(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 569 540**

(21) Número de solicitud: 201531649

(51) Int. CI.:

B64G 1/10 (2006.01)
B64G 1/32 (2006.01)
B64G 1/40 (2006.01)
B64G 1/42 (2006.01)

(12) SOLICITUD DE PATENTE A1

(22) Fecha de presentación:

13.11.2015

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

11.05.2016

(71) Solicitantes:

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID (50.0%)
Av. Gregorio Peces Barba, 1
28919 Leganés (Madrid) ES y
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (50.0%)

(72) Inventor/es:

SÁNCHEZ ARRIAGA, Gonzalo y
BOMBARDELLI, Claudio

(54) Título: **Sistema de propulsión en órbita por medio de cables conductores flotantes**

ES 2 569 540 A1

(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 569 540**

(21) Número de solicitud: 201531649

(57) Resumen:

El sistema de propulsión en órbita por medio de cables conductores flotantes embarcado en un vehículo espacial (1) comprende dos conjuntos de cables conductores electrodinámicos (2, 3) conectados respectivamente a cada uno de los dos polos (4, 5) de una fuente generadora de potencia eléctrica (6), y en donde cada conjunto está formado por al menos un cable conductor.

En presencia de un plasma y un campo magnético, como es el caso de un satélite orbitando en la ionosfera terrestre, una corriente eléctrica fluye de forma natural a lo largo de los cables conductores. Como resultado de la interacción del campo magnético con dicha corriente, se genera una fuerza de Lorentz sobre los cables. Dicha fuerza se puede utilizar para controlar la órbita del vehículo espacial (1) y puede ser variada, en sentido y magnitud, por medio de la fuente generadora de potencia eléctrica (6) que permite modificar la intensidad y sentido de la corriente a lo largo de los cables.

La eficiencia del sistema dependerá del ambiente espacial, de la velocidad del satélite relativa al plasma, y de las propiedades y diseño de los cables (longitud, sección y material). El sistema se podrá optimizar aislando parcialmente los cables a lo largo de su longitud y empleando materiales que favorezcan la emisión de electrones por efecto termiónico o fotoeléctrico. Dichos materiales se utilizarán en la composición de los cables o para revestir su superficie a lo largo de su extensión completa o de partes de ella. A diferencia de los sistemas de propulsión convencionales, como cohetes químicos o eléctricos, o los cables electrodinámicos propuestos hasta la fecha, el sistema propuesto no requiere ni propulsante ni expelante.

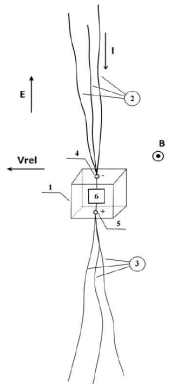


FIG. 1

ES 2 569 540 A1

DESCRIPCIÓN

SISTEMA DE PROPULSIÓN EN ÓRBITA POR MEDIO DE CABLES CONDUCTORES FLOTANTES

Campo técnico de la invención

La presente invención se enmarca en el campo de la propulsión electromagnética de los sistemas aeroespaciales. En particular, aquellos sistemas que emplean largos cables conductores como elementos para la conversión de energía eléctrica en energía orbital del satélite gracias a la fuerza de Lorentz que ejerce el campo magnético del planeta sobre la corriente que circula por el cable.

Estado de la Técnica

Los vehículos espaciales, tales como satélites o estaciones espaciales, requieren de dispositivos de propulsión que les permitan acelerarlos para llevar a cabo maniobras orbitales, tales como cambios de órbita o aproximación controlada a otros vehículo u objetos en órbita (en inglés/francés "rendez-vous"). También son necesarios para compensar la acción de pequeñas fuerzas perturbadoras que, al actuar de manera continua, terminarían por sacar a los vehículos de su órbita si no se tomara ninguna acción.

Los sistemas de propulsión más utilizados actualmente comprenden a los cohetes químicos y eléctricos. Ambos se apoyan en la tercera Ley de Newton, Ley de Acción-Reacción. Al expulsar un chorro de gas a alta velocidad a través de una tobera se produce una fuerza de empuje sobre el satélite. Los cohetes necesitan tanto masa de combustible como energía para acelerar los chorros. En el caso de los químicos, la energía proviene de las reacciones químicas producidas al quemar el combustible. En los eléctricos los satélites deben ir equipados con una fuente generadora de potencia eléctrica que se utiliza para generar un campo electromagnético que acelera el combustible previamente ionizado (plasma).

La necesidad de una masa de combustible para poder operar es doblemente perjudicial. Por un lado, aumenta los costes de lanzamiento ya que incrementa la

masa del satélite, y por otro, una vez acabado el combustible, el motor deja de funcionar dando así por finalizada la vida útil del satélite. En el caso de la propulsión eléctrica, el sistema de potencia eléctrica a bordo requiere típicamente el uso de pesados paneles solares. Estos motivos han empujado al sector espacial a la búsqueda de sistemas de propulsión alternativos tales como las velas solares o rayos láseres o de microondas enviados desde la Tierra.

En el caso de satélites en órbita alrededor de planetas dotados de campo magnético e ionosfera, cómo la Tierra o Júpiter, existe otro mecanismo físico, diferente a la Ley de Acción-Reacción, que puede ser utilizado: la fuerza de Lorentz que ejerce el campo magnético sobre la corriente que circula por un cable [*Drell, S., Foley, H. M., Ruderman, M. A. Drag and propulsion of large satellites in the ionosphere: an Alfven propulsion engine in space, Journal of Geophysical Research, Vol 70, 13, pp 3131-3145, 1965*]. Uno de los aspectos claves de esta tecnología es el intercambio de carga eléctrica con el plasma ambiente que permiten cerrar el circuito y que circule una corriente regular por el cable. Como se explica a continuación, este problema técnico ha sido resuelto de tal manera que el sistema alcanza un alto grado de sencillez.

