

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 609 772**

51 Int. Cl.:

**F03D 13/20** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.03.2012 PCT/IB2012/051378**

87 Fecha y número de publicación internacional: **27.09.2012 WO2012127444**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.03.2012 E 12720580 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.12.2016 EP 2689130**

54 Título: **Sistema para la conversión de energía eólica en energía eléctrica a través del vuelo de perfiles de ala de potencia amarrados a tierra mediante cables de longitud fija, sin fases pasivas y con adaptación automática a las condiciones de viento**

30 Prioridad:  
**23.03.2011 IT TO20110251**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**24.04.2017**

73 Titular/es:  
**KITENERGY S.R.L. (100.0%)  
Via Francesco Demargherita, 4  
10137 Torino (TO), IT**

72 Inventor/es:  
**FAGIANO, LORENZO y  
MILANESE, MARIO**

74 Agente/Representante:  
**SÁEZ MAESO, Ana**

ES 2 609 772 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Sistema para la conversión de energía eólica en energía eléctrica a través del vuelo de perfiles de ala de potencia amarrados a tierra mediante cables de longitud fija, sin fases pasivas y con adaptación automática a las condiciones de viento

## 5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un método y a un sistema para convertir energía eólica en energía eléctrica que aprovecha el movimiento alternativo, a lo largo de una trayectoria dada, de una unidad dispuesta en tierra y obtenido mediante un perfil de ala de potencia. Dicho perfil de ala está amarrado a la unidad de tierra por al menos un cable y es controlado automáticamente por un sistema de control provisto a propósito. El cable o cables que conecta/conectan la unidad de tierra al perfil de ala tiene/tienen una longitud fija durante el funcionamiento normal del sistema. El sistema de conversión es capaz de adaptarse automáticamente, cambiando, de forma adecuada, la trayectoria de la unidad de tierra, en función de las variaciones de dirección del viento para optimizar la producción de energía. La trayectoria de la unidad de tierra se presenta en dos formas posibles, a saber, un segmento de una línea recta o bien el arco de una circunferencia, pero pueden ser, en general, de diversas formas.

15 La presente invención contempla además una estrategia de regulación óptima, en base a la intensidad del viento, en función de la altitud desde el nivel de la tierra, de la longitud de los cables para dicho sistema de conversión de energía eólica en energía eléctrica o mecánica.

La presente invención se refiere además a un método y a un sistema para aplicar el sistema de conversión antes mencionado y las innovaciones previas en el contexto marino, en particular para aprovechar el viento en alta mar.

20 La presente invención se refiere igualmente a una estrategia de control automático del vuelo de un perfil de ala de potencia para dicho sistema de conversión de energía eólica en energía eléctrica, capaz de tener en cuenta las condiciones del viento, con el fin de maximizar la producción de energía, evitando al mismo tiempo condiciones de funcionamiento potencialmente dañinas o peligrosas para la integridad del sistema.

25 Finalmente, la presente invención se refiere a un método y a un sistema para la recuperación y gestión de la energía durante las fases de inversión del movimiento de dicho sistema, para convertir energía eólica en energía eléctrica, es decir, cuando la unidad generadora de tierra llega al final de la trayectoria preestablecida y comienza a moverse a lo largo de la misma trayectoria en una dirección opuesta.

## Estado de la técnica anterior

30 Conocidos en el estado de la técnica, a partir de algunos documentos que aparecen en revistas tanto de carácter científico como a nivel popular y de algunas patentes anteriores, existen métodos de conversión de energía eólica mediante dispositivos capaces de convertir la energía mecánica generada por la fuente de viento en alguna otra forma de energía, normalmente energía eléctrica, que aprovecha la energía del viento usando perfiles de ala de potencia (generalmente denominados "cometas") conectados a la misma por medio de cables. Por ejemplo, las patentes estadounidenses US 3,987,987, US 4,076,190, US 4,251,040, US 6,254,034 B1, US 6,914,345 B2, US 6,523,781 B2, US 7,656,053 y la patente internacional WO/2009/035492 describen sistemas para convertir la energía cinética de las corrientes de viento en energía eléctrica mediante el control del vuelo de los perfiles de ala de potencia conectados a tierra a través de uno o más cables. En muchos de estos sistemas, al menos un perfil de ala está conectado por cables a una unidad de manejo y de generación de energía, fijada a tierra, y es guiado cíclicamente a través de una fase de tracción, en la cual sube empujado por el viento y durante la cual el desenrollado de los cables establece el giro de un generador de la unidad de tierra, diseñado para generar energía eléctrica, y una fase de recuperación, en la cual el perfil se recupera mediante el reenrollado de los cables y luego se maneja para iniciar otra fase de tracción. Dichas soluciones presentan la ventaja de tener una estructura de tierra que tiene un coste contenido y es relativamente simple de construir. Sin embargo, existe la considerable desventaja de un movimiento continuo de enrollado y desenrollado de los cables, a una velocidad que puede ser alta y con fuerzas de tracción considerables. De ello se deduce que pueden surgir problemas considerables de desgaste de los cables con los consiguientes costes elevados para sus reemplazos frecuentes y la inactividad del generador durante dichas operaciones de sustitución.

Además se conocen soluciones tales como, por ejemplo, la descrita en la patente europea EP 1 672 214 B1, donde la unidad de tierra está constituida por un carrusel circular, dispuesto en rotación mediante una serie de perfiles de ala de potencia, y la energía es generada por el movimiento giratorio del carrusel. Dicha solución puede obtenerse también a través de una serie de unidades de tierra que se mueven de manera coordinada a lo largo de un carril circular, tal y como se describe, por ejemplo, en el documento de M. Canale, L. Fagiano y M. Milanese, "Generación de Energía Eólica Utilizando Cometas de Potencia Controlada", que aparece en IEEE Transacciones en Tecnología de Sistemas de Control No. 18, pp. 279 a 293, 2010. Dicha solución de carrusel puede funcionar tanto con longitud variable de los cables como con longitud fija de los cables. La solución de carrusel con longitud de cable variable permite obtener también energía a partir del movimiento de desenrollado de los cables, además de la obtenida a

partir del movimiento giratorio del carrusel, pero presenta las desventajas de desgaste de los cables, mencionadas anteriormente para configuraciones fijas sobre el terreno y de mayor coste y considerable complejidad constructiva. La solución de carrusel con longitud de cable fija presenta la ventaja de limitar el desgaste de los cables; Sin embargo, es capaz de generar sólo una cantidad limitada de energía debido a la llamada "fase pasiva", que es necesaria para trazar los perfiles de ala en una dirección opuesta al viento para un ángulo de rotación de aproximadamente 70°.

Las consideraciones resumidas anteriormente están respaldadas por los estudios teóricos y por los análisis numéricos presentes en el trabajo de M. Milanese, L. Fagiano y D. Piga, "El control como tecnología clave para una innovación radical en la generación de energía eólica", presentado en la Conferencia Americana de Control 2010, Baltimore, MD, y publicada en los métodos correspondientes, donde emergen claramente las desventajas y ventajas de todas las soluciones mencionadas anteriormente de sistemas generadores basados en el vuelo de perfiles de ala de potencia, con la unidad generadora dispuesta sobre el terreno.

