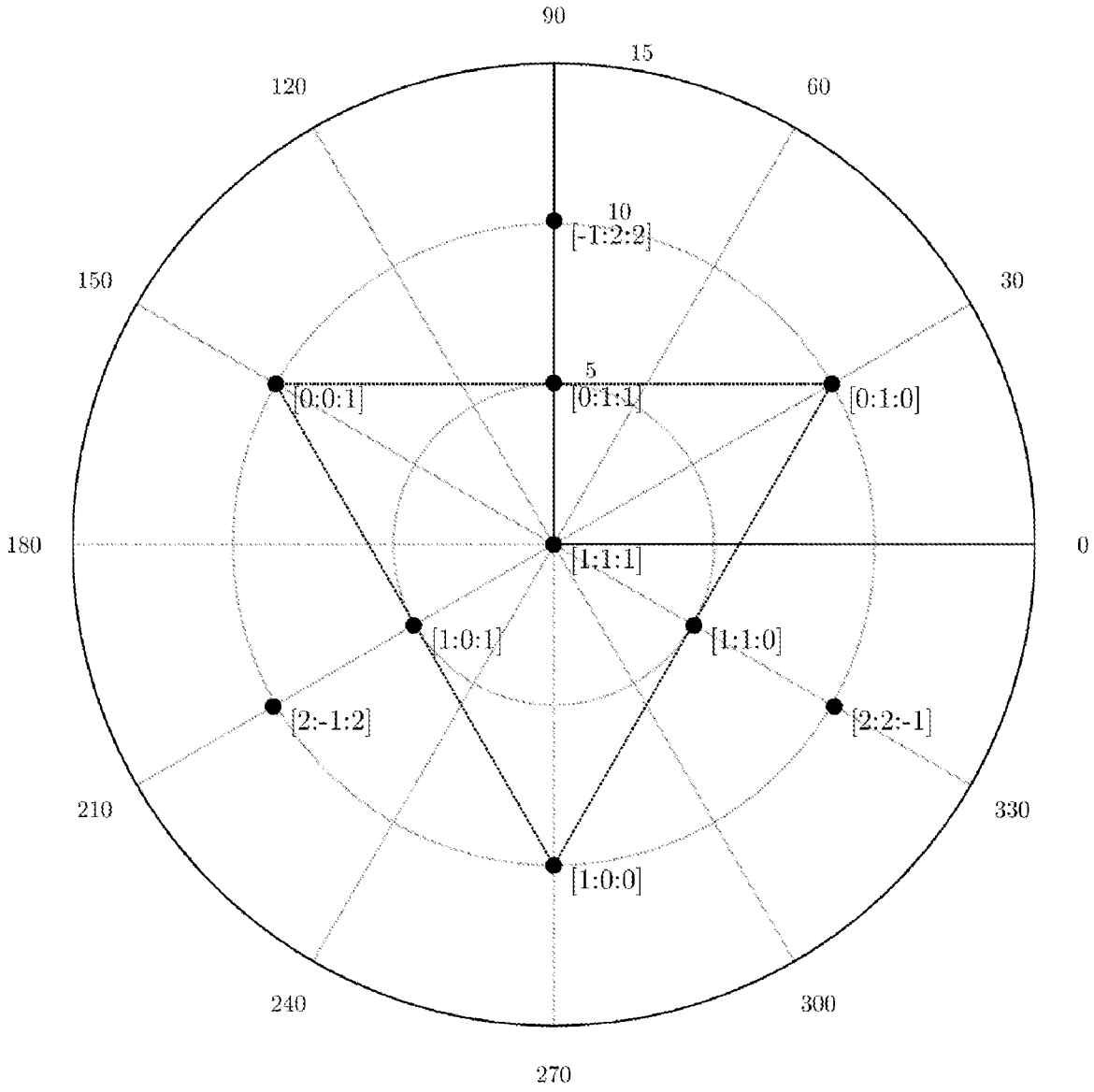

90
15
60
30
0
330
300
270
240
210
180
150
120
10
[-1:2:2]
5
[0:0:1]
[0:1:1]
[0:1:0]
[1;1:1]
[1:0:1]
[1:1:0]
[2:-1:2]
[2:2:-1]
[1:0:0]