En 1993, se propuso dejar el cable conductor desnudo, es decir, sin aislante y colocar en un extremo del mismo un contactor de plasma o cátodo hueco [*Sanmartín, J., Martínez-Sánchez, M and Ahedo, E., Bare wire anodes for electrodynamic tethers, Journal of Propulsion and Power, Vol 9, 3, pp 353-359, 1993].* Excepto en un segmento muy pequeño cerca del cátodo, el cable actúa como una sonda de Langmuir colectora y captura electrones del plasma ambiente de forma natural. El cátodo genera un camino de baja impedancia para los electrones, los cuales son devueltos al plasma dando lugar a una corriente estacionaria a lo largo del cable (ver figura 3). En el trabajo [*Sanmartín, J., Martínez-Sánchez, M and Ahedo, E., Bare wire anodes for electrodynamic tethers, Journal of Propulsion and Power, Vol 9, 3, pp 353-359, 1993]* se propusieron dos modos de operación del cable. En el *modo pasivo* para un vehículo en órbita baja alrededor de la Tierra, el sistema no lleva fuente externa de potencia y produce potencia eléctrica a bordo mientras el vehículo pierde energía orbital. En el *modo* activo se introdujo un esquema de operación en donde existe una fuente externa de potencia eléctrica entre el extremo del cable y el cátodo hueco. La fuerza electromotriz de dicha fuente da control sobre la corriente y por lo tanto también sobre la fuerza de Lorentz.

Sin embargo, la operación del cátodo requiere un sistema de almacenamiento de gas inerte y un dispositivo para controlar su flujo. A lo largo de su vida, el cátodo pierde eficiencia porque se erosiona y, al acabarse el gas inerte, deja de funcionar totalmente. Alternativamente a los cátodos hueco tradicionales, se han propuesto dispositivos que no necesitan gas como los FEACs (del inglés "Field emission array cathodes") o los emisores termiónicos. Actualmente, la capacidad de emisión de electrones de dichos dispositivos se encuentra lejos de los cátodos huecos tradicionales.

Cuando no se emplea ningún cátodo activo (como un contactor de plasma o un cátodo hueco), se dice que el cable es flotante. En ese caso es necesario encontrar un mecanismo físico que permita al cable emitir electrones por sí mismo. Hasta la fecha se han propuesto dos. El primero es la emisión de electrones secundarios que se produce cuando el segmento del cable con polarización negativa recibe el impacto de los iones del plasma ambiente [*Sanmartín, J., Charro, M., Peláez, J., Tinao, I., Elaskar, S., Hilgers, A. and Martínez-Sánchez, M., Floating bare tether as upper atmosphere probe, Journal of Geophysical Research, Vol 111, A11310, 1-15, 2006*]. Sin embargo, cuando se compara con la captura de electrones en el segmento anódico, la eficiencia de la emisión secundaria es baja. Por este motivo, en 2012 se propuso un segundo mecanismo físico: la emisión termiónica que se produce si el cable es recubierto con un material de alta emisividad electrónica (baja función de trabajo) [*Williams, J. D., Sanmartín, J. and Rand, L. P.,Low-Work function coating for entirely propellantless bare electrodynamic tether, IEEE Transactionson Plasma Science, Vol 40, 5, pp 1441-1445, 2012*]. El material termiónico más prometedor para esta aplicación es el C12A7:e^- que muestra unas propiedades de emisión y estabilidad muy superiores a otros recubrimientos cerámicos, entre los que se incluyen el LaB_6, CeB_6, BaO-W, Ba-W, BaO y $12CaO\text{-}7Al_2O_3$(C12A7:e^-).

Es importante señalar que los trabajos previos sobre cables flotantes (sin cátodo activos) se han propuesto para excitar auroras boreales artificialmente [*Sanmartín, J., Charro, M., Peláez, J., Tinao, I., Elaskar, S., Hilgers, A. and Martínez-Sánchez, M., Floating bare tether as upper atmosphere probe, Journal of Geophysical Research, Vol 111, A11310, 1-15, 2006*] y para de-orbitar satélites [*Williams, J. D., Sanmartín, J. and Rand, L. P.,Low-Work function coating for entirely propellantless bare electrodynamic*

tether, IEEE Transactionson Plasma Science, Vol 40, 5, pp 1441-1445, 2012]. A diferencia de la presente invención, en estos dos trabajos el cable trabaja de manera pasiva y no hay fuente de potencia eléctrica activa que alimente el cable. Todos los diseños previos basados en cables electrodinámicos en modo activo (con fuente externa de potencia) no han sido de tipo flotante, ya que constan de un emisor de electrones de tipo cátodo hueco o FEAC (patentes: US 6459206 B1, US 6755377 B1, US 6758443 B1, US 6419191 B1, US 7118074 B1). En ellos la fuente externa de potencia eléctrica se encuentra en un extremo del cable.

Breve descripción de la invención

En la presente invención se propone un diseño nuevo de cables flotantes, en donde los propios cables son responsables de la captura y emisión de electrones, y la fuente generadora de potencia se encuentra conectada a los extremos de dos conjuntos de cables conductores, y en donde cada uno de los dos conjuntos de cables conductores está constituido por al menos un cable conductor.. Por primera vez se contempla la emisión fotoeléctrica por parte de los cables como mecanismo físico para conseguir el contacto catódico con el plasma ambiente. La invención describe cómo deben diseñarse los cables para que ambos mecanismos de emisión de electrones sean eficientes. Algunos materiales que podrían facilitar la emisión fotoeléctrica son los metales alcalinos o los compuestos Ag-Cs_2O-Cs, Ag-Cs_3Sb, y Na_2KSb.

La presente invención se refiere a un sistema de propulsión en órbita para vehículos espaciales o satélites caracterizado por que comprende dos conjuntos de cables conductores electrodinámicos flotantes (2,3) conectados respectivamente a cada uno de los dos polos (4,5) de una fuente generadora de potencia eléctrica (6) a bordo de un vehículo espacial en órbita (1).

El diseño del sistema correspondiente a la presente invención puede ser modificado según las necesidades de la misión o aplicación espacial que lo utilice. Las modificaciones comprenden:

- el posible uso de distintos tipos de secciones (en forma substancialmente circular, en forma substancialmente rectangular o de cinta, y en forma substancialmente anular) para los cables.

