(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
18 de mayo de 2017 (18.05.2017)

WIPO | PCT

(10) Número de Publicación Internacional
WO 2017/081350 A1

(51) Clasificación Internacional de Patentes:
B64G 1/42 (2006.01) *H01B 1/00* (2006.01)
B64G 1/00 (2006.01) *H01M 10/46* (2006.01)
B64G 1/32 (2006.01)

(21) Número de la solicitud internacional:
PCT/ES2016/070801

(22) Fecha de presentación internacional:
11 de noviembre de 2016 (11.11.2016)

(25) Idioma de presentación: español

(26) Idioma de publicación: español

(30) Datos relativos a la prioridad:
P201531648
13 de noviembre de 2015 (13.11.2015) ES

(71) Solicitantes: **UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID** [ES/ES]; Av. Gregorio Peces Barba, 1, 28919 Leganés, Madrid (ES). **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID** [ES/ES]; C/ Ramírez De Maeztu, 7, 28040 Madrid (ES).

(72) Inventores: **BOMBARDELLI, Claudio**; C/ Ramírez De Maeztu, 7, 28040 Madrid (IT). **SÁNCHEZ ARRIAGA, Gonzalo**; Av. Gregorio Peces Barba, 1, 28919 Leganés (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, DJ, 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, KW, 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,

[Continúa en la página siguiente]

(54) **Title**: SYSTEM FOR GENERATING ELECTRICAL POWER IN ORBIT BY MEANS OF FLOATING CONDUCTOR CABLES

(54) **Título** : SISTEMA DE GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EN ÓRBITA POR MEDIO DE CABLES CONDUCTORES FLOTANTES

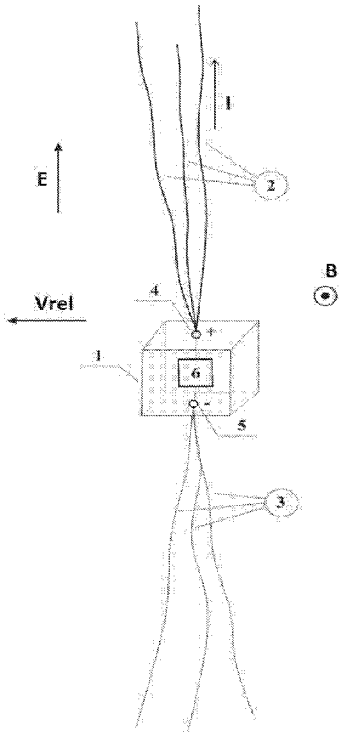

FIG. 1

(57) **Abstract**: The invention relates to a system for generating electrical power in orbit by means of floating conductor cables, which system is mounted in a space vehicle (1) and comprises: two sets of bare (without electrical insulation) electro-dynamic conductor cables (2, 3) respectively connected to each of two poles (4, 5) of a system (6) for using or storing electrical power, each set being formed by at least one conductor cable. In the presence of plasma and a magnetic field, as is the case of a satellite orbiting in Earth's ionosphere, an electric current flows naturally along the conductor cables, providing electrical power. The quantity of electrical power are obtained depends on the space environment, the speed of the satellite in relation to the plasma, and the properties and design of the cables (length, cross-section and material). The system can be optimised by using materials that promote the emission of electrons by means of a thermionic or photoelectric effect. Said materials are used in the composition of the cables or to cover the surface thereof along the entirety or parts of the extension thereof.

(57) **Resumen**: El sistema de generación de potencia eléctrica en órbita por medio de cables conductores flotantes embarcado en un vehículo espacial (1) comprende dos conjuntos de cables conductores electrodinámicos desnudos (sin aislante eléctrico) (2,3) conectados respectivamente

[Continúa en la página siguiente]

WO 2017/081350 A1

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))*

— *antes de la expiración del plazo para modificar las reivindicaciones y para ser republicada si se reciben modificaciones (Regla 48.2(h))*

a cada uno de los dos polos (4,5) de un sistema de utilización o almacenamiento de potencia eléctrica (6), y en donde cada conjunto está formado por al menos un cable conductor. En presencia de un plasma y de 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 proporcionando una potencia eléctrica. La cantidad de potencia eléctrica obtenida 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 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.

