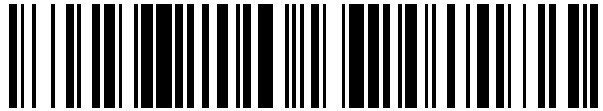


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 562 713**

21 Número de solicitud: 201531648

51 Int. Cl.:

**B64G 1/42** (2006.01)  
**B64G 1/00** (2006.01)  
**B64G 1/32** (2006.01)  
**H01B 1/00** (2006.01)  
**H01M 10/46** (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

13.11.2015

43 Fecha de publicación de la solicitud:

07.03.2016

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:

**BOMBARDELLI, Claudio y**  
**SÁNCHEZ ARRIAGA, Gonzalo**

54 Título: **Sistema de generación de potencia eléctrica en órbita por medio de cables conductores flotantes**

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 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.

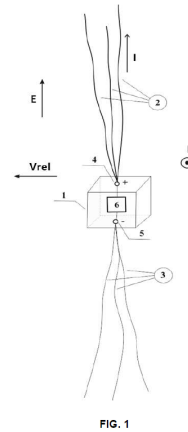


FIG. 1

ES 2 562 713 A1

**DESCRIPCIÓN**

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

5

**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.

15

**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.

25

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).

35

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 Alfvén 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 propulsion: 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].*

5 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  
10 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  
15 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  
20 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.

25 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  
30 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., Tíñao, 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  
35 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).

5 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, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol 40, 5, pp 1441-1445, 2012*]. El material termiónico más prometedor para esta aplicación es el C12A7:e<sup>-</sup> que muestra unas propiedades de emisión y estabilidad muy superiores a otros recubrimientos cerámicos, entre los que se incluyen el LaB<sub>6</sub>, CeB<sub>6</sub>, BaO-W, Ba-W, BaO y 12CaO-7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(C12A7:e<sup>-</sup>).

15

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.

35

**Breve descripción de la invención**

5 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  
10 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  
15 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<sub>2</sub>O-Cs, Ag-Cs<sub>3</sub>Sb, y Na<sub>2</sub>KSb.

La presente invención se refiere a un sistema de generación de potencia eléctrica para  
20 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).

25 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:

- 30 - 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  
35 de los cables.

- el posible empleo de materiales o tratamientos que proporcionen un alto cociente de absorción frente a emisividad térmica en los cables para que alcancen temperaturas más altas y aumente su emisividad electrónica.
- 5 - 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.
- 10 - el posible uso de múltiples cables, no necesariamente del mismo diseño, características geométricas o composición, conectados a un mismo polo.

### **Descripción de las figuras**

15 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.

20 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.

25 **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.

30 **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  
35 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  
 5 ahora utilizan un esquema similar.

**Descripción detallada de la invención**

El diseño y funcionamiento de la invención se puede entender fácilmente tomando  
 10 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  
 15 (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  $\mathbf{B}$  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  
 20 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  
 30 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  $Z_i$ .

Asumiendo que la proyección del campo eléctrico electromotor  $\mathbf{E}$  según la dirección  
 35 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  $\Delta V_{\text{plasma}} = E_t (L_1 + L_2)$ . Por otro lado, el potencial eléctrico propio de los cables  $V_{\text{tether}}$  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 ( $\Delta V_e$ ) debido a la presencia del dispositivo de almacenamiento o utilización de potencia eléctrica de impedancia ( $Z_e$ ) 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 ( $I_e$ ) que proporciona la potencia eléctrica  $P = \Delta V_e I_e$ .

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-meteoroides 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.

5

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.

10

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.

15

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:

20

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

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  $L_{1A} = V_0/E_t$ ,  $L_{2A} = -L_1 + (V_0 + \Delta V_\ell)/E_t$ ,  $L_{1C} = L_1 - L_{1A}$  y  $L_{2C} = L_2 - L_{2A}$ .

25

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

30

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):

$$5 \quad \frac{dI}{dx} = p_t \left[ e \int_0^{\infty} S(U)Y(U)dU + aT^2 \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) + \frac{eN_0}{\pi} \sqrt{\frac{2eV(x)}{m_i}} (1 + \gamma |V(x)|) \right] \quad (0.2)$$

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.

15 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 Transactions on Plasma Science, Vol 40, 5, pp 1441-1445, 2012*]. Este mecanismo involucra la constante de Richardson ( $a = 1.2 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>), la constante de Boltzmann ( $k_B$ ) y la temperatura ( $T$ ) y función de trabajo del cable ( $W$ ), respectivamente.

25 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.