- el posible empleo de materiales de alta emisividad electrónica (por efecto termiónico o fotoeléctricos) para la composición de los cables y/o para revestir sus superficies.
- el posible empleo de materiales dieléctricos para aislar partes de la superficie de los cables.
- el posible empleo de materiales o tratamientos que proporcionen un alto cociente de absortividad frente a emisividad térmica en los cables para que alcancen temperaturas más altas y aumente su emisividad electrónica.
- el posible uso de masas de extremidades conectadas con uno o más cables en los extremos opuestos a los polos de conexión del sistema de utilización o almacenamiento de potencia eléctrica, para mejorar la estabilidad dinámica de los cables, y que puede incluir, entre otras, una masa de lastre pasiva, sistema de despliegue para cables, otro satélite, muelle, tapa de satélite.
- el posible uso de múltiples cables, no necesariamente del mismo diseño, características geométricas o composición, conectados a un mismo polo.
- cada conjunto de cables conductores formado por dos o más cables conductores puede tener sus conductores conectados eléctricamente entre sí a lo largo de su extensión en uno o más puntos.
- al menos uno de los cables electrodinámicos puede estar substancialmente fabricado de materiales que incluyen al menos uno de los siguientes: grafeno, aleaciones de Aluminio, Cobre, aleaciones de Berilio-Cobre.

Descripción de las figuras

Para completar la descripción y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, se acompaña la presente memoria descriptiva de las figuras de 1, 2 y 3, como parte integrante de la misma.

La invención se describirá en lo que sigue con más detalle haciendo referencia a un ejemplo de ejecución de la misma representado en la figura 1 y 2. La figura 3 refleja el estado de la técnica actual, y se añade para subrayar la novedad comparativa de la presente invención.

La figura 1 presenta el esquema básico de diseño y funcionamiento de la invención.

La figura 2 explica el mecanismo físico por el cual los cables intercambian carga con el plasma circundante y se consigue una corriente estacionaria a lo largo de los mismos que da lugar a una fuerza de Lorentz.

La figura 3 muestra el diseño clásico de un sistema de propulsión basado en un cable electrodinámico desnudo [*Sanmartín, J., Martínez-Sánchez, M and Ahedo, E., Bare wire anodes for electrodynamic tethers, Journal of Propulsion and Power, Vol 9, 3, pp 353-359, 1993]*. A diferencia de la presente invención, en este diseño se hace uso de un único cable electrodinámico conectado por un extremo a un vehículo espacial (7) y una carga (8), y por el otro extremo a una masa de extremidad (9). El cable, que se compone de una parte aislada de longitud L_I y una parte desnuda de longitud L_B, captura electrones del plasma circundante. La emisión de electrones, necesaria para cerrar el circuito y conseguir una corriente estacionaria en el cable, se obtiene por medio de un cátodo hueco (en inglés "hollow cathode") a bordo del vehículo espacial. La totalidad de los diseños de sistemas de propulsión en órbita por medio de cables electrodinámicos que se han considerado hasta ahora utilizan un esquema similar.

Descripción detallada de la invención

El diseño y funcionamiento de la invención se puede entender fácilmente tomando como referencia a la figura 1. Desde el vehículo espacial (1) se despliegan dos conjuntos de cables conductores desnudos (2) y (3), es decir, no aislados eléctricamente con respecto al plasma circundante a lo largo de sus extensión completa o de parte de ella. En este ejemplo particular, cada conjunto consta de tres cables. Los cables pertenecientes al conjunto (2) están conectados eléctricamente al polo negativo (4) mientras que los cables pertenecientes al conjunto (3) están conectados eléctricamente al polo positivo (5). Una fuente generadora de potencia (6) está conectada a los dos polos (4) y (5).

Los cables interaccionan con el ambiente circundante, caracterizado por la presencia de un campo magnético **B** y de una ionosfera. Debido al movimiento orbital $\mathbf{v}_{rel}$ del vehículo espacial con respecto al plasma ionosférico altamente conductor, existe un campo eléctrico electromotor $\mathbf{E}= \mathbf{v}_{rel} \times \mathbf{B}$ en el plasma lejano en el referencial ligado al vehículo y una corriente **I** fluye a lo largo de los cables. Dicha corriente atraviesa la fuente generadora de potencia eléctrica (6), y su intensidad y dirección puede ser

controlada gracias a la fuerza electromotriz que ésta suministra. La fuerza de Lorentz del campo magnético sobre la corriente propulsa el vehículo espacial (1).

Los principios físicos básicos del funcionamiento de la invención se explicarán a continuación haciendo referencia a la figura 2. En este ejemplo particular, dos cables, de longitud L_1 y L_2, respectivamente, están conectados a un generador de potencia eléctrica. Debido al movimiento orbital del vehículo espacial, existe una velocidad v_{rel} entre el cable y el plasma ionosférico. Como consecuencia, de dicha velocidad y de la presencia del campo magnético **B**, existe en el plasma lejano un campo eléctrico electromotor $\mathbf{v}_{rel}$x **B**, en un sistema de referencia ligado al cable. Asumiendo que la proyección del campo eléctrico electromotor según la dirección tangente a los cables E_t es constante, el potencial eléctrico del plasma lejano (V_{plasma}) varía linealmente a lo largo de la dirección de los cables. La subida total de potencial entre los extremos del cable es $\Delta V_{plasma} = E_t (L_1 + L_2)$. Por otro lado, el potencial eléctrico propio de los cables (V_{tether}) se mantiene aproximadamente constante a lo largo de sus longitudes, siempre y cuando se desprecien, como es razonable para un análisis preliminar, los efectos óhmicos de los mismos. Sin embargo, al pasar de un polo al otro, se verifica una subida de potencial (ε) debido a la presencia de la fuente generadora de potencia eléctrica.