#### Resumen de la invención

El objeto de la presente invención es resolver todos los problemas mencionados anteriormente presentes en las configuraciones actuales proporcionando un método y un sistema para convertir energía eólica en energía eléctrica a través del vuelo de perfiles de ala de potencia amarrados a tierra, en los que la energía es generada por el movimiento alterno de la unidad de tierra a lo largo de una trayectoria dada. Dicho sistema genera energía al funcionar con cables de longitud fija, evitando así problemas de desgaste de los cables. Además, aparte de los transitorios de despegue y aterrizaje de los perfiles de ala, por razones de mantenimiento o por ausencia del viento, no presenta fases pasivas, gracias a una adecuada elección del recorrido de la unidad de tierra, permitiendo así como una mayor producción de energía en comparación con las soluciones actuales, dadas las mismas características del perfil del ala de potencia. Se conoce en el estado de la técnica anterior un sistema denominado "Buggy" que aparece en la revista Drachen Foundation Journal, No. 16, otoño de 2004, y atribuido a Joe Hadzicki. El sistema "Buggy" permite el funcionamiento con longitud de cable constante y no presenta fases pasivas; Sin embargo, está limitado en la medida en que opera en condiciones óptimas sólo para valores bien determinados de dirección del viento, mientras que, a medida que dichas condiciones varían, la energía producida es menor. La presente invención permite superar estos límites en la medida en que es capaz de adaptarse a las variaciones de dirección del viento. Finalmente, la presente invención prevé la posibilidad de aplicación al contexto de alta mar, cuya gran ventaja frente a las tecnologías de alta mar actuales, además de permitir la captura de la energía eólica de alta altitud, es la de no requerir cimientos anclajes al lecho marino. Todo esto permite, en comparación con las soluciones actuales basadas en torres de viento tradicionales, una considerable reducción en los costes de generación en alta mar de energía eólica y un considerable aumento en el número de sitios de instalación.

Los propósitos anteriores y adicionales y las ventajas de la invención, como se apreciará a continuación de la descripción, se consiguen con un método para convertir energía eólica en energía eléctrica, que se basa en el vuelo de perfiles de ala amarrados con cables de, predominantemente, longitud fijada y que se adapta a la dirección del viento, según se define en la reivindicación 1 y en las reivindicaciones subordinadas a la misma.

#### Breve descripción de los dibujos

La presente invención se describirá con mayor detalle a través de algunos modos de realización preferidos de la misma, que se proporcionan a modo de ejemplo no limitativo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

La figura 1 es una representación esquemática del sistema "Buggy" tal como se presenta en la revista Drachen Foundation Journal, No. 16, y la correspondiente potencia media generada a medida que la dirección del viento varía;

La figura 2 es una representación esquemática de un primer modo de realización del sistema propuesto por la presente invención;

La figura 3 es una representación esquemática de un segundo modo realización del sistema propuesto por la presente invención;

La figura 4 es una representación esquemática de un tercer modo realización del sistema propuesto por la presente invención;

La figura 5 es una representación esquemática de un modo de realización en alta mar para el sistema propuesto por la presente invención;

La figura 6 es una representación esquemática de una estrategia de control para el sistema propuesto por la presente invención, con recuperación y reutilización de la energía en las fases de inversión de movimiento.

#### Descripción detallada de la invención

Con referencia inicial a la figura 1, puede observarse que en el sistema del tipo "Buggy" la unidad 1 de tierra se mueve de manera alterna a lo largo de una trayectoria 2 en forma de segmento de una línea recta, tirada, a través de los cables 3, mediante un perfil 4 de ala de potencia. La unidad 1 de tierra es capaz de manejar el perfil 4 de ala de potencia a través de soluciones que forman parte del estado de la técnica anterior, por ejemplo de acuerdo con la solicitud de patente No. T02010A000258 o posiblemente de acuerdo con otras ideas inventivas futuras y soluciones constructivas. La energía se genera a través de un sistema 5 de transmisión mecánica de tipo cadena o correa que convierte el movimiento de traslación de la unidad de tierra en un movimiento de rotación de los generadores 6 eléctricos. Tal y como se desprende de los análisis presentes en diversas publicaciones, tal como la tesis de graduación de D. Piga, "Analisi delle prestazioni del sistema kitegen: eólico di alta quota" ("Análisis del rendimiento del sistema Kitegen: energía eólica de alta altitud") Politécnico de Turín, 2008, y la tesis doctoral de L. Fagiano, "Control de perfiles aerodinámicos amarrados para la generación de energía eólica de alta altitud" politécnico de Turín, 2009, la potencia media generada por el sistema Buggy, para características fijas del perfil del ala y de la intensidad del viento, varía con el ángulo  $\theta$  entre la dirección 7 del viento  $W$ , mostrada a modo de ejemplo en la figura 1 en dos condiciones posibles, con  $\theta=0^\circ$  y con  $\theta=90^\circ$ , y la dirección 8 de la trayectoria de la unidad de tierra. La gráfica de dicha variación, en valor porcentual con respecto al valor máximo alcanzable para las características asignadas del perfil de ala y de las condiciones de viento, se representa en la gráfica de la figura 1. Obsérvese que la máxima producción de energía se obtiene cuando la dirección del viento es perpendicular a la dirección de la unidad de tierra. El sistema introducido con la presente invención es capaz de modificar la trayectoria de la unidad de tierra para mantener siempre una inclinación óptima con respecto a la dirección del viento.

