

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 796 283**

51 Int. Cl.:

H02K 35/02 (2006.01)

F03D 5/06 (2006.01)

H02K 7/09 (2006.01)

H02N 15/00 (2006.01)

H01F 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **02.10.2015 PCT/EP2015/072802**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.04.2016 WO16055370**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.10.2015 E 15771650 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.05.2020 EP 3204635**

54 Título: **Generador de energía eléctrica y método de generación de energía eléctrica**

30 Prioridad:

06.10.2014 EP 14382381

28.05.2015 EP 15169713

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

26.11.2020

73 Titular/es:

VORTEX BLADELESS, S.L. (100.0%)

C/ Poniente 33

28223 Pozuelo de Alarcón (Madrid), ES

72 Inventor/es:

YAÑEZ VILLARREAL, DAVID JESÚS

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 796 283 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

Generador de energía eléctrica y método de generación de energía eléctrica

5 Campo técnico

La invención se engloba en el campo de las energías renovables, y más concretamente en el campo de la generación de energía eléctrica a partir del movimiento de un fluido, a partir de vórtices generados en el fluido.

10 Antecedentes de la invención

Debido a los problemas que presentan las energías no renovables, como las que se basan en la combustión de combustibles fósiles o la nuclear, se están haciendo grandes esfuerzos para desarrollar las llamadas energías renovables, entre las que se encuentran las que se basan en el aprovechamiento del movimiento de un fluido para impulsar un generador de energía eléctrica. Por ejemplo, existen los llamados aerogeneradores multipala que aprovechan el viento para hacer girar el rotor de un generador eléctrico. Ahora bien, estos aerogeneradores, que han tenido gran éxito a nivel mundial y que en muchos países producen una gran parte de la energía eléctrica que se consume, suelen tener un elevado número de componentes móviles, en contacto muchos de ellos con carácter rotativo, algo que implica, entre otras cosas, costes relativamente altos de mantenimiento por el consumo de lubricantes, desgaste de componentes, etc. En algunos casos también puede representar un problema la alta velocidad de las palas, que puede tener un impacto sobre la fauna avícola.

Como alternativa a los aerogeneradores multipala con generadores eléctricos rotativos, también se han propuesto generadores basados en el uso de elementos o materiales piezoeléctricos para convertir energía mecánica en eléctrica. Por ejemplo, el documento FR-2922607-A1 describe un generador de energía eléctrica en la que un tipo de mástil está apoyado sobre elementos piezoeléctricos, de manera que, al ser el mástil impulsado o movido por el viento, el movimiento del mástil se convierte en energía eléctrica a través de los elementos piezoeléctricos.

Por otra parte, el documento CN-201818437-U divulga un generador de energía eléctrica para alimentar sensores y sistemas con bajo consumo de potencia, y que se basa en un rotor con palas. El rotor está dotado de imanes que giran con el rotor y que interactúan con imanes acoplados a elementos piezoeléctricos, de manera que el giro del rotor se traduce en una fuerza sobre los elementos piezoeléctricos, de forma que el giro del rotor se convierta en energía eléctrica.

El documento JP-2006-158113-A describe otro mecanismo para convertir energía mecánica en eléctrica, usando un elemento piezoeléctrico asociado a un imán.

Por otra parte, el documento JP-2006-132397-A describe el aprovechamiento de los vórtices de Karman en agua para hacer vibrar una columna que está introducida en el agua, y que está acoplada a una placa piezoeléctrica. También los documentos JP-2006-226221-A y WO- 2012/017106-A1 se refieren a generadores eléctricos basados en los vórtices de Karman.

Por ejemplo, el documento WO-2012/017106-A1 describe un generador de energía eléctrica a partir del viento con un mástil conformado por una pluralidad de elementos con alto acoplamiento electromecánico, término que engloba elementos piezoeléctricos. El mástil tiene una sección y configuración que transforma de manera deliberada el flujo de aire estacionario y laminar en un flujo de carácter turbulento, y se pretende que los remolinos o vórtices aparezcan de manera sincronizada por toda la longitud del mástil. Por lo tanto, el mástil sufre dos fuerzas, a saber, una fuerza de arrastre en la misma dirección que el viento, y una fuerza de sustentación que se produce en dirección perpendicular a la dirección del viento y cuyo sentido varía de signo, con una frecuencia que se corresponde con la frecuencia de aparición de nuevos vórtices y que se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$F_v = S \cdot V / d,$$

siendo F_v la frecuencia de aparición de vórtices, V la velocidad del aire, y d la dimensión característica del mástil, por ejemplo, en el caso de un mástil con sección transversal circular, el diámetro del mástil. S es el número adimensional de Strouhal. Como la velocidad del aire aumenta con la altura, según la Ley exponencial de Hellmann, para conseguir una sincronización de la aparición de vórtices, el documento WO- 2012/017106-A1 propone que el diámetro del mástil aumente con la altura.

El documento WO-2012/017106-A1 no explica en detalle cómo el movimiento del mástil se convierte en energía eléctrica. Ahora bien, dado que se indica que el propio mástil está conformado por una pluralidad de elementos con alto acoplamiento electromecánico, se entiende que es el propio vaivén del mástil lo que deforma los elementos y con ello genera un diferencial de potencia entre las caras de los elementos afectados. Por otra parte, en el documento WO-2012/017106-A1 se propone modular de forma activa el módulo de Young aparente o módulo de elasticidad aparente del mástil, variando las tensiones eléctricas a las que están sometidos los elementos con alto

acoplamiento electromecánico.

El documento WO-2014/135551-A1, que se incorpora a la presente por referencia, divulga otros ejemplos de generadores de energía eléctrica a partir de los vórtices de Karman, en los que el movimiento de oscilación de un mástil se convierte en energía eléctrica mediante sistemas de elementos piezoeléctricos. También se explica cómo se puede modificar la frecuencia natural de oscilación del mástil mediante la aplicación de una tensión sobre un material piezoeléctrico que envuelve un núcleo elástico del mástil.

Este tipo de generadores basados en los vórtices de Karman pueden funcionar sin necesidad de rodamientos, engranajes y lubricantes, y tampoco requieren un sistema de arranque.

Aunque el uso de elementos piezoeléctricos a primera vista puede ser una solución ideal al problema de la sintonización del mástil a variaciones en la velocidad del movimiento del fluido, por ejemplo, la velocidad del viento, y también para convertir un movimiento oscilatorio y no giratorio, como es el movimiento naturalmente generado por los vórtices de Karman, en energía eléctrica, se ha considerado que puede ser interesante encontrar alternativas técnica y económicamente viables al uso de abundante material piezoeléctrico.