DESCRIPCIÓN

SISTEMA DE GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EN ÓRBITA POR MEDIO DE CABLES CONDUCTORES FLOTANTES

Campo técnico de la invención

La presente invención se enmarca en el campo aeroespacial. Más en particular, pertenece a los sistemas de generación de potencia eléctrica para satélites. En concreto, aquellos que emplean las amarras o cables electrodinámicos desnudos como elementos pasivos para la conversión de la energía orbital de un satélite en energía útil a bordo del mismo, gracias a la fuerza electrodinámica producida por el campo magnético del planeta sobre la corriente que fluye por el cable.

Estado de la Técnica

Una de las necesidades más perentorias e interesantes para el mercado de las nuevas tecnologías espaciales se encuentra en los sistemas de generación de potencia eléctrica. Se necesitan sistemas de baja complejidad, bajo coste y alta eficiencia. Esto es especialmente relevante en el campo de los picosatélites (en inglés "cubesats"), para los que la falta de potencia eléctrica disponible a bordo es actualmente una de sus mayores limitaciones. Cabe destacar que precisamente el mercado de los picosatélites está en continua expansión y se estima que crezca fuertemente en los próximos años.

La técnica anterior se ha ocupado ya del problema de generación de potencia eléctrica a bordo de satélites, siendo un elemento esencial para la vida del satélite y sus operaciones. El sistema de generación de potencia eléctrica más utilizado está basado en principios fotovoltaicos, en los que se convierte energía solar en energía eléctrica mediante el uso de paneles solares y con la posibilidad de aumentar la eficiencia de este proceso con varios métodos (por ejemplo utilizando concentradores solares y materiales de última generación).

En la actualidad, los métodos fotovoltaicos sufren de varias limitaciones. En primer lugar su capacidad de generación de potencia eléctrica depende de la cantidad de

radiación solar recibida la cual se reduce prácticamente a cero en condiciones de eclipses, obligando a los satélites a almacenar energía en baterías durante la fase iluminada de cada órbita. Además, la potencia eléctrica recibida decae con el cuadrado de la distancia al Sol, lo cual perjudica enormemente el uso de esta tecnología en misiones espaciales más allá de Júpiter y Saturno. En esos casos, se suelen emplear costosos sistemas de generación de potencia eléctrica basados en reacciones nucleares.

Otra limitación importante de los sistemas fotovoltaicos deriva de su escasa escalabilidad y de la necesidad de control. Los paneles solares que se utilizan hoy día son bastante pesados y necesitan orientarse continuamente hacia la dirección de máxima iluminación si se quieren evitar importantes pérdidas de eficiencia. Como resultado de estas limitaciones, muy pocos satélites tienen una capacidad de generación de potencia eléctrica superior a los 10 kW, y en el caso de los picosatélites, la potencia eléctrica máxima es sólo de unos pocos vatios.

En el caso de satélites en órbita alrededor de planetas dotados de campo magnético e ionosfera, cómo la Tierra o Júpiter, existe otro mecanismo de generación de potencia eléctrica menos convencional basado en la interacción de cables conductores en órbita con el ambiente espacial circundante [*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*]. Este mecanismo se conoce desde hace varias décadas y se basa en la conversión de energía orbital en energía eléctrica gracias al arrastre electrodinámico que afecta a un cuerpo conductor en movimiento relativo a otro conductor, en este caso el plasma ionosférico y el cable, en presencia de un campo magnético [*Alfvén, H, Spacecraft propulsión: new methods, Science, New Series, Vol 176, 4031, pp 167-168, 1972*]. Según los principios físicos que gobiernan esa interacción, cables conductores en forma de largas cintas delgadas, con longitudes, anchuras y espesores típico del orden de kilómetros, centímetros y decenas de micras respectivamente, resultan muy eficientes para generar potencia eléctrica y se han estudiado de manera extensa en la literatura científica [*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, Sanmartín, J and Estes, R. D., The orbital-motion-limited regime of cylindrical Langmuir probes, Physics of Plasmas, Vol 6, 1, pp 395-405, 1999,*

Bombardelli, C., Power density of a bare electrodynamic tether generator, Journal of Propulsion and Power, Vol 28, 3, pp 664-668, 2012].