Con referencia ahora a la figura 2, puede observarse que un primer modo de realización del sistema propuesto por la presente invención está constituido por una unidad 9 de tierra, capaz de controlar y manejar un perfil 10 de ala de potencia conectado a la misma a través de uno o más cables 11. La unidad de tierra está obligada a moverse a lo largo de un sistema de carriles 12 rectilíneos y sigue continuamente en direcciones alternas la longitud de dichos carriles, atraídos por las fuerzas de tracción ejercidas por el perfil 10 de ala sobre los cables 11. La energía se genera con la técnica anteriormente ilustrada en la figura 1 o con uno o más sistemas 13 aplicados a la unidad 9 de tierra, constituidos cada uno por una rueda conectada, a través de un sistema de transmisión, a un generador eléctrico. Además, la energía también se puede generar construyendo de manera apropiada la unidad de tierra y el sistema de raíles para formar un generador/motor lineal. La electricidad generada es gestionada y transmitida adecuadamente a través de los cables 14 a una estructura fija, diseñada para su introducción en la red eléctrica y posiblemente para su acumulación con dispositivos proporcionados a propósito conocidos en el estado de la técnica, tales como sistemas inerciales o de hidrógeno. La construcción de la unidad 9 de tierra, del sistema de raíles 12 y de los sistemas 13 es tal que garantiza la rodadura de las ruedas de los sistemas 13 en todas las condiciones de viento y condiciones de movimiento de la unidad 9 de tierra para evitar cualquier deslizamiento y consecuentes pérdidas de eficiencia por rozamiento. Además, el sistema de carriles 12 es capaz de equilibrar las fuerzas ejercidas por los cables 11 sobre la unidad 9 de tierra, excepto por la fuerza en la dirección de movimiento, que está equilibrada por la fuerza opuesta aplicada por los sistemas 13 generadores y que representan la fuerza útil para la generación de energía eléctrica. Los sistemas 13 son controlados, de forma apropiada, automáticamente y coordinados con el sistema para el control del perfil 10 de ala realizado por la unidad 9 de tierra para regular la velocidad de la unidad de tierra de una manera óptima, para maximizar la potencia media generada durante el movimiento. Los sistemas 13 son además capaces de actuar también como motores en las fases de inversión del movimiento de la unidad de tierra, con el fin de contener tanto como sea posible el tiempo requerido para dichas fases. En particular, se implementa una estrategia de recuperación de energía durante el frenado de la unidad 9 de tierra y de uso subsiguiente de la energía recuperada para acelerar la unidad 9 en la trayectoria subsiguiente en la dirección opuesta. Dicha estrategia se describe más detalladamente a continuación con referencia a la figura 6. La estrategia de recuperación de energía puede obtenerse también en el caso, descrito anteriormente, en el que la unidad de tierra y el sistema de raíles constituyen un generador/motor lineal. El sistema de carriles 12 está además equipado con dos o más sistemas 15 de suspensión y de movimiento, que están constituidos por una estructura mecánica apropiada capaz de soportar y limitar el sistema de carriles 12, opuesto a las fuerzas ejercidas por la unidad 9 de tierra durante su movimiento y limitan además las vibraciones consiguientes y están provistas de ruedas 16 conectadas a motores apropiados controlados automáticamente y coordinados para orientar el sistema de carriles 12 de tal manera que la dirección 17 del movimiento de la unidad 9 de tierra es siempre perpendicular a la dirección 18 del viento  $W$ , es decir, el ángulo  $\theta$  es igual a  $90^\circ$ , tal y como se muestra en la figura 2, obteniendo así siempre la máxima producción media de energía, según el diagrama cualitativo que aparece en la figura 1. La dirección 18 del viento  $W$  se mide en tiempo real a diversas altitudes en un rango desde el nivel 0 (tierra) hasta una altitud suficiente para incluir todas las condiciones de movimiento del perfil del ala, por ejemplo a 1000 m de la tierra; dicha medición se realiza, por ejemplo, con sistemas de tipo lidar o sodar que permiten medir la dirección y la intensidad del viento, información que es necesaria también para el control del perfil 10 de ala según lo ya divulgado en la literatura científica, por ejemplo, en el artículo de M. Canale, L. Fagiano, 35 y M. Milanese, "Generación de energía eólica de alta altitud utilizando cometas de potencia controlada", que aparece en IEEE Transacciones en Tecnología de Sistemas de Control, No. 18, pp. 279 a 293, 2010. La rotación del sistema de carriles 12 es con respecto al eje vertical 19, identificado por la intersección del plano de simetría del sistema 12 perpendicular a la dirección de los carriles con el plano de simetría del sistema 12 paralelo a la dirección de los carriles, definiendo así un área de terreno potencialmente ocupada por el sistema generador, que tiene una forma totalmente circular con un diámetro igual a  $L$ , donde  $L$  es la longitud del sistema de raíles 12. Dicha longitud es dimensionada en base a las características del viento y de la morfología del terreno en el sitio preseleccionado para la instalación del sistema

generador, para maximizar la potencia generada por la unidad de superficie potencialmente ocupada, posiblemente también teniendo en cuenta la presencia de otros sistemas de generación adyacentes similares que constituyen un llamado "parque eólico". La potencia generada por el sistema propuesto por la invención, tal y como se acaba de describir con referencia a la figura 2, es independiente de la dirección 18 del viento W, gracias a la adaptación automática de la orientación del sistema de carriles 12 a medida que dicha dirección varía, considerando que varía a medida que varían las características de intensidad del viento en relación con la longitud de los cables 11. En particular, para una configuración dada del sistema, en términos de diámetro de los cables y características inerciales, geométricas y aerodinámicas del perfil de ala y para una característica dada de aumento de la velocidad del viento con la altitud desde la tierra, la potencia máxima generada varía en función de la longitud de los cables de acuerdo con un gráfico cóncavo, con un máximo correspondiente a una longitud óptima de los cables. Dicho fenómeno se debe al equilibrio entre el efecto de fuerzas mayores sobre los cables debido a vientos más fuertes interceptados con cables más largos, con la consiguiente mayor generación de energía, y el efecto contrario de mayor resistencia aerodinámica de los cables a medida que aumenta su longitud, con la consecuente pérdida de eficiencia y por lo tanto una menor generación de energía. A efectos de la adaptación automática no sólo a la dirección del viento, sino también a sus características de intensidad y de variación de intensidad a medida que varía la altitud desde la tierra, el sistema propuesto por la presente invención está provisto de un sistema automático de regulación de la longitud de los cables, obtenida de acuerdo con las soluciones presentes en el estado de la técnica anterior, tal y como la descrita en la solicitud de patente No. T02010A000258, que funciona según dos posibles estrategias. En una primera estrategia, las mediciones en tiempo real de la velocidad del viento en las diversas altitudes, obtenidas, como ya se ha dicho, a través de un sistema, por ejemplo, de tipo lidar o sodar, se acondicionan adecuadamente y se utilizan para calcular un modelo de aumento del viento a medida la altitud desde la tierra varía. Dicho modelo se utiliza entonces para calcular la curva de potencia correspondiente a medida que varía la longitud de los cables, de acuerdo con ecuaciones simplificadas tales como, por ejemplo, las publicadas en la tesis de doctorado por L. Fagiano, "Control de perfiles aerodinámicos anclados para generación de energía eólica de alta altitud", Politécnico de Turín, 2009, y la longitud óptima de los cables se establece y se regula para obtener el máximo de dicha curva. De acuerdo con una segunda estrategia, la longitud de los cables se regula de forma adaptable a intervalos de tiempo regulares, por ejemplo de una hora, aprovechando la concavidad de la característica de potencia en función de la longitud de los cables, es decir, variando la longitud de los cables hasta que la potencia eléctrica media medida alcanza el valor máximo.

La figura 3 muestra un segundo modo de realización posible del sistema generador propuesto por la presente invención. El principio de funcionamiento es similar al de la solución descrita anteriormente con referencia a la figura 2; sin embargo, en este segundo modo de realización, la unidad 20 de tierra está provista de un sistema 21 constituido por un bastidor mecánico y por una serie de ruedas conectadas a generadores eléctricos. El sistema 21 es capaz de equilibrar las fuerzas laterales y verticales ejercidas por los cables sobre la unidad de tierra y dirigir, a través de un sistema de dirección automática de las ruedas, el movimiento de la unidad de tierra para mantener una dirección 22 perpendicular a la dirección 23 del viento W, maximizando así la potencia generada. La longitud L de la trayectoria 24 seguida por la unidad de tierra define la ocupación máxima de la superficie sobre el terreno por el sistema, que también en este caso es igual a una circunferencia de diámetro L con su centro correspondiente al punto central de la trayectoria 24. El sistema está provisto de una estrategia de regulación óptima de la longitud de los cables como la descrita anteriormente. De una manera similar a la solución anterior, la energía generada es transferida a través de cables 25 a una estructura fija diseñada para su introducción en la red eléctrica o para su acumulación. La ventaja de esta segunda solución es una mayor simplicidad de construcción de la estructura, a expensas de una mayor complejidad de la unidad de tierra que debe ser capaz de contrarrestar las fuerzas laterales ejercidas por los cables 26 que conectan el perfil 27 de ala de potencia con la unidad 20 de tierra.