El documento US-2008/0048455-A1 describe otro ejemplo de generador eléctrico basado en los vórtices de Karman, basado en el uso de un generador giroscópico. Ahora bien, este tipo de mecanismo conlleva elementos de generación giratorios que requieren el mantenimiento correspondiente.

El documento WO-2012/066550-A1 describe otro generador basado en el aprovechamiento de los vórtices de Karman, con un control activo de la frecuencia de la formación de vórtices para ajustarla a la frecuencia natural de oscilación del elemento captador.

El documento US-2005/0230973-A1 divulga otro generador de energía basado en vibración que incluye un dispositivo de pérdida de vórtices. Las realizaciones descritas se refieren al contexto de la producción de energía en un pozo, aprovechando el fluido producido de una formación. Diferentes medios para convertir la vibración en energía eléctrica se divulgan, incluyendo medios piezoeléctricos e imanes que interactúan con bobinas.

Los documentos JP-2012-151985-A y JP-2012-151982-A divulgan generadores de energía de vibración basados en imanes que oscilan en relación con una bobina, incluyendo medios para cargar una frecuencia de resonancia.

El documento JP-2001-157433-A divulga varios dispositivos de generación de energía diferentes, uno de los cuales presenta un cilindro con una parte superior fijada a un soporte. El cilindro es un cuerpo de vibración y un imán permanente se une a la parte inferior del cilindro. Este imán permanente se relaciona con otro imán permanente estacionario de manera que la fuerza de repulsión entre estos imanes permanentes da lugar a una fuerza tensora en el cilindro. Una bobina se enrolla alrededor de uno de los imanes permanentes. La flexión del cilindro entre sus extremos provocada por el fluido que fluye provoca que los imanes permanentes se acerquen uno a otro y cambia el flujo magnético que pasa a través de la bobina.

Descripción de la invención

Un primer aspecto de la invención se refiere a un generador de energía eléctrica, que comprende una primera parte, por ejemplo, en forma de poste, palo o mástil, configurada para situarse en un fluido, por ejemplo, en el aire, aunque también caben otras posibilidades, como el agua. El fluido puede tener un flujo fundamentalmente estacionario y laminar, característica que normalmente presenta el viento. La primera parte está configurada para, cuando el fluido se mueve, generar vórtices en el fluido de manera que se genere una fuerza de sustentación sobre la primera parte que produce un movimiento de oscilación de la primera parte, por ejemplo, tal y como se describe en los documentos JP-2006-226221-A, JP-A-2006-132397-A, WO-2012/017106-A1 o WO-2014/135551-A1. El movimiento de oscilación tiene una amplitud que guarda cierta relación con la velocidad del viento.

Además, el generador tiene una segunda parte que puede ser sustancialmente estática y que rodea al menos parcialmente la primera parte, por ejemplo, en correspondencia con una base de la primera parte. En algunas realizaciones de la invención, la segunda parte rodea a la primera parte en correspondencia con los 360 grados de su circunferencia, y en otras realizaciones de la invención la segunda parte está dispuesta alrededor de solamente una parte o unas partes del perímetro de la primera parte, por ejemplo, en correspondencia con dos zonas diametralmente opuestas de la primera parte. La primera parte puede comprender una parte sustancialmente rígida y otra parte sustancialmente flexible y elástica anclada en una base o punto de anclaje, de manera que, debido a la flexibilidad o elasticidad de la parte sustancialmente flexible, la primera parte puede realizar un movimiento oscilatorio o de vaivén o cimbreo con respecto al punto de anclaje. La segunda parte puede rodear la primera parte, al menos parcialmente, en correspondencia con dicha base, de manera que cuando se produce el movimiento de oscilación de la primera parte con respecto a la base, la primera parte, por ejemplo, la parte flexible de la primera parte, se puede inclinar alternativamente hacia un lado de la segunda parte y hacia otro lado de la segunda parte, aproximándose a uno y otro lado de la segunda parte. De esta manera, en cada medio ciclo de su oscilación la primera parte se acerca una vez a la segunda parte, desde su posición neutral.

De acuerdo con este aspecto de la invención, el generador comprende un sistema de generación de campo magnético que produce una fuerza de repulsión magnética entre la primera parte y la segunda parte, una fuerza de repulsión que varía con el movimiento de oscilación de la primera parte y que tiene un valor máximo (es decir, un valor máximo que se produce una vez en cada medio ciclo del movimiento de oscilación, cuando la primera parte llega a su punto de máximo acercamiento a la segunda parte) que aumenta cuando aumenta la amplitud del movimiento de oscilación de la primera parte.

De esta manera, la fuerza de repulsión magnética entre la primera parte y la segunda parte aumenta cuando aumenta la amplitud del movimiento oscilatorio, y se reduce cuando se reduce la amplitud del movimiento oscilatorio. Se observa que cuando aumenta la velocidad del viento, la amplitud del movimiento oscilatorio de la primera parte también aumenta, y el valor máximo de la fuerza de repulsión también aumenta. A medida que se sigue incrementando la velocidad del viento, aunque la amplitud va creciendo cada vez más despacio, la fuerza de repulsión por el contrario se incrementa muy deprisa, dado que esta crece preferiblemente de manera inversamente proporcional al cuadrado de una distancia entre la primera parte y la segunda parte, permitiendo al sistema almacenar en los imanes una energía potencial que se transforma totalmente o sustancialmente en energía cinética (velocidad) en su paso por la posición neutra de flexión nula, lo cual permite aumentar la frecuencia natural de oscilación de la primera parte. Es decir, la fuerza de repulsión modifica el comportamiento de la primera parte como si el módulo de Young o módulo de elasticidad de la primera parte fuera variable. De esta manera, al aumentar la velocidad del viento, aumenta también, de forma automática, la frecuencia de oscilación natural de la primera parte, y viceversa. Así, se consigue una adaptación pasiva o control pasivo de la frecuencia de resonancia de la primera parte en función de la velocidad del viento, que puede servir como alternativa o complemento a la adaptación activa, basada en la aplicación de una tensión a un material piezoeléctrico, que se describe en el documento WO-2014/135551-A1.

Por ejemplo, en el caso de una primera parte en forma de mástil que no disponga de un sistema de adaptación de la frecuencia de resonancia, a velocidades de viento demasiado bajas el mástil no oscila. Según va aumentando la velocidad del viento y se va acercando a la velocidad a la que la frecuencia de aparición de vórtices coincide con la frecuencia de oscilación natural de la estructura, la amplitud de la oscilación del mástil va aumentando, hasta llegar a un máximo. Si la velocidad del viento sigue aumentando, la amplitud empieza a disminuir, dado que los vórtices empiezan a generarse demasiado deprisa, mientras que la frecuencia de oscilación natural de la estructura se mantiene constante. Finalmente, a partir de una velocidad de viento suficientemente elevada el mástil deja de oscilar. El reducido rango de velocidades desde la velocidad a la que el mástil empieza a oscilar hasta la velocidad a la que el mástil deja de oscilar se conoce como el rango de "lock-in". Un efecto de la invención es que, debido a la adaptación de la frecuencia de oscilación natural del sistema, se puede producir una ampliación del rango de lock-in.