Como muestra la Figura 3, en el diseño de todos los sistemas de potencia eléctrica basado en cables electrodinámicos propuestos hasta ahora [*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*] (véanse también la solicitudes estadounidense US4923151 A, US 6459206 B1, US 6755377 B1, US 6758443 B1, US 6419191 B1, US 7118074 B1, US 6116544 A), un polo del elemento de utilización o almacenamiento de potencia eléctrica se encuentra conectado eléctricamente a un extremo del cable y el otro a un dispositivo emisor de electrones, típicamente un cátodo hueco (en inglés "hollow cathode"). En este esquema la intensidad es máxima en el extremo del cable donde se encuentra conectado el elemento de utilización o almacenamiento de potencia eléctrica. Sin embargo, la presencia del cátodo hueco introduce importantes desventajas. En primer lugar, 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. En segundo lugar, el sistema deja de ser totalmente pasivo, lo cual disminuye su atractivo. 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.

En ausencia de un dispositivo de emisión de electrones, un cable electrodinámico desnudo (sin aislante eléctrico) es poco eficiente. El cable desnudo intercambia carga de forma natural con el plasma pero, debido a la disparidad de masas entre electrones e iones, la corriente que circula por el mismo se reduce drásticamente. Es lo que se conoce como cable electrodinámico flotante (en inglés "floating electrodynamic tether"), el cual tiene intensidad de corriente nula en sus extremos y ha sido propuesto como instrumento científico para excitar auroras 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*]. En dicho artículo se propone el uso de una cinta electrodinámica conductora conectada en uno de sus extremos a un satélite científico, el cual es

desorbitado (pierde altura) de forma totalmente pasiva. Un diseño similar de cable flotante para desorbitar satélites al final de misión fue patentado en 2012 (US 2012/0138748 A1).

La eficiencia de un cable flotante aumenta drásticamente si éste se recubre con un material con baja función de trabajo, el cual emite electrones de manera natural a temperaturas moderadas. Este concepto, denominado cable flotante termiónico, ha sido introducido recientemente con aplicación al desorbitado de satélites [*Williams, J. D., Sanmartín, J. and Rand, L. P.,Low-Work function coating for entirely propellantless bare electrodynamic tether, IEEETransactionson 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^-).

Tanto en el artículo de excitación de auroras con cables flotantes [*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*, como en la solicitud de patente US 2012/0138748 A1, el satélite se encuentra en uno de los extremos del cable. Al ser éste de tipo flotante, la corriente es nula en el extremo, y por tanto esa configuración no puede utilizarse para generar potencia eléctrica a bordo. La única manera de generar potencia eléctrica en órbita por medio de cables flotantes es utilizar un sistema de cables múltiples (como mínimo dos) que se extienden desde un satélite en direcciones opuestas con respecto al campo eléctrico electromotor. Este sistema de cables múltiples se describe y analiza por primera vez en esta invención. Es importante subrayar que en el resumen del artículo de cable flotante con emisión termiónica [Williams, J. D., Sanmartín, J. and Rand, L. P.,Low-Work function coating for entirely propellantless bare electrodynamic tether, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol 40, 5, pp 1441-1445, 2012] se menciona la posibilidad de utilizar el concepto para desorbitar y generar potencia eléctrica. Sin embargo, en el cuerpo del mismo, los autores analizan exclusivamente la primera de estas aplicaciones y no proponen ningún diseño de sistema que permita la generación de potencia eléctrica.