Con referencia ahora a la figura 4, un tercer modo de realización posible del sistema propuesto por la invención consiste en proporcionar un sistema 28 de carriles fijos, con una trayectoria circular de radio R, a lo largo de la cual puede moverse, arrastrado por el perfil 29 de ala a través de los cables 30, la unidad 31 de tierra, hecha de una manera similar a la unidad 9 de tierra de la primera solución mostrada en la figura 2, con las debidas modificaciones que hacen posible el movimiento a lo largo de una trayectoria circular. De manera similar a la primera solución descrita anteriormente con referencia a la figura 2, el sistema de raíles 28 es capaz de imitar la unidad de tierra y equilibrar las fuerzas que actúan en todas las direcciones excepto en la dirección tangencial a los propios raíles. La generación de energía se obtiene haciendo que la unidad de tierra describa una trayectoria 32 en forma de arco de circunferencia en direcciones alternas y de una manera continua. También en esta solución, como en la solución de la figura 2, la energía se puede generar posiblemente construyendo de manera apropiada la unidad de tierra y el sistema de raíles para formar un generador/motor lineal. La electricidad producida se gestiona y se transmite apropiadamente, por ejemplo, a través de los cables 33, a una estructura fija, diseñada para su introducción en la red eléctrica y posiblemente para acumulación, con dispositivos proporcionados a propósito conocidos en el estado de la técnica, tal y como ya se ha descrito anteriormente. La trayectoria 32 tiene una amplitud angular igual a  $2\Delta\theta$  y se modifica automáticamente, mediante una rotación con respecto al eje 34 vertical, de manera que sea siempre simétrica con respecto a la dirección 35 del viento W, tal y como se muestra en la figura 4. A medida que el ángulo  $\Delta\theta$  aumenta, la potencia media generada varía según se muestra en el diagrama de la figura 4. El radio R y la amplitud  $2\Delta\theta$  del trayecto se eligen de este modo para lograr el mejor compromiso entre la ocupación del terreno, definida por el circunferencia de radio 2R, la longitud lineal del trayecto de la unidad de tierra, igual a  $2\Delta\theta R$ , y la potencia media generada. También esta tercera solución es capaz de adaptar automáticamente la longitud de los

cables a las condiciones de intensidad del viento, tal y como se ha descrito anteriormente. La ventaja de esta tercera solución es la de presentar una mayor simplicidad de construcción de la estructura en comparación con la primera solución mostrada en la figura 2, dado que el sistema de raíles 28 está fijado a tierra y una mayor simplicidad de construcción de la estructura unidad de tierra en comparación con la segunda solución mostrada en la figura 3, gracias a la presencia de los raíles 28 que equilibran las fuerzas laterales ejercidas por los cables sobre la unidad 31 de tierra. Estas ventajas se obtienen a expensas de una potencia media inferior generada y de una cierta mayor variabilidad de la potencia generada durante la trayectoria de una forma curvada.

Con referencia a la figura 5, una aplicación en el contexto de alta mar del sistema propuesto por la presente invención está constituida por una embarcación 36, tirada por el perfil 37 de ala a través de los cables 38, con funciones similares a la unidad 20 de tierra de la segunda solución, mostrada en la figura 3. La energía se genera a través de turbinas 39 apropiadas situadas debajo del casco de la embarcación 36, que se oponen al movimiento de la embarcación misma. Un control automático proporcionado de forma voluntaria a las turbinas 39 y la presencia de elementos 40 estabilizadores, posiblemente hidrodinámicos y activos de acuerdo con soluciones conocidas por el estado de la técnica anterior, limitan el enrollado y la flexibilidad y garantizan la direccionalidad de la embarcación en su movimiento alternativo a lo largo de la trayectoria 41, cuya dirección 42 se regula automáticamente de manera que sea siempre perpendicular a la dirección 43 del viento W, maximizando así la generación de potencia. La energía eléctrica es gestionada y transmitida adecuadamente a través de cables 44 submarinos a una estructura fija, diseñada para su introducción en la red eléctrica y posiblemente para su acumulación, con dispositivos proporcionados a propósito conocidos en el estado de la técnica, tales como sistemas inerciales o de hidrógeno. La longitud L de la trayectoria 41 se elige para maximizar la potencia media por unidad de superficie de mar ocupada. La ocupación del espacio viene dada por una circunferencia de radio L centrada en el punto central de la trayectoria 41. También esta aplicación en el contexto de alta mar está provista de un sistema para la regulación automática de la longitud de los cables, tal y como se ha descrito anteriormente.