En algunas realizaciones de la invención, el sistema de generación de un campo magnético comprende al menos un primer imán (por ejemplo, uno o varios imanes anulares, o una pluralidad de imanes que están dispuestos en dos o más puntos, preferiblemente diametralmente opuestos, de la circunferencia de la primera parte, por ejemplo, formando anillos continuos o interrumpidos, a una o más alturas de la primera parte) asociado a (por ejemplo, fijado a) la primera parte, y al menos un segundo imán (por ejemplo, uno o varios imanes anulares, o una pluralidad de imanes que están dispuestos en correspondencia con dos o más puntos, preferiblemente diametralmente opuestos, de la circunferencia de la segunda parte, por ejemplo, formando anillos continuos o interrumpidos, a una o más alturas de la segunda parte) asociado a (por ejemplo, fijado a) la segunda parte. Dicho al menos un primer imán y dicho al menos un segundo imán están dispuestos para repelerse mutuamente y de manera que cuando se produce el movimiento de oscilación de la primera parte, la distancia entre dicho al menos un primer imán y dicho al menos un segundo imán varía de acuerdo con dicho movimiento de oscilación. Como la fuerza de repulsión entre dos imanes es inversamente proporcional a la distancia entre los imanes elevada al cuadrado, la fuerza variará sustancialmente durante la oscilación de la primera parte, y su valor máximo puede depender de forma notable de la amplitud del movimiento oscilatorio. De esta manera, una variación en la amplitud de oscilación de la primera parte se corresponderá con una variación en la fuerza máxima de repulsión y, por lo tanto, con una variación de la frecuencia de oscilación natural de la primera parte.

En algunas realizaciones de la invención, dicho al menos un primer imán comprende al menos dos partes diametralmente opuestas, y dicho al menos un segundo imán comprende al menos dos partes diametralmente opuestas, enfrentadas a dichas al menos dos partes diametralmente opuestas de dicho, al menos un, primer imán. De esta manera, al producirse el movimiento de vaivén u oscilación de la primera parte, los primeros y segundos imanes se van acercando entre sí en un lado de la primera parte, a la vez que se van alejando en el lado diametralmente opuesto, y se produce una fuerza oscilante sobre la primera parte que va variando periódicamente de signo y de amplitud, en función de las distancias entre los imanes.

En algunas realizaciones de la invención, dicho, al menos un, primer imán está configurado como al menos un anillo, por ejemplo, como varios anillos a diferentes alturas, y/o dicho, al menos un, segundo imán, está configurado como al menos un anillo, por ejemplo, como varios anillos a diferentes alturas. Estos anillos pueden ser compuestos por imanes individuales yuxtapuestos. El uso de imanes en forma de anillo, por ejemplo, anillos horizontales, puede ser útil para que el generador funcione de la misma manera independientemente de la dirección del viento. Ahora bien,

por ejemplo, en lugares en los que el viento solo sopla (u otro fluido fluye) en un rango limitado de direcciones, puede ser suficiente disponer de parejas de primeros y segundos imanes, dispuestos en los planos verticales de oscilación previsible de la primera parte.

- 5 En algunas realizaciones de la invención, dicho al menos un primer imán comprende una pluralidad de primeros imanes dispuestos a diferentes alturas sobre una base del generador, y dicho al menos un segundo imán comprende una pluralidad de segundos imanes dispuestos a diferentes alturas sobre una base del generador.

10 Eligiendo el tamaño y potencia de los imanes, el número de imanes y el número de filas de imanes en sentido vertical, así como la posición de los imanes, se puede establecer una interacción entre los imanes asociados a la primera parte y los imanes asociados a la segunda parte que sirve para que la frecuencia natural de la primera parte vaya variando de la manera más alineada posible con la frecuencia de aparición de los vórtices, que a su vez varía en función de la velocidad relativa entre el fluido (por ejemplo, el aire) y la primera parte.

15 En algunas realizaciones, dicho al menos un imán comprende una primera pluralidad de imanes dispuestos sustancialmente adyacentes entre sí, por ejemplo, uno sobre otro o lado a lado en el plano horizontal, y con polaridades dispuestas (por ejemplo, de acuerdo con la agrupación de Halbach) por lo que el campo magnético producido por dicha primera pluralidad de imanes es más fuerte a un lado de dichos imanes en oposición a dicho al menos un segundo lado que un lado opuesto, y/o dicho al menos un segundo imán comprende una segunda pluralidad de imanes dispuestos sustancialmente adyacentes entre sí, por ejemplo uno sobre otro o lado a lado, y con polaridades dispuestas (por ejemplo de acuerdo con la agrupación de Halbach) por lo que el campo magnético producido por dicha segunda pluralidad de imanes es más fuerte en un lado enfrente de dicho al menos un primer imán que un lado opuesto. Esta disposición sirve para mejorar la eficacia de los imanes en términos de su contribución al aumento de la frecuencia de resonancia de la primera parte cuando la velocidad de fluido aumenta, y viceversa. Es decir, básicamente, cuando se disponen los imanes de esta manera, por ejemplo, siguiendo la agrupación de Halbach, es decir disponiendo los imanes de manera conocida para aumentar el campo magnético en un lado de la agrupación mientras se cancela el campo a casi cero en el otro lado, el campo magnético será más fuerte en el lado donde el primer y segundo imán se oponen entre sí, por tanto, se proporciona un uso eficaz de los imanes.

30 En algunas realizaciones, el al menos un primer imán y el al menos un segundo imán se disponen de una manera inclinada en relación con un eje longitudinal, tal como eje vertical, de la primera parte. En algunas realizaciones, la inclinación es tal que la distancia entre los imanes y un eje de simetría de un eje longitudinal de la primera parte aumenta en función de la altura sobre un extremo inferior de la primera parte. Por ejemplo, el primer y segundo imán pueden disponerse como anillos de imanes con una forma de cono truncado o al menos una superficie moldeada como un cono truncado. Esta inclinación ha demostrado ser útil para introducir un par que puede servir para reducir o eliminar la tendencia de que la primera parte entre en modos resonantes diferentes de aquel correspondiente a una frecuencia natural de oscilación.