Breve descripción de la invención

En la presente invención se propone un diseño original que permite por primera vez generar potencia eléctrica a bordo de un satélite mediante el uso de cables flotantes, los cuales son responsables de la captura y emisión de electrones. El sistema de utilización o almacenamiento de potencia eléctrica dispone de dos polos, cada uno de los cuales se conecta eléctricamente al extremo de un conjunto de cables conductores, y en donde cada uno de los dos conjuntos de cables conductores está constituido por al menos un cable conductor. Este detalle es esencial ya que, como se ha discutido anteriormente, un solo cable conductor con un sistema de generación de potencia eléctrica en un extremo es inútil. Además, por primera vez se contempla la emisión fotoeléctrica de electrones a lo largo de los cables y se describe cómo deben diseñarse los cables para que este mecanismo sea eficiente. 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 generación de potencia eléctrica para satélites en órbita 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 un sistema de utilización o almacenamiento 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 fotoeléctrico) 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.

Descripción de las figuras

Para complementar 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 representa el esquema básico de diseño y funcionamiento de la invención.

La figura 2 explica el mecanismo físico por el cual los cables capturan corriente desde el plasma circundante y la transmiten al dispositivo de almacenamiento o utilización de potencia eléctrica.

La figura 3 representa el diseño clásico de un sistema de generación de potencia eléctrica basado en un cable electrodinámico desnudo. 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, de longitud *L*, ejerce la función de colección de electrones desde el plasma circundante, aunque parte de su extensión se encuentra a potencial negativo con respecto al plasma y absorbe, en manera poco eficiente, iones.

La emisión de electrones, necesaria para cerrar el circuito y conseguir una corriente estacionaria **I** en el cable, se obtiene por medio de un cátodo hueco (10) a bordo del vehículo espacial. La totalidad de los diseños de sistemas de producción de potencia eléctrica 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 la figura 1.

Desde el vehículo espacial (1) se despliegan dos conjuntos de cables conductores desnudos (sin aislante eléctrico) (2) y (3), en direcciones opuestas. En este ejemplo particular, cada conjunto consta de tres cables. Los cables pertenecientes al conjunto (2) están conectados eléctricamente al polo positivo (4) mientras que los cables pertenecientes al conjunto (3) están conectados eléctricamente al polo negativo (5). Un dispositivo de almacenamiento o utilización de potencia eléctrica (6) está conectado a los dos polos (4) y (5).

Todos 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 el dispositivo de almacenamiento o utilización de potencia eléctrica (6) y da lugar a una potencia eléctrica útil para 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, no necesariamente correspondiente al diseño óptimo del sistema, dos cables, de longitud L_1 y L_2, respectivamente, están conectados a un dispositivo de almacenamiento o utilización de potencia eléctrica de impedancia Z_ℓ.

Asumiendo que la proyección del campo eléctrico electromotor **E** 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 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 caída de potencial (ΔV_ℓ) debido a la presencia del dispositivo de almacenamiento o utilización de potencia eléctrica de impedancia (Z_ℓ) no nula.

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 que favorezca la emisión de electrones por efecto termiónico o fotoeléctrico. En la figura 2 se muestra un caso particular en el que cada uno de los cables tiene un segmento colector y otro emisor. En función de las condiciones ambientales (campo magnético y densidad de plasma), diseño de los cables (sección, material y longitud) y de la impedancia eléctrica del sistema de almacenamiento o generación de potencia eléctrica existen otras configuraciones de emisión y captura de electrones a lo largo de los cables. El principio físico que las gobiernan es idéntico al descrito anteriormente.

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. La conclusión es que a través del dispositivo de almacenamiento o utilización de potencia eléctrica fluye una corriente no nula (I_ℓ) que proporciona la potencia eléctrica $P = \Delta V_\ell I_\ell$.

El sistema propuesto es adecuado para la generación de potencia eléctrica a bordo de un satélite en órbita alrededor de un planeta dotado de su propio campo magnético e ionosfera, como la Tierra o los grandes planetas exteriores. A diferencia de los sistemas fotovoltaicos, puede proporcionar potencia eléctrica en fase de eclipse.

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 proporcionando potencia eléctrica, aunque ésta se verá reducida una cantidad que dependerá de la longitud de cable cortada.

Para aumentar la eficiencia del sistema, se pueden utilizar materiales o recubrimiento de materiales de alta emisividad electrónica (materiales termiónicos con baja función de trabajo o fotoeléctricos). 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.