La figura 6 es una representación esquemática de una estrategia de control adecuada para todas las soluciones propuestas por la presente invención. En particular, apareciendo en la figura 6 están las salientes, en el plano perpendicular a la dirección del viento, de la unidad 45 de tierra y del perfil 46 de ala en diferentes posiciones a lo largo de la trayectoria, designados como posiciones 47, 48 y 49. Dicha posiciones se reproducen dos veces, de manera especular, en la medida en que se producen durante el movimiento de la unidad 45 de tierra en ambas direcciones a lo largo de su trayectoria. La estrategia de control está constituida por tres etapas identificadas por segmentos apropiados  $L_1$  y  $L_2$  en la figura 6, los cuales sumados vienen a formar la proyección de la trayectoria de la unidad 45 de tierra en el plano perpendicular a la dirección del viento. Sin que esto implique una pérdida de generalidad, la longitud de dicha proyección se designa por L en la figura 6: en el caso de la primera y segunda soluciones propuestas por la presente invención, mostradas en la figura 2 y en la figura 3, respectivamente, dicha longitud coincide con la longitud de la trayectoria de la unidad 45 de tierra, mientras que en el caso de la tercera solución mostrada en la figura 4, la longitud efectiva de la trayectoria de la unidad 45 de tierra será mayor que L y, precisamente, igual a  $L\Delta\theta/\sin(\Delta\theta)$ . Como se desprende de la figura 6, la longitud L puede desglosarse como  $L=L_1+2L_2$ , y la longitud  $L_1$  es típicamente mucho mayor que la longitud  $L_2$ . La primera etapa de la estrategia de control se denomina "etapa de aceleración" y está comprendida entre el momento en que la unidad 45 de tierra comienza desde un estado estacionario en uno de los dos extremos de la trayectoria L (posición designada por 47 en la figura 6) y acelera en la dirección del otro extremo, y el momento en el que la unidad 45 de tierra ha alcanzado un cierto valor v de velocidad, denominada "velocidad en estado estacionario" (posición designada por 48 en la figura 6). Al comienzo de la etapa de aceleración, el perfil 46 de ala se maneja de manera que esté muy inclinado en la dirección de la aceleración para suministrar una fuerza de tracción considerable en presencia de una baja velocidad de la unidad 45 de tierra. Durante la etapa de aceleración, dicha inclinación del perfil 46 de ala disminuye gradualmente mientras que la unidad 45 de tierra aumenta su propia velocidad para mantener una alta velocidad efectiva del viento en el perfil 46 de ala de potencia. Los motores/generadores fijados en la unidad 45 de tierra son controlados automáticamente de tal manera que se alcanzará la velocidad v después de cubrir una longitud  $L_2$  de la trayectoria, tal como se muestra en la figura 6, reutilizando también la energía recuperada en la "etapa de frenado" descrita a continuación. Después de la etapa de aceleración, comienza la "etapa de estado estacionario", durante el cual la unidad 45 de tierra es arrastrada por el perfil 46 de ala de potencia a una velocidad v constante, regulada mediante un control automático previsto de los generadores aplicados sobre la unidad 45 de tierra. Durante la etapa en estado estacionario, el perfil de ala se controla para describir desplazamientos rápidos hacia arriba y hacia abajo para maximizar la velocidad efectiva y, por consiguiente, la potencia generada. Después de cubrir la longitud  $L_1$ , la etapa de frenado comienza finalmente, con la unidad 45 de tierra puesta en la posición designada por 49 en la figura 6, donde los generadores aplicados sobre la unidad de tierra se utilizan junto con un sistema de frenado para detener el movimiento de unidad de tierra en el espacio  $L_2$ , recuperando tanta energía como sea posible. Simultáneamente, el perfil 46 de ala se controla de manera que se sitúa en una posición útil para la etapa de aceleración subsiguiente, es decir, con una inclinación considerable a lo largo de la trayectoria en una dirección opuesta al movimiento de la unidad de tierra durante la etapa de frenado. El sistema de control está además diseñado para contener el movimiento del perfil de ala entre una altura mínima H y una altura máxima  $H+\square H$  desde la tierra y para controlar el movimiento del perfil de ala con el fin de evitar que las fuerzas de tracción actúen sobre los cables de superar un valor crítico para la integridad del sistema. Los valores de L,  $L_1$ ,  $L_2$ , H y  $\square H$  se establecen para maximizar la potencia media generada, limitando al mismo tiempo la ocupación del espacio aéreo. Todas las

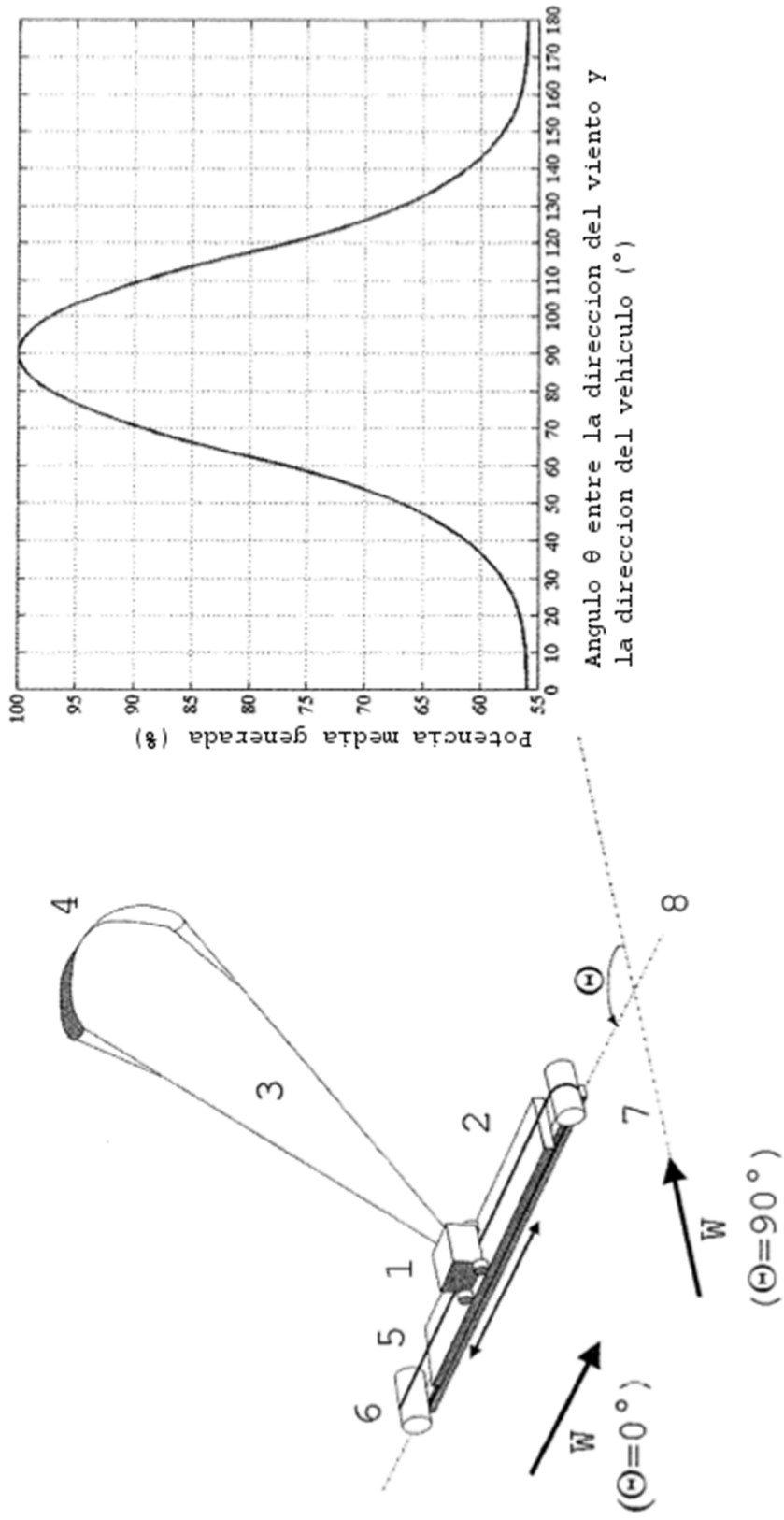
funciones descritas pueden obtenerse, por ejemplo, a través de algoritmos de control de tipo predictivo no lineal, seleccionando adecuadamente las restricciones y la función de coste, de una manera totalmente similar a la que se describe con respecto a sistemas de conversión diferentes de los propuestos por el presente invención, en el artículo de M. Canale, L. Fagiano y M. Milanese, "Generación de Energía Eólica Utilizando Cometas de Potencia Controlada", que aparece en IEEE Transacciones en Tecnología de Sistemas de Control No. 18, pp. 279 a 293, 2010.