40 En algunas realizaciones o aspectos, la primera parte se dispone por lo que la amplitud del movimiento oscilante aumenta con la velocidad del fluido, por ejemplo, con el aumento de la velocidad del viento, al menos dentro o para un intervalo determinado de velocidades.

45 Como se explicó antes, el principio de funcionamiento puede en algunas realizaciones de la invención ser como sigue: la fuerza de repulsión entre el primer imán o imanes y el segundo imán o imanes es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el primer imán/imanes y el segundo imán/imanes; cuando la velocidad del fluido (tal como la velocidad del viento) aumenta, la amplitud del movimiento oscilante tiende a aumentar, por lo tanto los imanes tienden a acercarse durante una parte del acercamiento máximo de cada ciclo de oscilación, por lo que la fuerza de repulsión máxima producida entre los primeros imanes y los segundos imanes en cada ciclo de oscilación aumenta por consiguiente. El aumento de la fuerza de repulsión aumenta la frecuencia de resonancia de la primera parte, por lo que la estructura del generador contribuye a un aumento automático en la frecuencia de resonancia de la primera parte cuando la velocidad del fluido aumenta, y viceversa.

55 En algunas realizaciones de la invención el generador comprende un subsistema de imanes (que comprende al menos un imán) y al menos una bobina y se configura de manera que el movimiento oscilante de la primera parte produce un desplazamiento relativo entre el subsistema de imanes y dicha al menos una bobina, de manera que una fuerza electromotriz se genera en dicha al menos una bobina. Preferentemente, el generador comprende una pluralidad de estas bobinas, preferentemente dispuestas alrededor de la primera parte, por ejemplo, en una o más agrupaciones circulares, en uno o más niveles sobre la base del generador. Por tanto, el movimiento oscilante de la primera parte resulta en una variación del campo magnético al que se exponen las bobinas, por lo que el movimiento oscilante de la primera parte se convierte en energía eléctrica.

65 En algunas realizaciones de la invención, el subsistema de imanes comprende una pluralidad de imanes dispuestos de manera que cuando la primera parte se mueve durante el movimiento oscilante desde una posición neutral a una posición inclinada extrema, dicha al menos una bobina se somete a al menos un cambio de polaridad o dirección del campo magnético, preferentemente a una pluralidad de cambios de dirección de campo magnético, tal como tres,

cuatro, cinco o más cambios de polaridad o dirección del campo magnético.

5 En algunas realizaciones de la invención, el subsistema de imanes comprende al menos dos conjuntos de imanes dispuestos en diferentes alturas sobre una base del generador, comprendiendo cada conjunto de imanes una pluralidad de anillos de imán dispuestos coaxialmente alrededor de la primera parte de manera que un campo magnético se establece entre dichos conjuntos de imanes, radialmente, con al menos un cambio de dirección, preferentemente al menos dos cambios de dirección, más preferentemente al menos cuatro cambios de dirección. Por tanto, cuando la primera parte oscila, las bobinas pueden moverse entre dichos dos conjuntos de imanes y se someten a repetidos cambios de polaridad o dirección del campo magnético, debido a la alternancia de polaridad
10 definida por los anillos de imán. Muchos cambios de polaridad/dirección pueden ser preferentes para aumentar la producción de electricidad desde un movimiento oscilante de la primera parte.

15 En algunas realizaciones de la invención, las bobinas se disponen en la segunda parte y el subsistema de imanes se dispone en la primera parte. Disponer las bobinas en la segunda parte puede ser ventajoso ya que las conexiones al sistema eléctrico pueden hacerse sin conexión a la primera parte, que es la parte de la movilidad oscilante que es crítica para el funcionamiento del generador. Si las bobinas están en la primera parte, los conductores que evacúan la energía pueden exponerse a la degradación por fatiga y las pérdidas viscosas pueden aumentar innecesariamente.

20 En algunas realizaciones de la invención, el generador comprende un generador o subsistema de alternador que comprende un primer módulo de generador y un segundo módulo de generador móvil en relación con dicho primer módulo de generador en paralelo con un eje longitudinal de la primera parte (tal como un mástil), para producir el desplazamiento relativo entre el imán o subsistema de imanes y la al menos una bobina. Es decir, y a diferencia de las disposiciones de la técnica anterior como se sugiere en el documento US-2005/0230973-A1 donde el movimiento relativo entre el imán y la bobina básicamente corresponde a la oscilación lateral del elemento que se somete a la vibración debido a los vórtices, algunas realizaciones de la presente invención implican un movimiento
25 sustancialmente en paralelo con el eje longitudinal de la primera parte, es decir, en el caso de una primera parte orientada verticalmente, un movimiento en la dirección vertical. Tal disposición puede hacer uso de, por ejemplo, gravedad para contribuir al movimiento oscilante del segundo módulo de generador en relación con, por ejemplo, un primer módulo de generador estacionario. También puede ser útil facilitar la implementación de un segundo módulo de generador que oscila en una frecuencia diferente de la frecuencia de oscilación de la primera parte. En algunas realizaciones, esta disposición también puede ser útil para facilitar la concentración de los elementos del generador cerca de un eje longitudinal del generador, minimizando su extensión o dimensión en la dirección lateral. La referencia al eje longitudinal de la primera parte generalmente se refiere al eje longitudinal cuando la primera parte
30 no oscila. En algunas realizaciones este eje es vertical.

En algunas realizaciones de la invención, el primer módulo de generador es un módulo de generador estacionario. En algunas realizaciones de la invención, las una o más bobinas pueden preferentemente disponerse en el módulo de generador estacionario, por ejemplo, rodeando externamente el segundo módulo de generador y/o rodeadas por
40 el segundo módulo de generador. En estas realizaciones, los imanes pueden disponerse en el segundo módulo de generador móvil. En otras realizaciones de la invención, la bobina o bobinas pueden disponerse en el segundo módulo de generador y el imán o imanes en el primer módulo de generador. En otras realizaciones de la invención, las bobinas e imanes pueden presentarse tanto en el primer módulo de generador como en el segundo módulo de generador etc. Las bobinas pueden asociarse con elementos que ayudan a concentrar u optimizar el campo magnético, tal como núcleos ferromagnéticos etc., como se conoce en la técnica.