30 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  $0 < x \leq L_{1A}$  y  $L_1 < x \leq L_1 + L_{2A}$ , 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]:

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

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  $w_{gen} = \frac{\Delta V_\ell I_\ell}{m_t}$ ,

15 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  $I_\ell$  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  $\delta$ , y  $\delta_\infty$ ,  $\delta_{min}$  el tamaño de micrometeoroides 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, Optimum 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:

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

donde  $S$  es la constante solar,  $\sigma_B$  la constante de Stefan-Boltzmann y  $\alpha_{abs}$  y  $\epsilon_{emis}$  la absorptividad 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)]

$$W \approx -k_B T_{eq} \ln \left( \frac{e N_0}{A \pi T_{eq}^2} \sqrt{\frac{E_t L}{m_e}} \right) \quad (1.5)$$

La selección del cociente  $\alpha_{abs}/\epsilon_{emis}$  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<sub>6</sub> y CeB<sub>6</sub> se encuentran alrededor de los 2,5 eV y para el material C12A7:e<sup>-</sup> 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<sub>24</sub>Al<sub>28</sub>O<sub>64</sub>]<sup>4+</sup>(4e<sup>-</sup>), 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  $\alpha_{abs}/\epsilon_{emis}$  alrededor de 1 y 130, respectivamente.

15

**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:  $\text{LaB}_6$ ,  $\text{CeB}_6$ ,  $\text{BaO-W}$ ,  $\text{Ba-W}$ ,  $\text{BaO}$ , y  $12\text{CaO-7Al}_2\text{O}_3(\text{C12A7:e}^-)$ .
- 5 **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  $\text{Ag-Cs}_2\text{O-Cs}$ ,  $\text{Ag-Cs}_3\text{Sb}$  y  $\text{Na}_2\text{KSb}$ .
- 10 **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.
- 15 **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:  $\text{LaB}_6$ ,  $\text{CeB}_6$ ,  $\text{BaO-W}$ ,  $\text{Ba-W}$ ,  $\text{BaO}$ , y  $12\text{CaO-7Al}_2\text{O}_3(\text{C12A7:e}^-)$ .
- 20 **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  $\text{Ag-Cs}_2\text{O-Cs}$ ,  $\text{Ag-Cs}_3\text{Sb}$ , y  $\text{Na}_2\text{KSb}$ .
- 25 **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.
- 30 **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.
- 35 **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.