FIG. 5

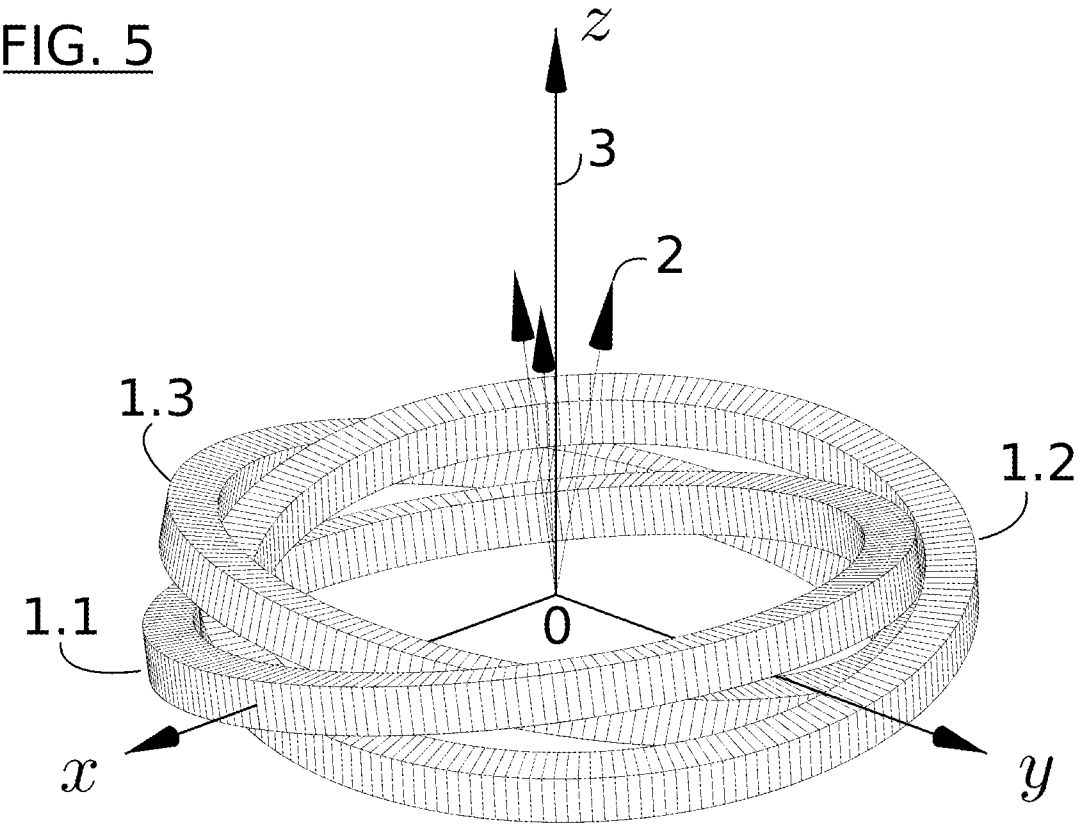


FIG. 6

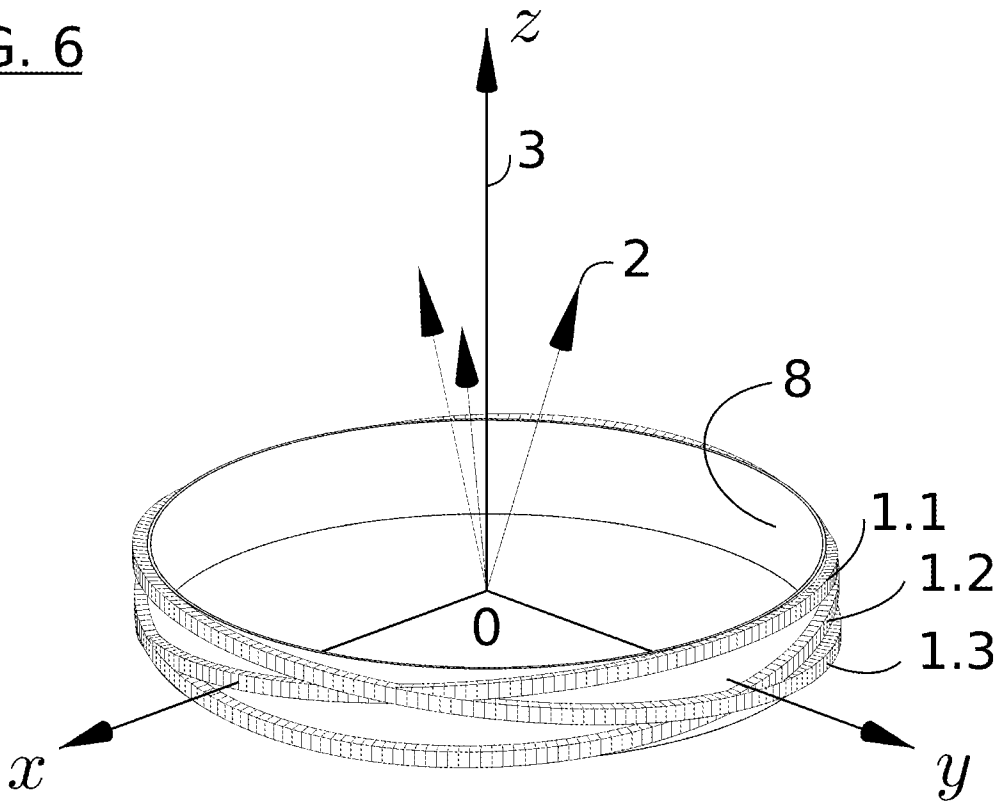
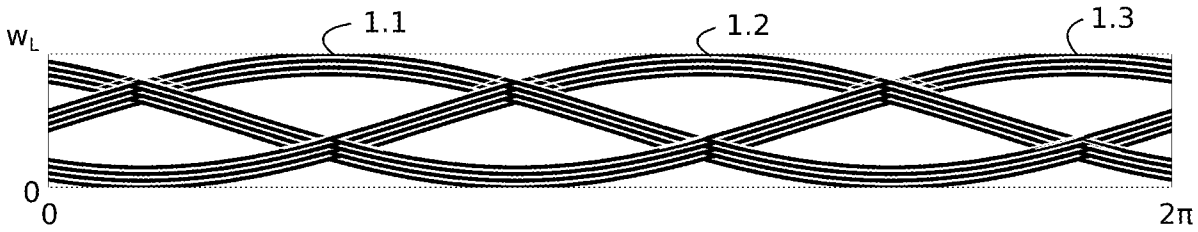