En algunas realizaciones de la invención, el segundo módulo de generador se conecta al primer módulo de generador mediante una pluralidad de miembros de conexión dispuestos para permitir el movimiento del segundo módulo de generador en paralelo con el eje longitudinal de la primera parte, y evitar que el segundo módulo de generador contacte con el primer módulo de generador. Por ejemplo, el movimiento del segundo módulo de generador puede ocurrir por una cierta flexión o doblado de los miembros de conexión. Los miembros de conexión pueden ser sustancialmente resistentes a alargamiento, por lo que, si se disponen apropiadamente, puede asegurarse que el segundo módulo de generador se mueva solo en paralelo con el eje longitudinal de la primera parte, tal como verticalmente pero no lateralmente. Por ejemplo, los miembros de conexión pueden hacerse de
50 materiales con alto factor de calidad mecánico y alta resistencia a la fatiga, tal como fibra de carbono, titanio, acero etc.

En algunas realizaciones de la invención, cada uno de los miembros de conexión se conecta al primer módulo de generador en un primer punto de conexión, y al segundo módulo de generador en un segundo punto de conexión, en donde estos puntos de conexión o la proyección de estos puntos de conexión en el plano perpendicular al eje longitudinal de la primera parte se separan por un ángulo α en un plano perpendicular al eje longitudinal de la primera parte (es decir, cuando la primera parte se extiende verticalmente en el plano horizontal), en donde $\alpha \geq 20^\circ$, preferentemente $\geq 40^\circ$, tal como $\geq 60^\circ$ o $\geq 90^\circ$, visto desde el eje de simetría del segundo módulo de generador, donde dicho eje de simetría en muchas realizaciones de la invención corresponde al eje longitudinal de la primera parte.
60 Esta separación angular sustancial de los puntos de unión puede ser ventajosa ya que permite el uso de miembros de conexión relativamente rígidos, por ejemplo varillas o barras de por ejemplo fibra de carbono, titanio, acero etc.

que puede servir para mantener la posición relativa del primer módulo de generador y el segundo módulo de generador sustancialmente fija en el plano perpendicular al eje longitudinal de la primera parte, evitando así el contacto entre el primer módulo de generador y el segundo módulo de generador, mientras que al mismo tiempo se permite una amplitud suficiente de movimiento del segundo módulo de generador en relación con el primer módulo de generador en paralelo con dicho eje longitudinal de la primera parte, tal como en la dirección vertical.

En algunas realizaciones de la invención, los miembros de conexión se disponen para seguir este movimiento del segundo módulo de generador en la dirección paralela con el eje longitudinal de la primera parte por flexión. Es decir, en lugar de usar miembros que siguen el movimiento por laminación o alargamiento, la capacidad de los miembros de conexión para doblarse una cierta cantidad permite el movimiento del segundo módulo de generador en paralelo con el eje longitudinal de la primera parte. Esto no requiere lubricantes, al contrario del caso en muchos alternadores lineales donde se usan unos cojinetes de bola que requieren lubricación. La presente invención puede implementarse sin ningún cojinete de bolas, y permite un uso a largo plazo sin sustitución de partes o suministro de lubricantes.

En algunas realizaciones de la invención, el primer módulo de generador comprende al menos un primer miembro de armazón anular y el segundo módulo de generador comprende al menos un segundo miembro de armazón anular, el primer miembro de armazón anular y el segundo miembro de armazón anular dispuestos coaxialmente, y al menos (preferentemente al menos tres o más) de dichos miembros de conexión se unen al primer miembro de armazón anular en un extremo, y el segundo miembro de armazón anular en otro extremo.

En algunas realizaciones de la invención, el segundo miembro de armazón anular incluye una pluralidad de agujeros pasantes, pasando los miembros de conexión a través de respectivos de estos agujeros pasantes, por lo que los agujeros pasantes tienen una extensión en paralelo con el eje longitudinal de la primera parte suficiente para permitir un movimiento relativo entre los miembros de conexión y el segundo miembro de armazón anular en paralelo con el eje longitudinal de la primera parte, cuando el segundo módulo de generador se mueve u oscila en paralelo con el eje longitudinal de la primera parte.

En algunas realizaciones de la invención, el segundo módulo de generador se desvía en una primera dirección por primeros medios de desviación, tal como por primeros medios de desviación que comprenden imanes y/o resortes, siendo paralela la primera dirección con el eje longitudinal de la primera parte. En algunas realizaciones de la invención esta dirección es hacia arriba. En algunas realizaciones de la invención, el segundo módulo de generador se desvía adicionalmente en una segunda dirección opuesta a dicha primera dirección, estando desviado el segundo módulo de generador en la segunda dirección al menos por gravedad. En algunas realizaciones de la invención, el segundo módulo de generador se desvía en una segunda dirección opuesta a dicha primera dirección por medios de desviación tal como imanes y/o resortes. En algunas realizaciones de la invención, la segunda dirección es hacia abajo.

Es decir, el segundo módulo de generador se desvía o somete a fuerzas que actúan en dos direcciones opuestas, tal como hacia arriba y hacia abajo, por medios diferentes o dispositivos. En algunas de estas realizaciones, el desvío en la primera dirección, tal como hacia arriba, es al menos en parte producido por resortes y/o imanes. El desvío en la segunda dirección, tal como hacia abajo, puede en algunas realizaciones producirse al menos en parte por resortes y/o imanes y/o gravedad. Este doble desvío, es decir, el hecho de que el segundo módulo de generador se someta a fuerzas en direcciones opuestas, significa que el segundo módulo de generador puede estar flotante en relación con una posición de equilibrio de las fuerzas de desvío, y puede provocarse para su oscilación en relación con dicha posición de equilibrio por el movimiento oscilante de la primera parte. Cuando las fuerzas ejercidas en el segundo módulo de generador de los resortes y/o imanes (que actúan por ejemplo desde arriba y/o desde abajo del segundo módulo de generador) varían dependiendo de la posición del segundo módulo de generador, esta disposición facilita la oscilación del segundo módulo de generador en relación con la posición de equilibrio, una vez que se ha desplazado desde dicha posición.

En algunas realizaciones de la invención, el generador está dispuesto por lo que, durante el movimiento oscilante de la primera parte, una fuerza se ejerce en el segundo módulo de generador para desplazar el segundo módulo de generador en paralelo con el eje longitudinal de la primera parte, variando esta fuerza durante el movimiento oscilante de la primera parte. Esta variación puede servir para inducir una oscilación del segundo módulo de generador en paralelo con el eje longitudinal de la primera parte, y esta oscilación implica un movimiento relativo entre imanes y bobinas, convirtiendo así la energía cinética en energía eléctrica. En algunas realizaciones, esta fuerza se provoca por la interacción entre imanes de desplazamiento asociados con la primera parte por lo que los imanes de desplazamiento se mueven de acuerdo con el movimiento oscilante de la primera parte, y los imanes desplazados asociados con el segundo módulo de generador. Los términos “desplazamiento” y “desplazado” se refieren al punto de vista de que la oscilación de la primera parte, es decir, del mástil o similar es el origen del movimiento del segundo módulo de generador, por lo que los imanes asociados con la primera parte inducen el movimiento del segundo módulo de generador debido a su interacción con imanes asociados, tal como colocados o de otra manera unidos, al segundo módulo de generador.