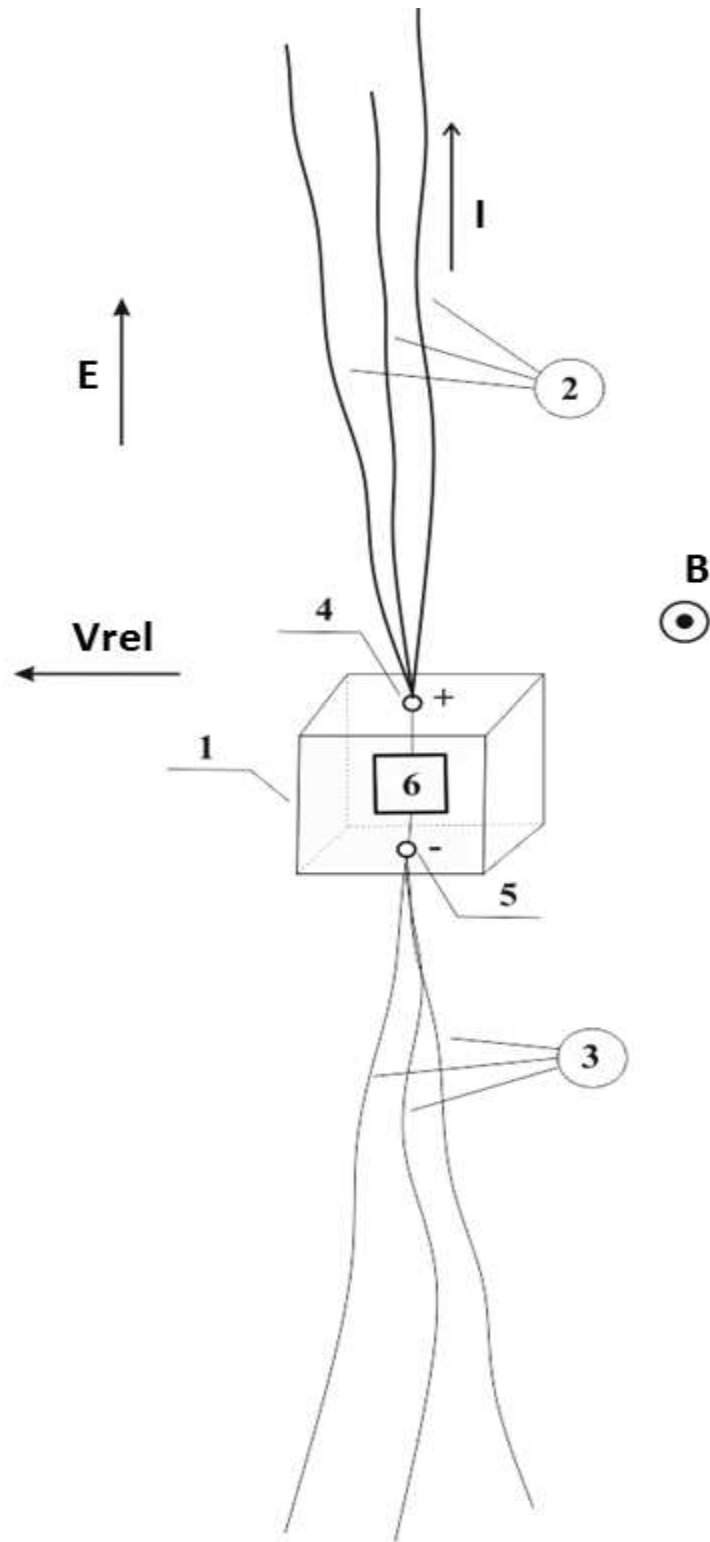


FIG. 1

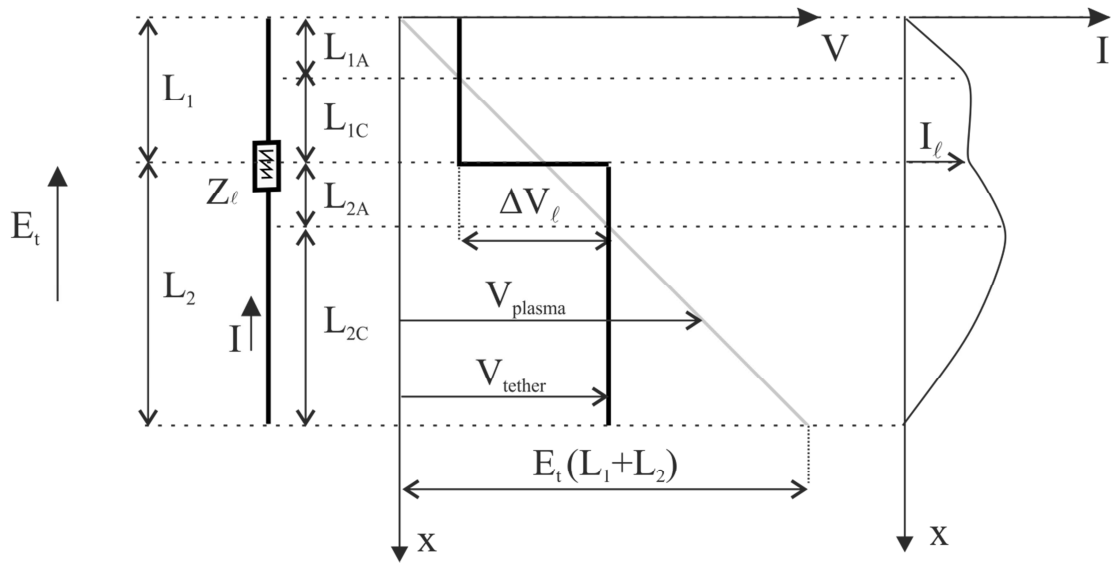


FIG. 2

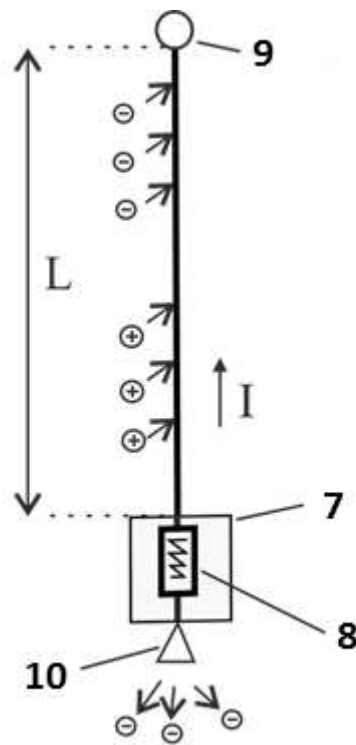


FIG. 3



- ②① N.º solicitud: 201531648  
②② Fecha de presentación de la solicitud: 13.11.2015  
③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: Ver Hoja Adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
Y	JOHN D. WILLIAMS et al. "Low Work Function Coating for an Entirely Propellantless Bare Electrodynamic Tether", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol 40, No 5, May 2012, URL: <a href="http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6179554">http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6179554</a>	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
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