En aquellos puntos donde el potencial del cable sea mayor que el del plasma lejano, el cable capturará electrones como una sonda de Langmuir colectora. En aquellos puntos donde el potencial del cable sea menor que el del plasma lejano el cable emitirá electrones, bien por el impacto de iones o por encontrarse el cable fabricado o recubierto de un material de alta emisividad electrónica (baja función de trabajo), el cual facilita la emisión por efectos termiónico o fotoeléctrico al incidir sobre el cable la radiación solar. El caso más sencillo es el mostrado en la figura 2 en donde un segmento (de longitud L_{2B}) del cable inferior captura electrones, su segmento complementario aislado (de longitud L_{2I}) no intercambia carga con el plasma, y el cable superior emite electrones a lo largo de toda su longitud L_1. La eficiencia de los cables como sistema de propulsión depende de las condiciones ambientales (campo magnético y densidad de plasma), diseño de los cables (sección, material y longitud) y de la fuerza electromotriz proporcionada por la fuente generadora de potencia eléctrica. En función de la misión, será necesario diseñar cuidadosamente el sistema, el cual puede diferir del mostrado en el ejemplo de la figura 2.

Al ser los electrones del plasma ambiente capturados y emitidos en distintos tramos de cada cable, se obtiene finalmente un perfil de corriente (*I*) que varía a lo largo de los cables. Es importante destacar que la corriente se hace cero en las extremidades libres de los cables por ser estos flotantes. El perfil de corriente depende de la fuerza electromotriz (Ɛ) proporcionada por la fuente generadora de potencia eléctrica, lo cual da control sobre la fuerza de Lorentz que ejerce el campo magnético sobre la misma. Es importante señalar que, si Ɛ es lo bastante grande, el sentido de la corriente a lo largo del cable será contrario a su sentido natural, el cual viene dado por el campo electromotor E_t. Éste es el caso representado en la figura 2.

El control sobre el sentido de la corriente es uno de los aspectos claves del sistema. Por ejemplo, en el caso de un satélite en órbita baja alrededor de la Tierra, si el sistema de cables no consta de ninguna fuente de potencia eléctrica, la corriente fluye en el sentido de E_t. En este caso la fuerza de Lorentz produce la re-entrada del satélite. Sin embargo, si Ɛ es lo bastante elevada, la corriente fluye en sentido contrario a E_t y el satélite ganaría altura o podría ser utilizado para compensar la débil resistencia aerodinámica. Se consigue así una fuerza de propulsión sin utilizar ningún tipo de propulsante ni expelante.

Una ventaja clave del diseño propuesto para esta invención es su robustez. Si algún cable resultara cortado durante su operación, por ejemplo debido a un impacto de un micro-meteoroide o fragmento de basura espacial, la vida del satélite no se vería comprometida. Un cable flotante cuya longitud se ha visto reducida por un corte no deja de funcionar; sigue capturando o emitiendo electrones, aunque la eficiencia del sistema se verá reducida una cantidad que dependerá de la longitud cortada de cable.

Para aumentar la eficiencia del sistema, se pueden utilizar materiales o recubrimientos de materiales de alta emisividad electrónica (materiales termiónicos con baja función de trabajo). Dichos recubrimientos o materiales podrán ser empleados en uno o más cables flotantes y a lo largo de toda su longitud o en un segmento de la misma. El sistema puede ser optimizado aislando segmentos de cables. Por ejemplo, uno o más de los cables electrodinámicos puede estar compuesto de un substrato conductor recubierto a lo largo de su extensión completa o parte de ella por un material que facilita la emisión de electrones por efecto termiónico o fotoeléctrico.

Un aspecto clave es la selección de las dimensiones de los cables (longitudes y sección transversal). A modo de ejemplo se describe a continuación los pasos a seguir para obtener un diseño óptimo en el caso de un sistema compuesto de un cable conductor desnudo seguido de un segmento conductor aislado, la fuente generadora de potencia eléctrica y un cable conductor cubierto de un material de alta emisividad electrónica (ver figura 2). Aunque este modelo debe ser adaptado a la configuración específica que se quiera estudiar, por ejemplo añadir más cables o aislar más segmentos, el esquema de diseño es siempre similar. Por ejemplo, al menos uno de los cables conectados a uno de los polos puede estar recubierto de un material que facilite la emisión fotoeléctrica, y al menos uno de los cables conectados al otro polo puede tener el segmento más próximo al polo aislado eléctricamente respecto al plasma.

En primer lugar es necesario calcular los perfiles de corriente y potencial a lo largo del cable. En el caso de la figura 2, si se desprecian efectos óhmicos, la diferencia de potencial entre el cable y el plasma vale

$$V(x) \equiv V_{tether}(x) - V_{plasma}(x) = \begin{cases} V_0 - E_t x & x < L_1 \\ V_0 + \varepsilon - E_t x & L_1 < x < L \end{cases} \quad (0.1)$$

donde $V_0 < 0$ es la diferencia de potencial entre el cable y el plasma lejano para *x*=0 y *L*=L_1+L_2.

En segundo lugar, se calcula el perfil de corriente consistente con la ecuación (0.1). En el segmento $0 < x \le L_1$, un cable de perímetro p_t emite electrones gracias a tres efectos físicos diferentes según la ecuación (1.2):

$$\frac{dI}{dx} = p_t \left[e\int_0^\infty S(U)Y(U)dU + aT^2 \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) + \frac{eN_0}{\pi}\sqrt{\frac{2e\,|V(x)|}{m_i}}\left(1+\gamma\,|V(x)|\right) \right] \quad (0.2)$$