FIG. 7



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/ES2014/070858

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

F03H1/00 (2006.01)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
F03H

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, INVENES

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102777342 A (BEIJING INST OF SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING) 14/11/2012, Abstract from DataBase WPI. Retrieved from EPOQUE	1-5
A	KAJIMURA Y et al. Control techniques of thrust vector for magnetic nozzle in laser fusion rocket. FUSION ENGINEERING AND DESIGN, 01/11/2006 VOL: 81 No: 23-24, pp: 2871 - 2875	1-5
A	Sakaguchi N et al. Thrust efficiency calculation for magnetic nozzle in laser fusion rocket. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. 1/11/2005. Vol. 48, N°161, pp. 180-182.	1-5

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance.
"E" earlier document but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means.
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other documents , such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
05/02/2015	**(06/02/2015)**
Name and mailing address of the ISA/ OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España) Facsimile No.: 91 349 53 04	Authorized officer O. Fernández Iglesias Telephone No. 91 3498500

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.
PCT/ES2014/070858

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
CN102777342 A	14.11.2012	NONE	

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº
PCT/ES2014/070858

A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD
F03H1/00 (2006.01)

De acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o según la clasificación nacional y CIP.

B. SECTORES COMPRENDIDOS POR LA BÚSQUEDA

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)
F03H

Otra documentación consultada, además de la documentación mínima, en la medida en que tales documentos formen parte de los sectores comprendidos por la búsqueda

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

C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones nº
A	CN 102777342 A (BEIJING INST OF SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING) 14/11/2012, Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE	1-5
A	KAJIMURA Y et al. Control techniques of thrust vector for magnetic nozzle in laser fusion rocket. FUSION ENGINEERING AND DESIGN, 01/11/2006 VOL: 81 No: 23-24, pp: 2871 - 2875	1-5
A	Sakaguchi N et al. Thrust efficiency calculation for magnetic nozzle in laser fusion rocket. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. 1/11/2005. Vol. 48, N°161, pp. 180-182.	1-5

☐ En la continuación del recuadro C se relacionan otros documentos ☒ Los documentos de familias de patentes se indican en el anexo

* Categorías especiales de documentos citados:
"A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.
"E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.
"L" documento que puede plantear dudas sobre una reivindicación de prioridad o que se cita para determinar la fecha de publicación de otra cita o por una razón especial (como la indicada).
"O" documento que se refiere a una divulgación oral, a una utilización, a una exposición o a cualquier otro medio.
"P" documento publicado antes de la fecha de presentación internacional pero con posterioridad a la fecha de prioridad reivindicada.
"T" documento ulterior publicado con posterioridad a la fecha de presentación internacional o de prioridad que no pertenece al estado de la técnica pertinente pero que se cita por permitir la comprensión del principio o teoría que constituye la base de la invención.
"X" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.
"Y" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse que implique una actividad inventiva cuando el documento se asocia a otro u otros documentos de la misma naturaleza, cuya combinación resulta evidente para un experto en la materia.
"&" documento que forma parte de la misma familia de patentes.

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.	Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional.
05/02/2015	**06 de febrero de 2015 (06/02/2015)**
Nombre y dirección postal de la Administración encargada de la búsqueda internacional OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España) Nº de fax: 91 349 53 04	Funcionario autorizado O. Fernández Iglesias Nº de teléfono 91 3498500

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Informaciones relativas a los miembros de familias de patentes

Solicitud internacional nº

PCT/ES2014/070858

Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de Publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de Publicación
CN102777342 A	14.11.2012	NINGUNO	