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  
25.02.2016

Examinador  
R. Molinera de Diego

Página  
1/4

## CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

**B64G1/42** (2006.01)  
*B64G 1/00* (2006.01)  
*B64G 1/32* (2006.01)  
*H01B1/00* (2006.01)  
*H01M10/46* (2006.01)

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

B64G, H01B, H01M

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

INVENES, EPODOC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 25.02.2016

**Declaración**

<b>Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-16	<b>SI</b>
	Reivindicaciones	<b>NO</b>
<b>Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)</b>	Reivindicaciones	<b>SI</b>
	Reivindicaciones 1-16	<b>NO</b>

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 Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	JOHN D. WILLIAMS et al. "Low Work Function Coating for an Entirely Propellantless Bare Electrodynamic Tether", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol 40, No 5, May 2012, URL: <a href="http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6179554">http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6179554</a>	
D02	US 6459232 B1 (LAI SHU T)	01.10.2002
D03	US 6290186 B1 (HOYT ROBERT P et al.)	18.09.2001
D04	DE 4234875 A1 (DEUTSCHE FORSCH LUFT RAUMFAHRT)	21.04.1994
D05	US 6755377 B1 (LEVIN EUGENE M et al.)	29.06.2004
D06	US 6116544 A (FORWARD ROBERT L et al.)	12.09.2000

**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**

A continuación se comparan las reivindicaciones de la solicitud con los documentos D1 y D2.

**Primera reivindicación:**

El documento D1 muestra un sistema de generación de potencia eléctrica en órbita por medio de cables conductores flotantes que comprende cables conductores electrodinámicos desnudos (sin aislante eléctrico).

Por lo tanto la primera reivindicación de la solicitud que se analiza presenta las siguientes diferencias respecto al documento D1:

El documento D1 no especifica que esté formado el sistema por dos conjuntos de cables conectados respectivamente a cada uno de los dos polos de un sistema de almacenamiento de potencia eléctrica, y en donde cada conjunto está formado por al menos un cable conductor.

El efecto técnico de esta diferencia es acumular la energía generada por los cables.

Por lo tanto, el problema técnico que tendría que resolver un experto en la materia que partiera de D1 sería precisamente cómo hacer un sistema que permitiera acumular la energía generada por los cables.

Se considera que identificar este problema no entrañaría actividad inventiva y tampoco la solución aportada en la reivindicación primera entrañaría actividad inventiva. El documento D2 muestra justamente una batería conectada a dos materiales para acumular la energía.

Por esta razón, se considera que un experto en la materia que partiera de D1 en la fecha en la que la solicitud se presentó y quisiera almacenar la energía eléctrica desde los cables recurriría a la solución propuesta por D2; porque ambos documentos pertenecen al mismo sector de la técnica, sin que en dicha combinación evidente medie actividad inventiva.

Por lo tanto, el objeto de la reivindicación primera parece que no implica actividad inventiva, tal y como se define en el Artículo 8 de la Ley Española de Patentes, Ley 11/1986 del 20 de Marzo.

**Segunda reivindicación:**

El hecho de que cada conjunto de cables conductores esté formado por dos conductores y que tenga sus conductores conectados eléctricamente entre sí a lo largo de su extensión en uno o más puntos, es una característica que se divulga en este Estado de la Técnica en varios documentos, véase por ejemplo el documento US6290186 que justamente divulga la formación de un tether con múltiples cables conductores.

Por tanto, la segunda reivindicación también parece que no implica actividad inventiva.

**Tercera y cuarta reivindicaciones:**

En los documentos citados se divulga una masa de extremidad conectada en el extremo opuesto al polo de conexión con el sistema de almacenamiento de potencia eléctrica.

Por lo tanto, las reivindicaciones tercera y cuarta parece que no implican actividad inventiva.

**Reivindicaciones quinta, sexta, y séptima:**

Estas características son simples opciones de diseño conocidas en el Estado del Arte de la presente solicitud.

Por tanto, las reivindicaciones quinta, sexta, y séptima no parece que impliquen actividad inventiva.

**Reivindicaciones octava hasta la décimo sexta:**

La invención descrita en estas reivindicaciones no aporta diferencias significativas respecto de la técnica descrita en los documentos citados. Los detalles contenidos en estas reivindicaciones o bien se encuentran de manera explícita en los documentos citados o bien se encuentran de manera implícita en dichos documentos, o serían evidentes para un experto en la materia que partiera de D1 y D2 en la fecha en la que se presentó la solicitud.

Po otro lado, la reivindicación décimo-sexta está caracterizada justamente por el objetivo que desea alcanzar.

Por tanto, no parece que estas reivindicaciones impliquen actividad inventiva.