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 la figura 2, en donde los dos cables tienen igual perímetro y están fabricados con los mismos materiales. Aunque este modelo debe ser adaptado a la configuración específica que se quiera estudiar, por ejemplo añadir más cables o aislar eléctricamente algún segmento respecto al plasma, el esquema de diseño es siempre similar.

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:

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

donde $V_0 > 0$ es la diferencia de potencial entre el cable y el plasma lejano para x=0 y $L=L_1+L_2$. Como se explica a continuación, el valor de V_0 se conoce como parte de la solución del problema así como las longitudes $L_{1A} = V_0 / E_t$, $L_{2A} = -L_1 + (V_0 + \Delta V_l) / E_t$, $L_{1C} = L_1 - L_{1A}$ y $L_{2C} = L_2 - L_{2A}$.

En segundo lugar, se calcula el perfil de corriente consistente con la ecuación (0.1).

Los dos segmentos de cables $L_{1A} < x \leq L_1$ y $L_1 + L_{2A} < x \leq L$, cuyas secciones, tienen, por simplicidad, el mismo perímetro p_t, emiten electrones gracias a tres efectos físicos diferentes según la ecuación (1.2):

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

El primer término del miembro derecho de la precedente ecuación 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 nunca 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 ($a = 1.2\times10^6$ A/m^{2}K^2), la constante de Boltzmann (k_B) y la temperatura (*T*) y función de trabajo del cable (*W*), respectivamente.

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 electrón (*e*) y del producto $\gamma\,|\Delta V|$ que representa el número de electrones emitidos por ion 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.

Por último, los dos segmentos de cables $0 < x \le L_{1A}$ y $L_1 < x \le L_1 + L_{2A}$, con secciones del mismo perímetro p_t, capturan electrones. Una buena aproximación para modelar los electrones capturados 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]:*

$$\frac{dI}{dx} = -\frac{ep_t N_0}{\pi}\sqrt{\frac{2eV(x)}{m_e}} \quad 0 < x \le L_{1A}, \quad L_1 < x \le L_1 + L_{2A} \tag{0.3}$$

La integración de las Ecuaciones (0.2) y (0.3) 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 (así como las longitudes L_{1A}, L_{1C}, L_{2A} y L_{2C}).

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

Potencia eléctrica generada por unidad de masa $w_{gen} = \frac{\Delta V_\ell I_\ell}{m_t}$,

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

donde I_ℓ es la corriente que fluye a través del dispositivo de almacenamiento o utilización de potencia eléctrica en $x=L_1$, m_t es la masa total de los cables, $\Delta t_{mission}$ es el tiempo esperado de misión, D_{eff} es el diámetro efectivo del cable, *G* el flujo de micrometeoroides con tamaño δ, y δ_∞, $\delta_{\min}$ el tamaño de micrometeoroide máximo y mínimo que pueden cortar el cable, respectivamente.

Estas figuras de mérito han sido propuestas anteriormente para optimizar el diseño de cables electrodinámicos equipados con contactores de plasma en los trabajos [*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 función de la misión el diseño de los cables, incluyendo sus longitudes y secciones, se optimizará

maximizando la potencia eléctrica generada por unidad de masa y minimizando la probabilidad de corte.

El ejemplo de la figura 2, en donde cada cable tiene un segmento anódico y otro catódico, 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. Es más, incluso para un mismo sistema de cables, es decir fijadas todas las propiedades físicas de los mismos, el sistema puede funcionar en otros regímenes de operación. Por ejemplo, durante parte de la misión podría haber un segmento catódico y otro anódico en cada cable y en otro momento que un cable entero actuara como segmento catódico (negativamente polarizado respecto al plasma y emitiendo electrones). Esto es así porque el sistema de ecuaciones (0.1)-(0.3) depende de parámetros ambientales, tales como la densidad de plasma o el campo electromotor, y en función de estos su solución es diferente. Existen soluciones en las que algunas de las longitudes L_{1A}, L_{1C}, L_{2A} y L_{2C} es nula.