El primer término representa el efecto fotoeléctrico e involucra el flujo solar *S(U)* de energía incidente en el cable (número de fotones por unidad de tiempo, superficie y energía *U*) y el rendimiento cuántico *Y(U)* (en inglés "*photoelectric yield*") del cable, es decir, el número de fotoelectrones extraídos por fotón incidente de energía *U*. La emisión fotoeléctrica por parte del propio cable no ha sido propuesta anteriormente en aplicaciones de cables electrodinámicos desnudos. El segundo término es la emisión

termiónica, propuesta en la Ref. [*Williams, J. D., Sanmartín, J. and Rand, L. P.,Low-Work function coating for entirely propellantless bare electrodynamic tether, IEEE Transactionson Plasma Science, Vol 40, 5, pp 1441-1445, 2012*]. Este mecanismo involucra la constante de Richardson ($a = 1.2 \times 10^6$ A/m^{2}K^2), la constante de Boltzmann (k_B) y la temperatura (*T*) y función de trabajo del cable (*W*), respectivamente. La Ec. (0.2) asume por sencillez que la corriente termiónica emitida viene dada por la ley de Richardson-Dushman, ignorando el efecto Schottky y de *space-charge-limited*. El tercer término es la corriente emitida al recibir el cable el impacto de los iones, un mecanismo propuesto en la Ref. [*Sanmartín, J., Charro, M., Peláez, J., Tinao, I., Elaskar, S., Hilgers, A. and Martínez-Sánchez, M., Floating bare tether as upper atmosphere probe, Journal of Geophysical Research, Vol 111, A11310, 1-15, 2006*]. Depende de la densidad de plasma (N_0), de la masa (m_i) de los iones del plasma, de la carga del electron (*e)* y del producto $\gamma \mid \Delta V \mid$ que representa el número de electrones emitidos por ión que impacta.

En función del diseño de los cables, por ejemplo que éstos estén recubiertos o no de un material con bajo *W* o alto *Y(U)*, y de su operación (temperatura que puedan alcanzar), es de esperar que uno de los tres términos domine sobre el resto.

El segmento $L_1 < x \leq L_1 + L_{2I}$ se encuentra aislado eléctricamente del plasma por lo que la corriente se mantiene constante a lo largo de *x*:

$$\frac{dI}{dx} = 0 \qquad L_1 < x \leq L_1 + L_{2I} \tag{0.3}$$

Por último, una buena aproximación para modelar los electrones capturados en el segmento $L_1 + L_{2I} \leq x < L$ es la ley Orbital-Motion-Limited (OML) en régimen de alta diferencia de potencial *V(x)* [*Sanmartín, J., Martínez-Sánchez, M and Ahedo, E., Bare wire anodes for electrodynamic tethers, Journal of Propulsion and Power, Vol 9, 3, pp 353-359, 1993]:*

$$\frac{dI}{dx} = -\frac{ep_t N_0}{\pi}\sqrt{\frac{2eV(x)}{m_e}} \qquad L_1 + L_{2I} \leq x < L \tag{0.4}$$

La integración de las Ecuaciones (0.2), (0.3) y (0.4) con el potencial dado por (0.1) y las condiciones de contorno *I(0)=I(L)=0* proporciona el perfil de corriente *I(x)* y el valor

de V_0. Es importante señalar que para que la corriente fluya en sentido contrario a E_t la fuerza electromotriz de la fuente generadora de potencia debe satisfacer $\varepsilon > E_t L$.

Conocido el perfil de corriente, se construyen las figuras de mérito:

Fuerza (empuje) de Lorentz $\mathbf{F} = \int_0^L \mathbf{I} \times \mathbf{B} dx$,

Eficiencia de empuje $\eta = \frac{\mathbf{F} \cdot \mathbf{v}_{orb}}{\varepsilon I_G}$,

Potencia mecánica útil por unidad de masa $\kappa = \frac{\mathbf{F} \cdot \mathbf{v}_{orb}}{m_t}$,

Probabilidad de corte $N_c = -\pi L \Delta t_{mission} \int_{\delta_{\min}}^{\delta_\infty} D_{eff}(\delta) \frac{dG}{d\delta} d\delta$,

las cuales han sido propuestas anteriormente para cables electrodinámicos tradicionales equipados con contactores de plasma [*Sanmartín, J., Martínez-Sánchez, M and Ahedo, E., Bare wire anodes for electrodynamic tethers, Journal of Propulsion and Power, Vol 9, 3, pp 353-359, 1993][J. Sanmartín, A. Sánchez-Torres, S. B. Khan, G. Sánchez-Arriaga and M. Charro, Optimimum sizing of bare-tethers for de-orbiting satellites at end of mission, Advances in Space Research 56, 7, 1485-1492, 2015].*

En las ecuaciones anteriores se ha definido la masa total de los cables m_t, velocidad orbital $\mathbf{v}_{orb}$, el tiempo esperado de misión $\Delta t_{mission}$, diámetro efectivo del cable D_{eff}, el flujo de micrometeoroides *G* con tamaño δ, el tamaño máximo de micrometeoroide δ_∞ y el tamaño mínimo que puede cortar el cable $\delta_{\min}$. En función de la misión se seleccionan las figuras de mérito más interesantes para la aplicación particular y se seleccionan las dimensiones de los cables que las maximizan (o minimizan en el caso de N_c).

La descripción anterior debe entenderse como un ejemplo de realización con el único objeto de ilustrar el funcionamiento y optimización del sistema y no como un diseño universal.

Un aspecto crucial en el diseño óptimo del sistema en el caso en el que se pretenda que éste trabaje dominado por emisión termiónica, es la temperatura del cable. Este

aspecto es crítico debido al comportamiento exponencial de la corriente emitida con el factor W/k_BT en la ecuación (0.2). Ignorando el calentamiento por efecto Joule y la energía aportada por los electrones al impactar en el segmento anódico, la temperatura de equilibrio T_{eq} del cable se encuentra determinada por un balance entre el calentamiento solar y el enfriamiento radiativo según la ecuación:

$$T_{eq} = \left(\frac{\alpha_{abs}}{\varepsilon_{emis}} \frac{S}{\pi \sigma_B} \right)^{1/4} \quad (0.5)$$

donde S es la constante solar, σ_B la constante de Stefan-Boltzmann y α_{abs} y ε_{emis} la absortividad y emisividad del cable.