En resumen, el sistema de acuerdo con la presente invención incluye medios para orientar la trayectoria de desplazamiento alternativo del perfil de ala de potencia en una dirección sustancialmente ortogonal a la dirección del viento. El sistema puede incluir además medios para medir la intensidad del viento y su gradiente en relación con la altura del perfil de ala de potencia con respecto a tierra, y medios para mantener, durante las fases de vuelo del perfil de ala de potencia, en condiciones de generación de energía, dicho al menos un cable a una longitud constante elegida en función de la intensidad y de los gradientes medidos. El sistema incluye además medios para medir la potencia suministrada por dichos medios generadores y medios para mantener, durante las fases de vuelo operativo del perfil de ala de potencia, dicho al menos un cable a una longitud constante elegida en función de la potencia medida. La trayectoria de desplazamiento alternado está definida por carriles de guía y dicha unidad de tierra está provista de miembros de rodadura acoplados a dichos carriles de guía. Los elementos de rodadura de la unidad de tierra están operativamente conectados a dichos medios generadores. Dichos carriles de guía pueden ser rectilíneos o, más convenientemente, curvados y pueden orientarse alrededor de un eje vertical que pasa por su centro. Los carriles de guía están provistos de elementos para rodar sobre la tierra que se pueden dirigir para definir dicha trayectoria de desplazamiento alternativo. Dichos miembros rodantes sobre la unidad de tierra están conectados operativamente a dichos medios generadores. Dichos carriles de guía pueden ser circulares y dicho trayecto de desplazamiento alternativo puede estar constituido por un sector angularmente variable de dichos carriles de guía circulares. Asociados de forma operativa a dichos miembros de rodadura ahí medios de frenado para la inversión del movimiento de la unidad de tierra con respecto a dicha trayectoria de desplazamiento alternativo, y medios para recuperar la energía de frenado para acelerar dicha unidad de tierra después de la inversión del movimiento. De forma conveniente, dicha trayectoria de desplazamiento alternado está definida por carriles de guía y dichos carriles y dicha unidad de tierra constituyen un generador/motor lineal capaz de generar energía. Dicho generador/motor lineal es capaz de convertir el movimiento de dicha unidad de tierra en energía eléctrica, así como de frenar dicha unidad de tierra y efectuar la recuperación de la energía de frenado para acelerar dicha unidad de tierra después de la inversión de movimiento. En un modo de realización alternativo, dicha unidad puede consistir en un cuerpo que flota sobre una superficie de líquido y dichos medios generadores del cuerpo que flota pueden incluir turbinas sumergidas que pueden ser accionadas para determinar la dirección de dicho desplazamiento alternativo.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Un método para convertir energía eólica en energía eléctrica o mecánica a través del vuelo de al menos un perfil de ala de potencia, amarrado a través de al menos un cable a una unidad de tierra, movido por dicho perfil de ala de potencia a lo largo de una trayectoria de desplazamiento alternativo para accionar medios generadores, entre el que dicha trayectoria de desplazamiento alternativo es orientable para fijarse en una dirección sustancialmente ortogonal a la dirección del viento, caracterizado porque dicha trayectoria de desplazamiento alternativo es curvada.
2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque durante las fases de vuelo del perfil de ala de potencia, en condiciones de generación de energía, la longitud de dicho al menos un cable se mantiene constante.
- 10 3. El método de acuerdo con la reivindicación 2, caracterizado porque el valor de la longitud constante de dicho al menos un cable se determina en base a la medida de la intensidad del viento y de su gradiente en relación con la altura de la potencia con un respecto a tierra.
4. Método de acuerdo con la reivindicación 2 o la reivindicación 3, caracterizado porque el valor de la longitud constante de dicho por lo menos un cable se determina de manera adaptativa en función de la potencia suministrada por dichos medios generadores.
- 15 5. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicha trayectoria de desplazamiento alternativo está orientada alrededor de un eje vertical que pasa a través de su centro.
6. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicha trayectoria curvada de desplazamiento es el arco de una circunferencia angularmente variable alrededor de un eje vertical que pasa a través de su centro de rotación.
- 20 7. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha trayectoria de desplazamiento alternativo está situada sobre la tierra, caracterizado porque su orientación con respecto a tierra se obtiene por medio de un contacto de rodadura.
8. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicha unidad de tierra es guiada a lo largo de dicha trayectoria de desplazamiento alternativo con un contacto no deslizante.
- 25 9. El método de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado porque dicho contacto se proporciona mediante elementos de rodadura aplicados a dicha unidad de tierra y conectados, de forma operativa, a dichos medios generadores.
10. El método de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado porque prevé la dirección controlada de dichos miembros de rodadura.
- 30 11. El método de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado porque dichos miembros de rodadura se someten a frenado para inversión de movimiento de la unidad de tierra con relación a dicha trayectoria de desplazamiento alternativo, y la energía de frenado se recupera para acelerar dicha unidad de tierra después de la inversión de movimiento.
- 35 12. El método de acuerdo con la reivindicación 5, caracterizado porque dicha trayectoria de desplazamiento alternativo está situada sobre una superficie líquida de flotación.
13. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado porque dicha trayectoria de desplazamiento alternativo constituye, junto con la unidad de tierra, un motor/generador lineal.
- 40 14. Un sistema para convertir energía eólica en energía eléctrica o mecánica a través del vuelo de al menos un perfil de ala de potencia atado a través de al menos un cable a una unidad de tierra movido por dicho perfil de ala de potencia a lo largo de una trayectoria de desplazamiento alternativo para accionar medios generadores, incluyendo medios para orientar dicha trayectoria de desplazamiento alternativo en una dirección sustancialmente ortogonal a la dirección del viento, caracterizado porque dicha trayectoria de desplazamiento alternativo es curvada.