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 de los cables. Este aspecto es crítico debido a la dependencia exponencial de la corriente emitida con el factor $W/k_B T$ 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:

$$T_{eq} = \left(\frac{\alpha_{abs}}{\varepsilon_{emis}} \frac{S}{\pi \sigma_B} \right)^{1/4} \tag{1.4}$$

donde S es la constante solar, σ_B la constante de Stefan-Boltzmann y α_{abs} y ε_{emis} la absortividad y emisividad térmica 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 (1.3)]

$$W \approx -k_B T_{eq} \; ln\left(\frac{eN_0}{A\pi T_{eq}^2} \sqrt{\frac{E_t L}{m_e}} \right) \tag{1.5}$$

La selección del cociente $\alpha_{abs}/\varepsilon_{emis}$ en la ecuación (1.4) 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 material 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 baja órbita terrestre, 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 generación de potencia eléctrica en órbita por medio de cables conductores flotantes caracterizado por que comprende dos conjuntos de cables conductores electrodinámicos desnudos (sin aislante eléctrico) (2,3) conectados respectivamente a cada uno de los dos polos (4,5) de un sistema de utilización o almacenamiento 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 el sistema de utilización o almacenamiento de potencia eléctrica.

4. Sistema según la reivindicación **3** en 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 al menos uno de sus cables electrodinámicos tiene sección substancialmente circular.

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

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

8. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones **1**, **2**, **3, 4, 5, 6, 7,** 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 la 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 de electrones 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, 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.