Para tener valores razonables de eficiencia las densidades de corriente emitida y capturada deben ser de igual orden, lo cual proporciona la siguiente ligadura entre la función de trabajo del material y su temperatura [ver ecuaciones (0.2) y (0.4)]

$$W \approx -k_B T_{eq} \; ln\left(\frac{eN_0}{A\pi T_{eq}^2} \sqrt{\frac{E_t L}{m_e}} \right) \quad (0.6)$$

La selección del cociente $\alpha_{abs}/\varepsilon_{emis}$ en la ecuación (0.5) es crítica ya que la temperatura debe estar comprendida en cierto rango de operación. El cable debe estar caliente para favorecer la emisión de electrones por efecto termiónico pero sin sobrepasar el límite de temperatura por encima del cual el material pierde propiedades mecánicas. El estado del arte de las funciones de trabajo de los materiales LaB_6 y CeB_6 se encuentran alrededor de los 2,5 eV y para el electride C12A7:e^- puede ser potencialmente 0,65 eV [Y. Toda, K. Kobayashi, K. Hayashi, S. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano y H. Hosono, Field Emission of Electron anions clathrated in subnanometer-sized cages in $[Ca_{24}Al_{28}O_{64}]^{4+}(4e^-)$, Adv. Matter, 16, 685-689, 2004]. Estos valores, junto con los parámetros ambientales de E_t y N_0 en órbita baja alrededor de la Tierra, indican que la temperatura del cable deberá encontrarse entre los 300 y los 1000 K (mayores si el material conductor puede soportarlo). Estas dos temperaturas conducen a cocientes de $\alpha_{abs}/\varepsilon_{emis}$ alrededor de 1 y 130, respectivamente.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de propulsión en órbita por medio de cables conductores flotantes embarcado en un vehículo espacial (1) caracterizado por que comprende dos conjuntos de cables conductores electrodinámicos (2,3) conectados respectivamente a cada uno de los dos polos (4,5) de un fuente generadora de potencia eléctrica (6)), y en donde cada conjunto está formado por al menos un cable conductor.

2. Sistema según la reivindicación **1** en donde cada conjunto de cables conductores formado por dos o más cables conductores tiene sus conductores conectados eléctricamente entre sí a lo largo de su extensión en uno o más puntos.

3. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones **1, 2,** donde al menos uno de sus cables electrodinámicos tiene una masa de extremidad conectada en el extremo opuesto al polo de conexión con la fuente generadora de potencia eléctrica.

4. Sistema según la reivindicación **3** donde la masa de extremidad comprende al menos uno de los elementos siguientes: masa de lastre pasiva, sistema de despliegue para cables, otro satélite, muelle, tapa de satélite.

5. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones **1**, **2**, **3, 4,** donde uno o más de sus cables electrodinámicos tiene sección substancialmente circular.

6. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones **1**, **2**, **3, 4,** donde uno o más de sus cables electrodinámicos tiene sección substancialmente anular.

7. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones **1**, **2**, **3, 4,** donde uno o más de sus cables electrodinámicos tiene substancialmente forma de cinta.

8. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores donde al menos uno de sus cables electrodinámicos está compuesto de un material que facilita la emisión de electrones por efecto termiónico o fotoeléctrico.

9. Sistema según la reivindicación **8** donde el material que facilita la emisión de electrones por efecto termiónico incluye al menos uno de los siguientes compuestos: LaB_6, CeB_6, BaO-W, Ba-W, BaO, y $12CaO\text{-}7Al_2O_3(C12A7{:}e^-)$.

10. Sistema según reivindicación **8** donde el material que facilita la emisión de electrones por efecto fotoeléctrico incluye al menos un metal alcalino o alguno de los compuestos Ag-Cs_2O-Cs, Ag-Cs_3Sb y Na_2KSb.

11. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones **1**, **2**, **3, 4, 5, 6, 7,** donde uno o más de sus cables electrodinámicos está compuesto de un substrato conductor recubierto a lo largo de su extensión completa o parte de ella por un material que facilita la emisión de electrones por efecto termiónico o fotoeléctrico.

12. Sistema según la reivindicación **11** en donde el material que facilita la emisión por efecto termiónico incluye al menos uno de los siguientes: LaB_6, CeB_6, BaO-W, Ba-W, BaO, y $12CaO\text{-}7Al_2O_3$ ($C12A7{:}e^-$).

13. Sistema según la reivindicación **11** en donde el material que facilita la emisión por efecto fotoeléctrico incluye al menos un metal alcalino o alguno de los compuestos Ag-Cs_2O-Cs, Ag-Cs_3Sb, y Na_2KSb

14. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones **1**, **2**, **3, 4, 5, 6, 7,** donde uno o más de sus cables electrodinámicos está recubierto a lo largo de su extensión completa o parte de ella por un material aislante.

15. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones **1**, **2**, **3, 4, 5, 6, 7, 11, 12**, **13, 14,** donde al menos uno de sus cables electrodinámicos está substancialmente fabricado de materiales que incluyen al menos uno de los siguientes: grafeno, aleaciones de Aluminio, Cobre, aleaciones de Berilio-Cobre.

16. Sistema según la reivindicación **15** donde la superficie de uno o más de sus cables ha sido preparada para alcanzar un alto cociente de absortividad/emisividad térmica con el fin de obtener altas temperaturas que favorezca la emisión termiónica del recubrimiento.

17. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones **1**, **2, 3, 4, 5, 6, 7,** donde al menos uno de los cables conectados a uno de los polos se encuentra recubierto de un material que facilita la emisión fotoeléctrica, y al menos uno de los cables conectados al otro polo tiene el segmento más próximo al polo aislado eléctricamente respecto al plasma.