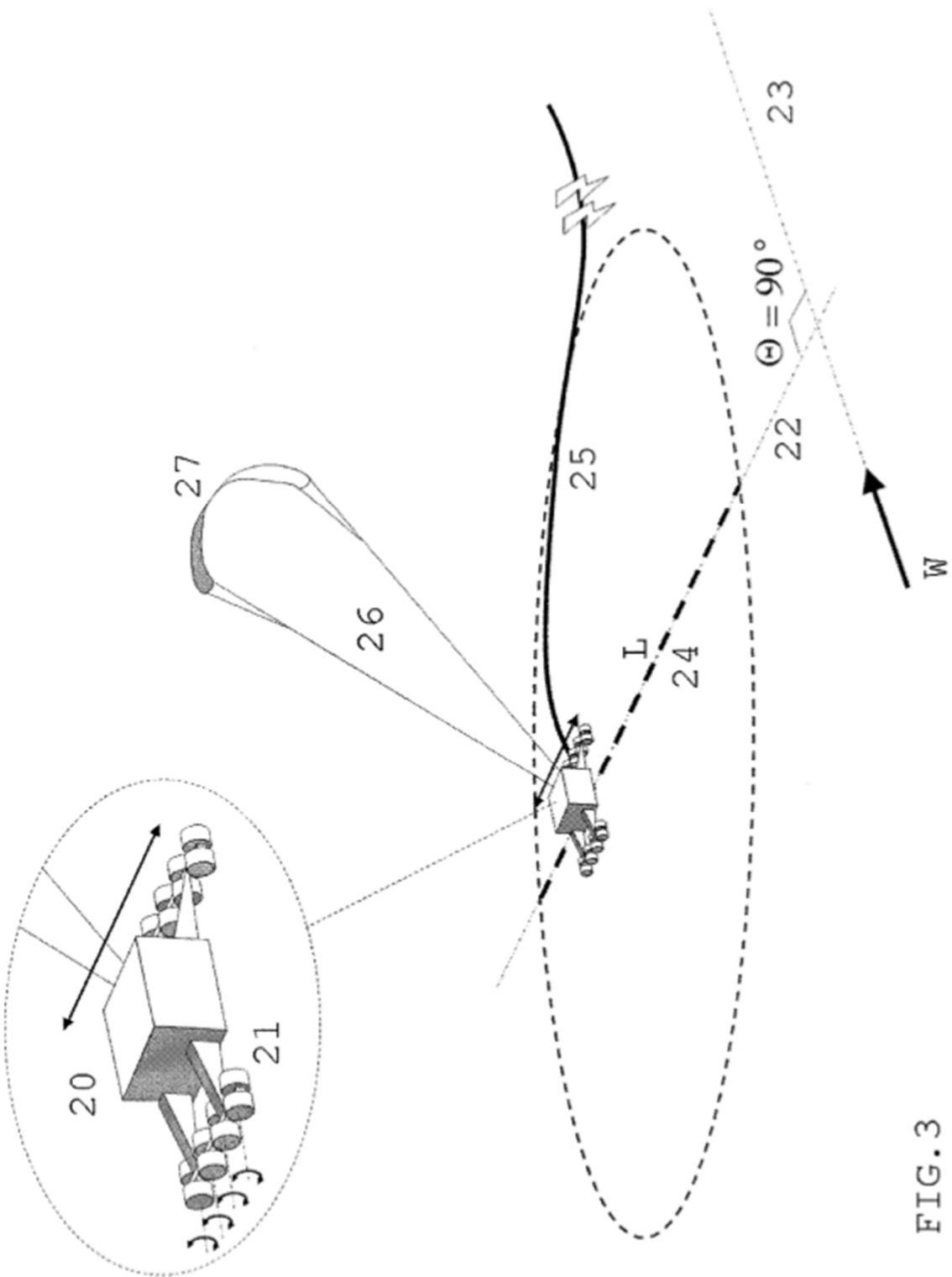


FIG. 3

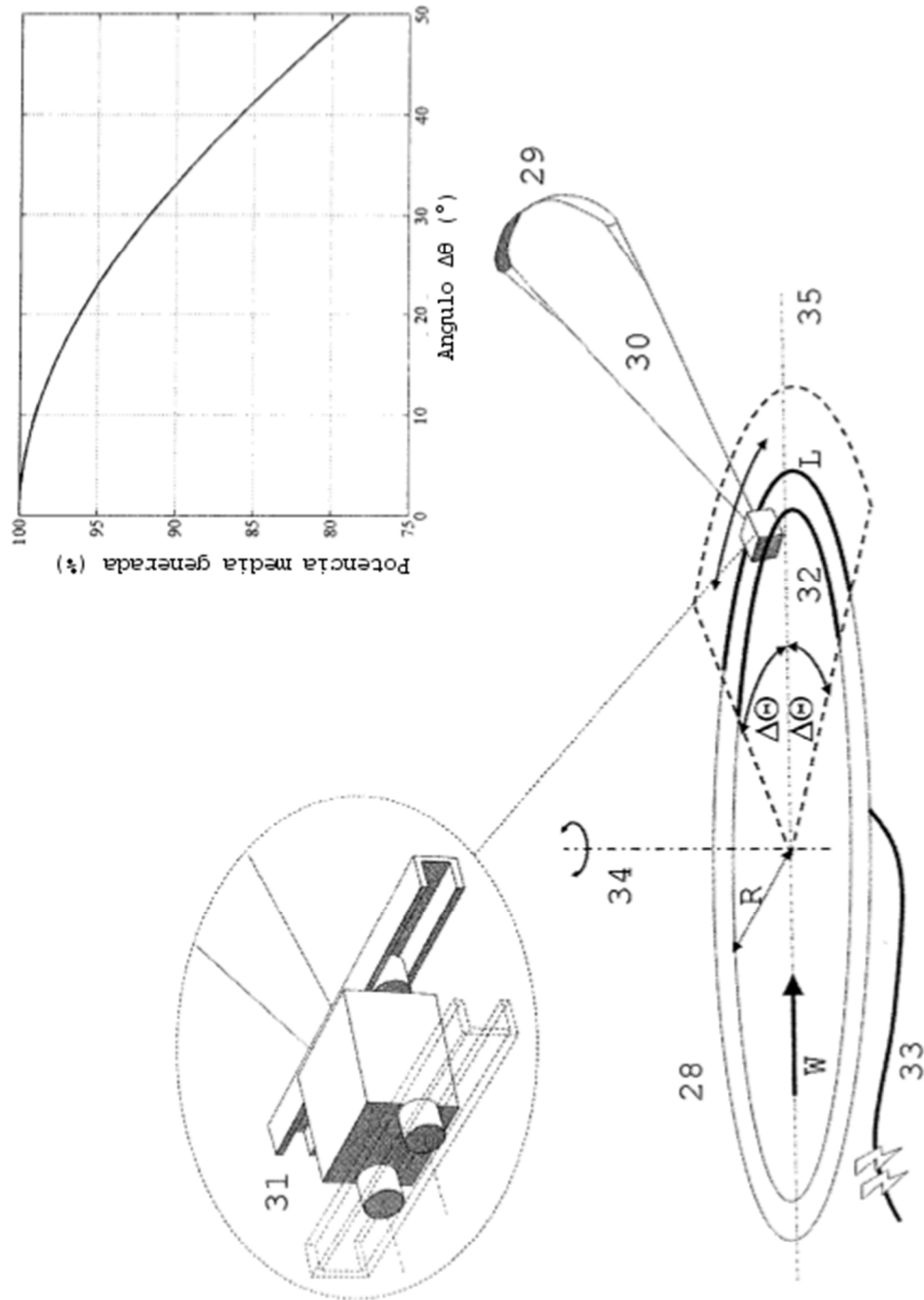


FIG. 4