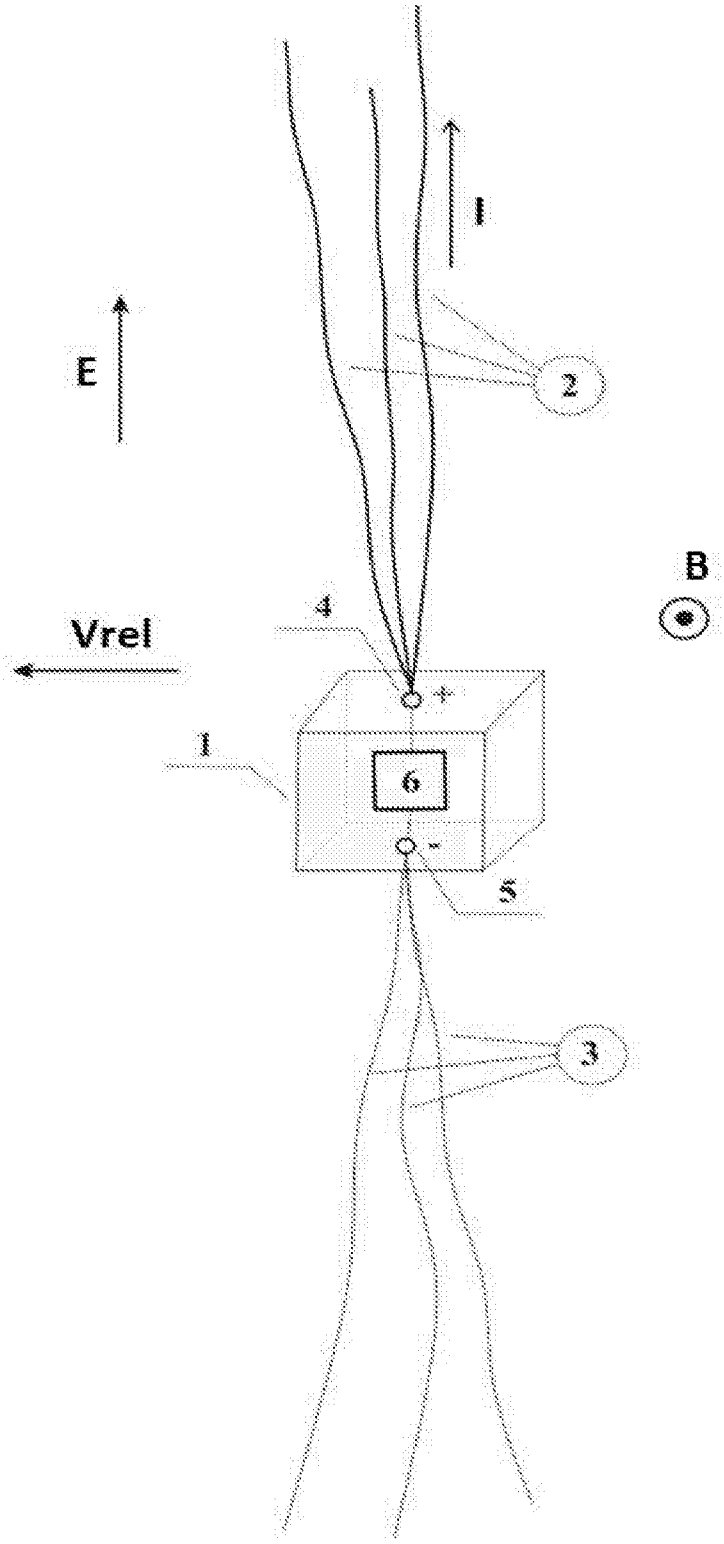

FIG. 1

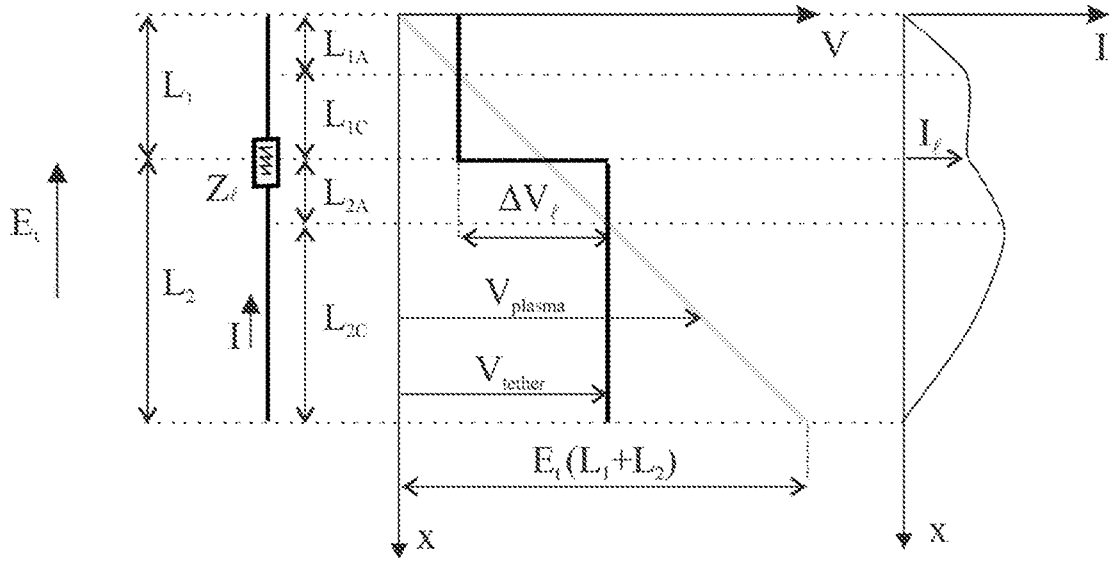
L1
L1A
L1C
L2A
L2
L2C
Zf
Ei
I
V
I
If
ΔVf
Vplasma
Vtether
Ei(L1+L2)
x
x