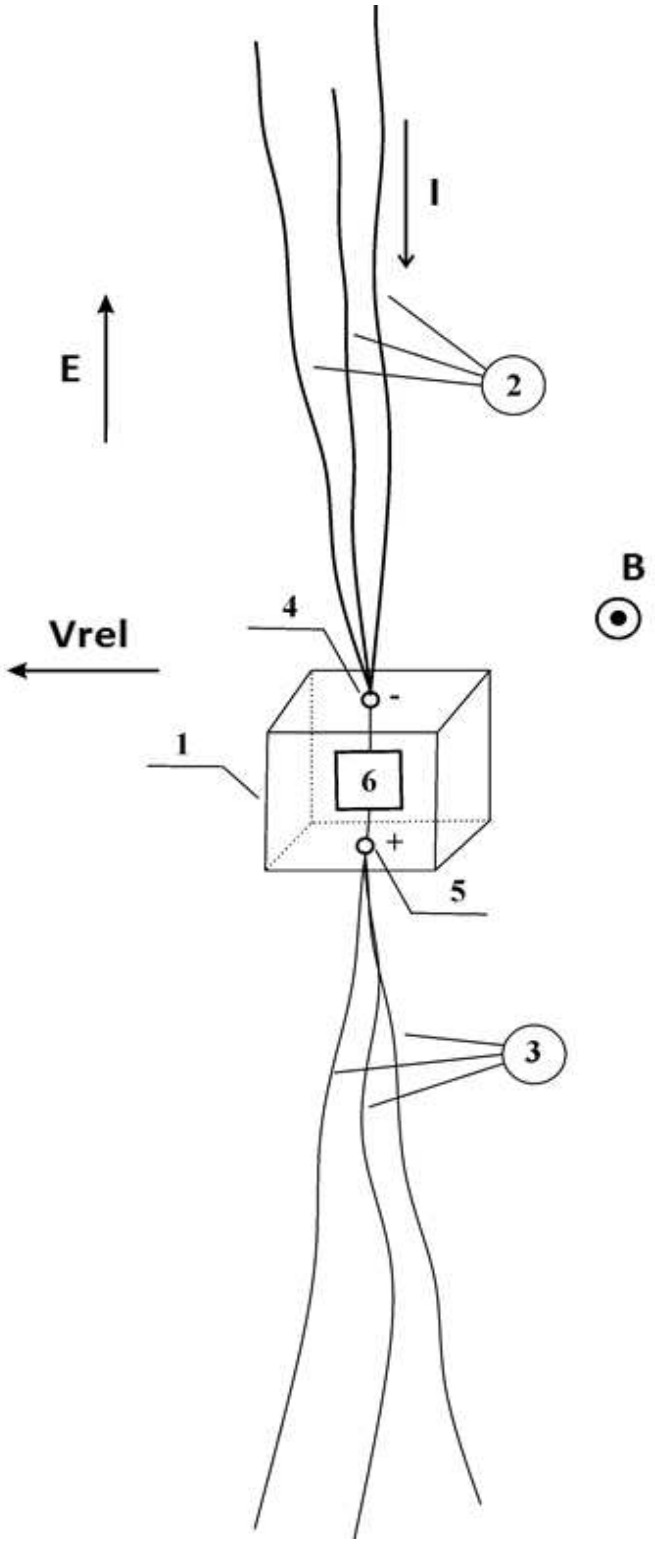


FIG. 1

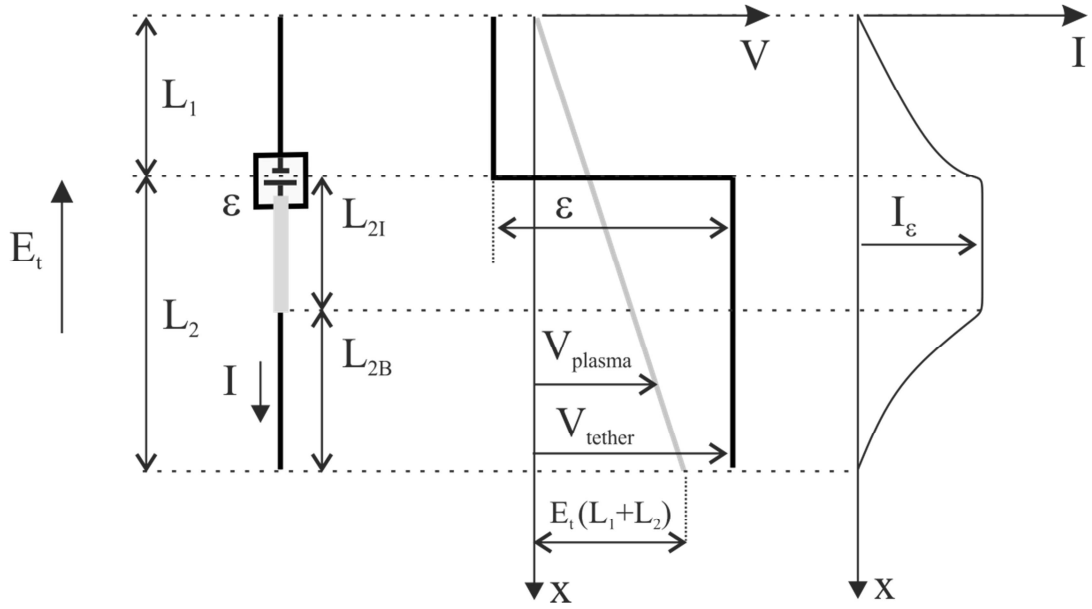

V
I
L1
ε
L2I
Et
L2
L2B
I
ε
Iε
Vplasma
Vtether
Et(L1+L2)
x
x

FIG. 2

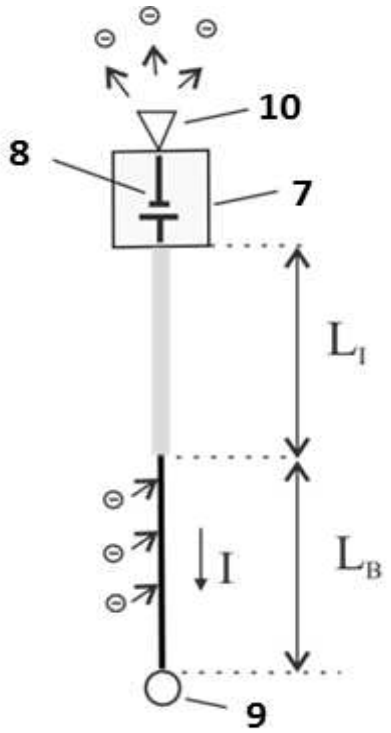

10
8
7
LI
I
LB
9

FIG. 3

OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(21) N.º solicitud: 201531649