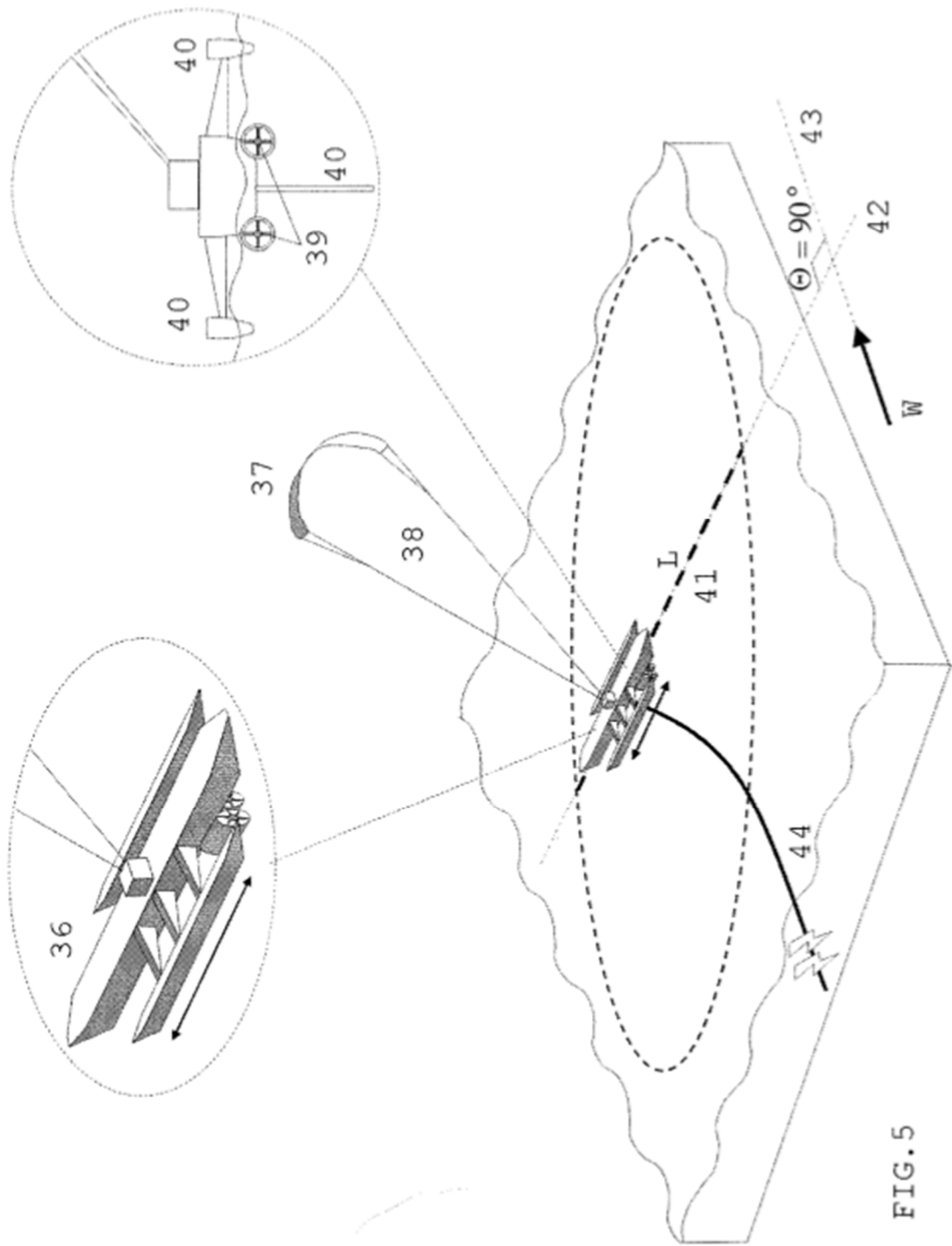


FIG. 5

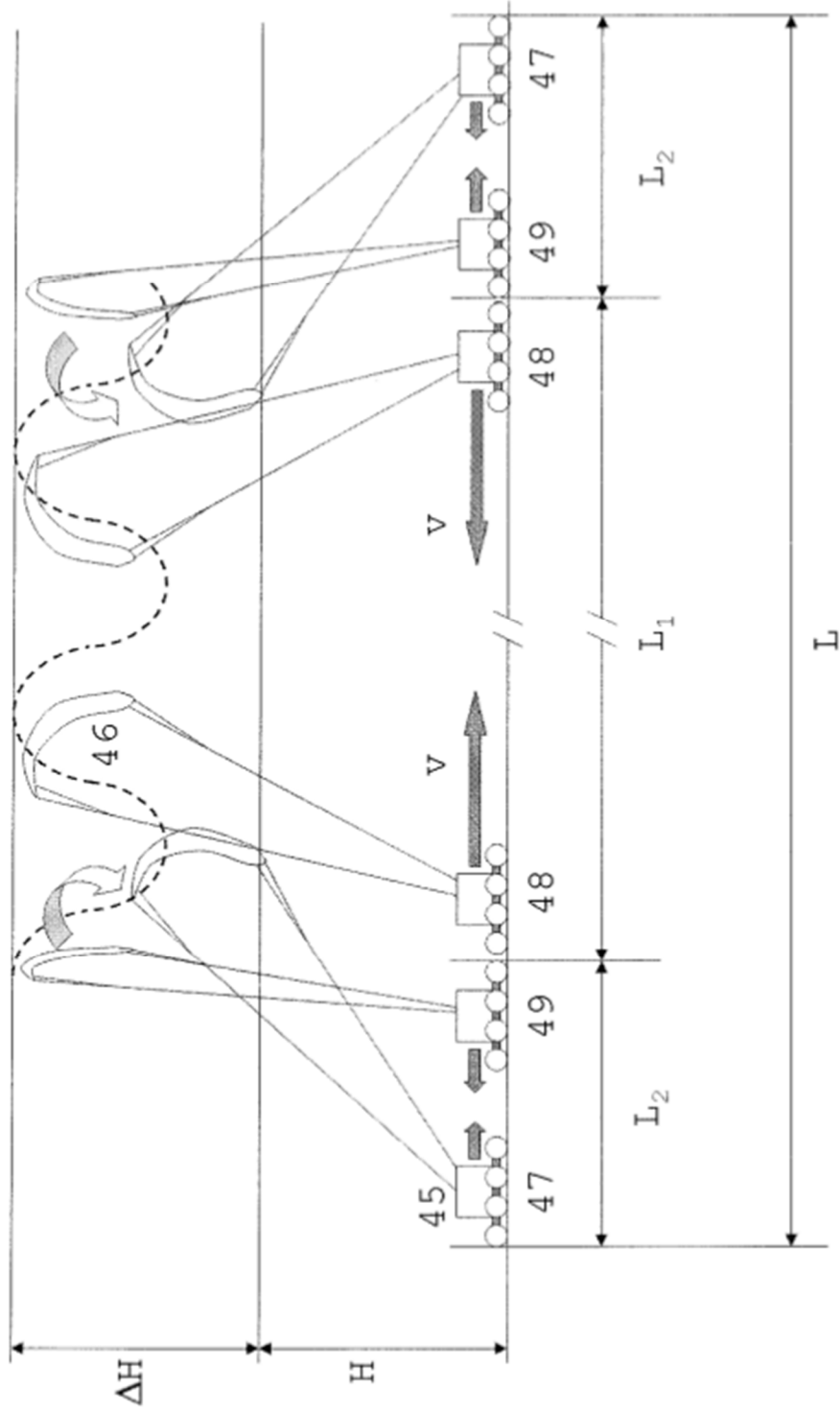


FIG. 6