En algunas realizaciones de la invención, los imanes de desplazamiento se disponen alrededor y a una distancia del

eje longitudinal de la primera parte, para interactuar con unos correspondientes de los imanes desplazados durante la oscilación de la primera parte, transfiriendo así repetitivamente momento desde la primera parte al segundo módulo de generador.

- 5 En algunas realizaciones de la invención, los imanes de desplazamiento y los imanes desplazados tienen al menos una forma parcialmente esférica, y en otras realizaciones tienen una forma alargada y se extienden en una dirección radial relativa al eje longitudinal de la primera parte.

10 En algunas realizaciones de la invención, el generador se dispone por lo que, como resultado del movimiento oscilante de la primera parte, un movimiento oscilante del segundo módulo de generador se produce, estando dicho movimiento oscilante en una dirección paralela con el eje longitudinal de la primera parte y teniendo una frecuencia mayor que la frecuencia del movimiento oscilante de la primera parte. En algunas de estas realizaciones de la invención, la primera parte, debido a su movimiento oscilante, interactúa repetitivamente con el segundo módulo de generador y transfiere el momento al segundo módulo de generador, que así continúa oscilando, dependiendo de la frecuencia de su oscilación de una pluralidad de factores, incluyendo amortiguación debido a la generación de energía eléctrica, las características de los medios de desviación, la rigidez de los miembros de conexión, la masa del segundo módulo de generador etc.

20 En algunas realizaciones de la invención, la primera parte tiene una primera masa y el segundo módulo de generador tiene una segunda masa sustancialmente menor que la primera masa, tal como menor del 10 %, menor del 5 % o menor del 1 % de la primera masa. La diferencia en masa puede relacionarse con una diferencia de inercia, que tiene influencia en la posibilidad de usar el movimiento oscilante de la primera parte a una primera frecuencia para activar y mantener el movimiento del segundo módulo de generador a una segunda frecuencia superior que la primera frecuencia. Obviamente, no existe relación directa entre la masa de la primera parte como tal y su inercia, ya que la primera parte no se mueve linealmente, sino que lleva a cabo un movimiento pivotante o similar a un péndulo en relación con un cierto punto, por lo que su inercia tiene un componente rotativo sustancial. Así, no solo la fase y velocidad sino también la distribución de la masa dentro de la primera parte es relevante para su inercia. Sin embargo, como norma general, una diferencia sustancial de masa, por ejemplo, en línea con los porcentajes antes indicados, puede ser beneficiosa para permitir que el segundo módulo de generador oscile a una frecuencia superior que la frecuencia de oscilación de la primera parte.

30 Es decir, en algunas realizaciones de la invención, la oscilación del segundo módulo de generador ocurre a una frecuencia sustancialmente superior que la frecuencia de la oscilación de la primera parte. Más específicamente, durante cada ciclo de oscilación de la primera parte, la primera parte puede, por ejemplo, proporcionar uno o dos impulsos cortos al segundo módulo de generador, por ejemplo, debido a una aproximación entre los imanes de desplazamiento y desplazados que produce un rápido incremento en la fuerza de repulsión entre estos imanes. Esto induce un desplazamiento del segundo módulo de generador, y las fuerzas de desviación opuesta descritas antes contribuyen a una oscilación continuada del segundo módulo de generador alrededor de un punto o nivel de equilibrio. Así, una oscilación relativamente lenta de la primera parte puede servir para inducir una oscilación mucho más rápida del segundo módulo de generador, lo que mejora la eficacia de conversión de energía mecánica en energía eléctrica.

45 En algunas realizaciones de la invención, la segunda parte comprende un primer módulo de generador y un segundo módulo de generador móvil en relación con dicho primer módulo de generador para producir el desplazamiento relativo entre el imán o imanes, es decir el subsistema de imanes y la al menos una bobina. Por ejemplo, el segundo módulo de generador puede comprender uno o más imanes y el primer módulo de generador puede comprender bobinas o viceversa, o uno o ambos de los módulos generadores puede incluir imanes y bobinas. El segundo módulo de generador se suspende por lo que puede oscilar en relación con el primer módulo de generador, a una frecuencia diferente de la frecuencia del movimiento oscilante de la primera parte. En muchas realizaciones de la invención, la primera parte oscila a una frecuencia relativamente baja, y puede ser deseable producir el desplazamiento entre los imanes y bobinas a una frecuencia superior, para mejorar la producción eficaz de energía eléctrica. La fuerza electromotriz inducida en una bobina es proporcional al cambio en el campo magnético que atraviesa la bobina. Así, disponer el segundo módulo de generador para oscilar a una frecuencia superior en lugar de estar unido para oscilar a la frecuencia de oscilación de la primera parte se ha considerado ventajoso.

55 En algunas realizaciones de la invención, el segundo módulo de generador se dispone para activarse repetitivamente por la primera parte durante dicho movimiento oscilante de la primera parte, para recibir energía y momento de la primera parte. Es decir, la primera parte se mueve por los vórtices, por lo que la energía se transfiere del fluido a la primera parte, y parte de esta energía se transfiere luego al segundo módulo de generador, que se hace oscilar, por lo que parte de esta energía se convierte a energía eléctrica, debido al movimiento relativo entre los imanes y bobinas. La activación puede ser preferentemente como un impulso, es decir ocurrir durante períodos de tiempo cortos. Esto puede, por ejemplo, lograrse dejando que los imanes de desplazamiento se acerquen a los imanes desplazados con un movimiento sustancialmente perpendicular a la dirección del movimiento del segundo generador, por lo que el componente de la fuerza de repulsión en la dirección paralela con la dirección de movimiento del segundo módulo de generador aumenta rápidamente. Así, el movimiento oscilante del segundo módulo de generador se alimenta repetitivamente y se mantiene, por tanto, debido a la interacción entre el segundo

módulo de generador y la primera parte. La primera parte que incluye elementos asociados puede tener una inercia sustancialmente mayor y generalmente una masa mayor que el segundo módulo de generador, por lo que esta activación puede provocar que el segundo módulo de generador oscile a una frecuencia relativamente alta, en comparación con la frecuencia de oscilación de la primera parte; el enlace entre masa e inercia se ha analizado antes.