FIG. 2

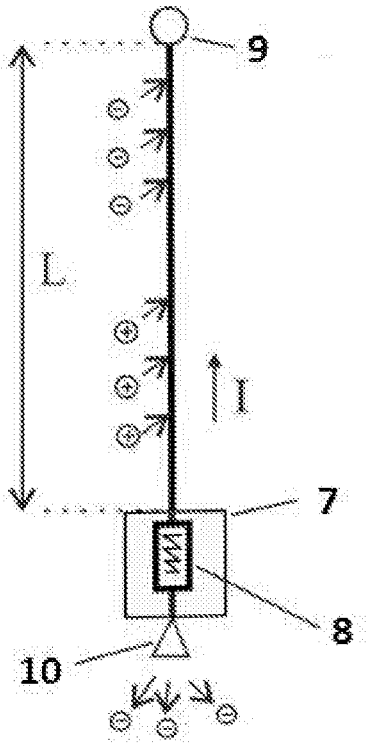
9
L
I
7
8
10

FIG. 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/ES2016/070801

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

See extra sheet

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)
B64G, H01B, H01M

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.
Y	John D. Williams et al. "Low Work Function Coating for an Entirely Propellantless Bare Electrodynamic Tether", lEEE Transactions on Plasma Science, Vol 40,No 5, May 2012, URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6179554	1-16
Y	US 6459232 B1 (LAI SHU T) 01/10/2002, Abstract from DataBase WPI. Retrieved from EPOQUE, figure 2.	1-16
A	US 6290186 B1 (HOYT ROBERT P ET AL.) 18/09/2001, Abstract from DataBase WPI. Retrieved of EPOQUE, figure 2.	1-16
A	DE 4234875 A1 (DEUTSCHE FORSCH LUFT RAUMFAHRT) 21/04/1994, Abstract from DataBase WPI. Retrieved from EPOQUE, figure 1.	1-16

☒ 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
03/03/2017	**(06/03/2017)**
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 R. Molinera de Diego Telephone No. 91 3498536

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/ES2016/070801

C (continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of documents, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 6755377 B1 (LEVIN EUGENE M ET AL.) 29/06/2004, Abstract from DataBase WPI. Retrieved of EPOQUE, figure 1.	1-16
A	US 6116544 A (FORWARD ROBERT L ET AL.) 12/09/2000, Abstract from DataBase WPI. Retrieved of EPOQUE, figure 3.	1-16

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.
PCT/ES2016/070801

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US6116544 A	12.09.2000	US6419191 B1	16.07.2002
US6755377 B1	29.06.2004	US6758443 B1	06.07.2004
DE4234875 A1	21.04.1994	US5419516 A	30.05.1995
US6290186 B1	18.09.2001	NONE	
US6459232 B1	01.10.2002	NONE	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ES2016/070801

CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B64G1/42 (2006.01)
B64G1/00 (2006.01)
B64G1/32 (2006.01)
H01B1/00 (2006.01)
H01M10/46 (2006.01)

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº
PCT/ES2016/070801

A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

Ver Hoja Adicional

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)
B64G, H01B, H01M

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
Y	John D. Williams et al. "Low Work Function Coating for an Entirely Propellantless Bare Electrodynamic Tether", lEEE Transactions on Plasma Science, Vol 40,No 5, May 2012, URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6179554	1-16
Y	US 6459232 B1 (LAI SHU T) 01/10/2002, Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE,figura 2.	1-16
A	US 6290186 B1 (HOYT ROBERT P ET AL.) 18/09/2001, Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE, figura 2.	1-16
A	DE 4234875 A1 (DEUTSCHE FORSCH LUFT RAUMFAHRT) 21/04/1994, Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE, figura 1.	1-16

☒ 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.
03/03/2017	**07 de marzo de 2017 (07/03/2017)**
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 R. Molinera de Diego Nº de teléfono 91 3498536

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº
PCT/ES2016/070801

C (Continuación). DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría *	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones nº
A	US 6755377 B1 (LEVIN EUGENE M ET AL.) 29/06/2004, Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE, figura 1.	1-16
A	US 6116544 A (FORWARD ROBERT L ET AL.) 12/09/2000, Resumen de la base de datos WPI. Recuperado de EPOQUE, figura 3.	1-16

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Informaciones relativas a los miembros de familias de patentes

Solicitud internacional nº

PCT/ES2016/070801

Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de Publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de Publicación
US6116544 A	12.09.2000	US6419191 B1	16.07.2002
US6755377 B1	29.06.2004	US6758443 B1	06.07.2004
DE4234875 A1	21.04.1994	US5419516 A	30.05.1995
US6290186 B1	18.09.2001	NINGUNO	
US6459232 B1	01.10.2002	NINGUNO	

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

PCT/ES2016/070801

CLASIFICACIONES DE INVENCIÓN

B64G1/42 (2006.01)
B64G1/00 (2006.01)
B64G1/32 (2006.01)
H01B1/00 (2006.01)
H01M10/46 (2006.01)