(22) Fecha de presentación de la solicitud: 13.11.2015

(32) Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

(51) **Cl. Int:** ver hoja adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	(56) **Documentos citados**	**Reivindicaciones afectadas**
Y	US 6419191 B1 (HOYT et al.) 16.07.2002, columna 12, líneas 31-55; columna 14, línea 36 – columna 15, línea 13; columna 33, líneas 51-65; columna 36, líneas 14-34; columna 38, líneas 39-60; columna 40, líneas 33-53; columna 42, línea 26 – columna 45, línea 57; figuras 2a-3,22-26.	1-8,10,14-15,17
Y	WO 9848089 A1 (FORWARD et al.) 29.10.1998, página 1, líneas 7-19; página 33, línea 14 – página 35, línea 11; página 36, líneas 7-10; página 38, líneas 9-29; página 41, línea 20 – página 42, línea 30; figuras 2a-3,5c-7,9-10f,12a-12b,28a.	1-8,10,14-15,17
A	US 6755377 B1 (LEVIN et al.) 29.06.2004	
A	US 20120138748 A1 (BARNES et al.) 07.06.2012	

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:

Fecha de realización del informe	**Examinador**	**Página**
03.05.2016	L. J. Dueñas Campo	1/4

CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

B64G1/10 (2006.01)
B64G1/32 (2006.01)
B64G1/40 (2006.01)
B64G1/42 (2006.01)

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

B64G

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

EPODOC

Fecha de realización de la opinión escrita: 03.05.2016

Declaración

Novedad (art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones	1-17	**SÍ**
	Reivindicaciones		**NO**
Actividad inventiva (art. 8.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones	9, 11-13, 16	**SÍ**
	Reivindicaciones	1-8, 10, 14-15, 17	**NO**

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (artículo 31.2, ley 11/1986).

Base de la opinión.

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número de publicación o identificación	Fecha de publicación
D01	US 6419191 B1 (HOYT et al.)	16.07.2002
D02	WO 9848089 A1 (FORWARD et al.)	29.10.1998

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del reglamento de ejecución de la ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

El documento D01 se considera el estado de la técnica más próximo. Este documento de patente, que pertenece al mismo sector técnico, presenta «un sistema de propulsión en órbita (ver D01: columna 1, líneas 16-24; columna 12, líneas 47-55) por medio de cables conductores (figuras 2a-2c, 22-26, especialmente figuras 25-26; columna 15, líneas 1-13; columna 36, líneas 14-34; columna 38, líneas 39-42, 57-60; columna 40, líneas 32-37, 51-53) flotantes (esta característica de flotante en relación al cable se considera según lo explicado en la descripción: cables sin cátodo activo; en relación al ánodo, se utiliza un cable desnudo sin elementos activos; ver D01: columna 15, líneas 1-13; columna 33, líneas 51-54; columna 40, líneas 32-37, 51-53; en relación al cátodo, se trata de un cátodo activo; sin embargo, esta característica de flotante se presenta como característica del preámbulo, no como parte caracterizadora de la invención, por lo que podría generar dudas a la hora de su interpretación; de hecho, el carácter flotante de los cables no es obvio a partir de ninguna de las características técnicas de la parte caracterizadora de la reivindicación principal; de todas formas, se tiene en consideración como característica técnica para el análisis de la actividad inventiva) embarcado en un vehículo espacial (figura 3; columna 14, líneas 65-67; elementos 301, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600), que comprende dos conjuntos de cables conductores electrodinámicos (elementos 307, 2204, 2254, 2304, 2354, 2404, 2454, 2504, 2554, 2604, 2654; columna 14, línea 55 - columna 15, línea 13) conectados respectivamente a cada uno de los dos polos de una fuente generadora de potencia eléctrica (ver figuras 25-26; elementos 2542, 2642; columna 42, líneas 26-50; columna 43, líneas 52-61; columna 44, líneas 26-52; columna 45, líneas 28-57), y en donde cada conjunto está formado por al menos un cable conductor» (ver figuras 25-26). Por tanto, la diferencia técnica esencial de la invención respecto al documento D01 es el carácter flotante del cable que actúa de cátodo emitiendo electrones sin elementos activos.

El documento D02 pertenece al mismo sector técnico. Este documento presenta un cable multilínea para este mismo tipo de aplicaciones (ver D02: figura 28a; página 1, líneas 7-19; página 34, línea 27 - página 35, línea 11). En la figura citada se muestra la emisión de electrones mediante un cátodo activo. Sin embargo, también añade otros dos sistemas para el cátodo: uno, por emisión termoiónica (ver D02: página 42, líneas 7-11) y otro, por emisión fotoeléctrica (ver D02: página 42, líneas 26-30). Estos sistemas son los presentados en la descripción de la solicitud como flotantes. Por todo ello, se considera que la combinación de los documentos D01 y D02 es relevante en cuanto a la actividad inventiva de la reivindicación 1.

Las reivindicaciones dependientes señaladas en el informe sobre el estado de la técnica también pueden verse afectadas por dicha combinación de documentos. Así:

- La reivindicación 2 aparece en D01: figuras 2a - 2c; o D02: figuras 2a - 2d.
- Las reivindicaciones 3-4 aparecen en D01: figuras 25-26; elementos 2508, 2608.
- La reivindicación 5 aparece en D01: figura 2a; o D02: figuras 12a - 12b.
- La reivindicación 6 aparece en D01: figura 2a; o D02: figuras 2a, 5a - 5b.
- La reivindicación 7 aparece en D01: figura 2b; o D02: figuras 2b - 3; 10a - 10f.
- La reivindicación 8 aparece en D02: página 42, líneas 7-11, 26-30.
- La reivindicación 10 aparece en D02: página 42, línea 27.
- La reivindicación 14 aparece en D01: figuras 3; elemento 306; columna 15, líneas 1-4.
- La reivindicación 15 aparece en D02: página 38, línea 11, 19, 27 y ss.
- La reivindicación 17 aparece en D02: página 42, líneas 26-30; y figura 28a, elementos 2806 y 2808, página 35, líneas 4-11 (también en D01: figuras 3; elemento 306; columna 15, líneas 1-4).