En algunas realizaciones de la invención, el segundo módulo de generador puede disponerse para activarse repetitivamente por la primera parte durante dicho movimiento oscilante de la primera parte, por interacción magnética entre la primera parte y el segundo módulo de generador. La interacción magnética puede ser preferente para evitar el impacto directo, que puede tener como resultado el desgaste. Sin embargo, en otras realizaciones de la invención, la activación por impacto directo puede considerarse. Las realizaciones que presentan interacción magnética pueden comprender una pluralidad de imanes (que pueden denominarse imanes de desplazamiento) dispuestos, por ejemplo, simétricamente alrededor del eje longitudinal de la primera parte para desplazarse por la primera parte, e imanes correspondientes (que pueden denominarse imanes desplazados) unidos al segundo módulo de generador. Una fuerza de repulsión o atracción entre los imanes de desplazamiento e imanes desplazados es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los imanes. Así, esta fuerza aumenta rápidamente cuando los llamados imanes de desplazamiento y los llamados imanes desplazados se acercan entre sí, lo que puede proporcionar una activación similar a un impulso, donde el momento se transfiere de la primera parte al segundo módulo de generador.

En algunas realizaciones de la invención, el segundo módulo de generador se dispone para activarse por la primera parte durante dicho movimiento oscilante de la primera parte cada vez que la primera parte vuelve a un centro o posición neutral durante dicho movimiento oscilante, por ejemplo, cada vez que la primera parte se alinea con el eje vertical. Esta elección de activación puede ayudar a asegurar que por ejemplo una pluralidad de imanes ("imanes de desplazamiento") unidos a la primera parte se coloquen aproximadamente en relación con los imanes correspondientes ("imanes desplazados") en el segundo módulo de generador, para proporcionar una activación apropiada, independiente de la orientación del plano en el que oscila la primera parte. Además, ya que la velocidad del movimiento oscilante en términos de velocidad de desplazamiento de la primera parte está en su máximo cuando alcanza la posición neutral o central, disponer que la activación ocurra en este momento mejora el carácter similar a un impulso de la activación y transfiere energía y momento. En algunas realizaciones, los imanes de desplazamiento y los imanes desplazados se disponen teniendo en cuenta el hecho de que la primera parte puede sufrir un desplazamiento determinado en la dirección del viento. En algunas realizaciones, en lugar de usar por ejemplo imanes sustancialmente esféricos, los imanes pueden usarse en forma alargada en una dirección radial en relación con el eje longitudinal de la primera parte.

En algunas realizaciones de la invención, el segundo módulo de generador se une al primer módulo de generador mediante medios de conexión flexibles tal como barras o varillas de metal (tal como titanio o acero), fibra de carbono o similar, seleccionado y dispuesto para permitir el desplazamiento del segundo módulo de generador en dirección axial, por ejemplo, por flexión de los miembros de conexión, evitando que el segundo módulo de generador toque el primer módulo de generador.

En algunas realizaciones de la invención, estos miembros de conexión flexibles tienen una sección transversal que tiene una primera anchura en una dirección paralela con dicha dirección axial de desplazamiento del segundo módulo de generador, una segunda anchura en una dirección perpendicular a dicha dirección axial, siendo dicha segunda anchura mayor que dicha primera anchura. Por tanto, el movimiento del segundo módulo de generador en la dirección axial se facilita, mientras que el movimiento en una dirección perpendicular a dicha dirección axial se hace más difícil.

En algunas realizaciones de la invención, la primera parte tiene un eje longitudinal que se extiende generalmente en vertical cuando la primera parte no oscila, y el segundo módulo de generador se dispone para oscilar verticalmente. Así, la oscilación de la primera parte en relación con un eje vertical se dispone para activar el segundo módulo de generador para oscilar arriba y abajo. El segundo módulo de generador puede suspenderse de manera flotante por imanes o resortes que desvían el segundo módulo de generador hacia arriba, y opcionalmente también por imanes o resortes que desvían el segundo módulo de generador hacia abajo.

En algunas realizaciones de la invención, algunos o todos los imanes que son parte del subsistema de imanes usados para inducir corriente eléctrica en las bobinas puede también servir para al menos parte de la sintonización de la frecuencia de oscilación natural de la primera parte a velocidad del viento. Por ejemplo, al menos algunos de los primeros imanes pueden ser parte del subsistema usado para inducir corrientes en las bobinas, que es por lo que estos imanes pueden tener una función doble.

En algunas realizaciones de la invención, la primera parte puede comprender un mástil oscilante, configurado para ser capaz de oscilar bajo la influencia de vórtices de Karman y la segunda parte puede comprender una estructura estática ubicada en correspondencia con la base del mástil. En algunas realizaciones de la invención, la primera parte tendrá una altura de al menos 1 metro, por ejemplo, más de 2, 5, 10, 15, 60, 100 o 200 metros. En otras realizaciones de la invención, el mástil puede ser menor, por ejemplo, puede tener una altura menor que 1 m, por

ejemplo, menor que 10 cm, menor de 1 cm, o incluso menor. Se ha demostrado que incluso un equipo muy pequeño puede trabajar apropiadamente, ya que es capaz de adaptarse rápidamente a los cambios en el viento (turbulencias) dada su rápida frecuencia de oscilación. Se considera que incluso puede ser posible producir generadores nanométricos basados en los principios de la presente invención.

5 Otro aspecto de la invención se refiere a un método para hacer que un generador de energía eléctrica se sintonice a la velocidad del viento. El método es aplicable a un generador de energía eléctrica que comprende una primera parte, por ejemplo, en forma de poste, palo o mástil, configurada para situarse en un fluido, por ejemplo, en el aire, aunque también caben otras posibilidades, como el agua. El fluido puede tener un flujo sustancialmente estacionario y laminar, característica que normalmente presenta el viento. La primera parte está configurada para, cuando dicho fluido se mueve, generar vórtices en dicho fluido de manera que se genere una fuerza de sustentación sobre la primera parte que produce un movimiento de oscilación de la primera parte, tal y como se describe en, por ejemplo, los documentos JP-2006-226221-A, JP-A-2006- 132397-A, WO-2012/017106-A1 o WO-2014/135551 -A1. El generador también tiene una segunda parte que rodea al menos parcialmente dicha primera parte.

15 El método comprende la etapa de disponer al menos un primer imán en la primera parte y al menos un segundo imán en la segunda parte, de manera que dicho al menos un primer imán y dicho al menos un segundo imán se repelen entre sí. Más arriba se ha explicado el efecto que se consigue con esta disposición, que sirve para que la frecuencia de oscilación natural de la primera parte se vaya adaptando, de forma automática, a la frecuencia de aparición de vórtices.

También descrito, pero no reivindicado hay un método para producir un elemento captador para un generador de energía eléctrica basado en los vórtices de Karman, comprendiendo el elemento captador una parte superior sustancialmente rígida y una parte inferior flexible y elástica. En este contexto, los términos “rígido” y “flexible” se usan para indicar que el movimiento oscilatorio se debe sustancialmente a la deformación de la parte sustancialmente flexible/elástica, y no a eventuales deformaciones de la parte sustancialmente rígida. La parte superior rígida se une a una base mediante la parte inferior flexible, de manera que la parte superior rígida pueda oscilar con respecto a dicha base. La parte inferior flexible tiene una longitud efectiva “L”; la longitud efectiva es la longitud de la parte inferior flexible a lo largo de la cual la parte inferior flexible se flexiona cuando la parte superior rígida está oscilando, a saber, se trata del tramo de la parte inferior flexible entre su fijación en la base y su fijación a la parte superior rígida.

La parte superior rígida tiene una dimensión característica (el diámetro en el caso de una sección circular) que varía en función de una altura “Y” sobre el punto de fijación de la parte inferior flexible en la base.

El método comprende las etapas de:

- establecer un diseño de la parte superior rígida en términos de su dimensión característica (el diámetro en el caso de una parte superior rígida de sección transversal circular) en función de la altura sobre dicho punto de fijación, mediante una fórmula basada en una estimación de oscilación de la parte superior rígida con respecto a un punto situado a una altura de entre $0,3 \cdot L$ y $0,7 \cdot L$ sobre dicho punto de fijación (se ha comprobado con cálculos que esto permite hacer una estimación sustancialmente realista de la velocidad relativa entre aire y la parte superior rígida para los ángulos pequeños de oscilación que se suelen preferir para este tipo de generadores, una estimación que tiene en cuenta adecuadamente tanto la variación de la velocidad del viento como la variación de la velocidad de la parte superior rígida debido al movimiento oscilatorio, según la altura); y
- producir un elemento captador con una parte superior rígida que presenta dicho diseño.

De esta manera, se consigue un elemento captador cuya dimensión característica varía de una forma adecuada para que los vórtices aparezcan de forma sincronizada a lo largo de toda la parte superior rígida.

Breve descripción de los dibujos

Para complementar la descripción y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con unos ejemplos de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de la descripción, un juego de figuras en el que, con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

La figura 1 es una vista esquemática en alzado en la que se pueden observar algunos de los componentes de un generador de acuerdo con una posible realización de la invención.

La figura 2 es una vista esquemática en sección transversal del mástil oscilante del generador de acuerdo con esa realización preferida, y de los vórtices que genera en el fluido que lo rodea.

La figura 3 es un diagrama que ilustra, de forma esquemática, la relación entre el radio (R) de un mástil y la altura (H) sobre el suelo, de acuerdo con el estado de la técnica (esta figura está presente en el documento WO-2014/135551 -A1).

La figura 4 refleja con mayor detalle la distribución de imanes y bobinas entre el mástil oscilante y la estructura estática, en la realización preferida ilustrada en la figura 1.

Las figuras 5 y 6 reflejan, de forma esquemática, dos diferentes distribuciones de bobinas en una sección transversal horizontal de un generador de acuerdo con sendas realizaciones de la invención.

Las figuras 7 y 8 reflejan dos conjuntos de imanes asociados al mástil, de acuerdo con una posible realización de la invención.

5 La figura 9 ilustra, de forma esquemática, un corte transversal en el plano vertical de los dos conjuntos de imanes de las figuras 7 y 8, y una bobina con respecto a la cual pueden desplazarse dichos conjuntos.

Las figuras 10A y 10B ilustran dos modelos simplificados del comportamiento de un mástil sin ningún sistema de sintonizado (figura 10A) y con un sistema de sintonizado (figura 10B), respectivamente.

10 La figura 11 representa la evolución frente al desplazamiento (x) de la fuerza elástica (F_k) y de la fuerza por repulsión magnética (F_b).

La figura 12 representa la variación en el tiempo de la amplitud (desplazamiento x) y frecuencia (oscilación a lo largo del eje temporal t) de un dispositivo sin ningún sintonizado (I) y un dispositivo sintonizado (II) (movimiento con repulsión magnética) al ser sometido a la actuación de una fuerza instantánea en el instante inicial.

15 Las figuras 13A-13D reflejan, de forma esquemática, el método geométrico seguido para establecer la distancia respecto del suelo a la que una prolongación del mástil no sufre desplazamiento horizontal para ángulos de flexión pequeños.

La figura 14 es una gráfica que refleja cálculos realizados para confirmar lo ilustrado en las figuras 13A-13D para varios ángulos de flexión, donde se puede observar cómo a medida que los ángulos van aumentando deja de ser correcta la suposición de desplazamiento nulo.

20 La figura 15 es un diagrama que ilustra la evolución con la altura del diámetro de un mástil de altura H para una amplitud de trabajo en su parte más alta de $\beta \cdot D(H)$ y un diámetro inferior d .

Las Figuras 16A a 16D ilustran las disposiciones del primer y segundo imán de acuerdo con cuatro realizaciones diferentes de la invención.

25 La Figura 17 es una vista lateral en sección transversal de una porción de un generador de acuerdo con una realización de la invención.

La Figura 18 es una vista superior en sección transversal de una porción del generador de la realización de la figura 17.

Las Figuras 19A y 19B son vistas superiores esquemáticas de dos conjuntos de imán alternativos que pueden usarse en la realización de las figuras 17 y 18.

30

Descripción de modos de realización de la invención

35 La figura 1 refleja de forma esquemática un generador de acuerdo con una posible realización de la invención que comprende una primera parte en forma de mástil 1 que se extiende verticalmente hacia arriba desde el suelo 1000, estando el mástil 1 anclado en el suelo mediante una base de anclaje 13 que puede ser de cemento, hormigón, o cualquier otro material adecuado. En muchas realizaciones de la invención, el mástil tiene un eje longitudinal 100 y en muchas realizaciones de la invención el mástil 1 es sustancialmente simétrico con respecto a dicho eje longitudinal.

40 Tal y como se ilustra en la figura 2, el flujo laminar 1001 del viento, al incidir sobre la primera parte en forma de mástil 1, produce una serie de vórtices 1002 que se producen alternativamente a un lado y al otro del mástil 1, y con una distancia 1003 constante entre los vórtices sucesivos en cada lado del mástil. Por lo tanto, sobre el mástil 1 se produce una fuerza de arrastre 1004 sustancialmente constante en la dirección del viento, y una fuerza de sustentación 1005 sustancialmente perpendicular a la dirección general del viento y a la dirección de la fuerza de arrastre. Esta fuerza de sustentación 1005 varía periódicamente de signo, con una frecuencia que marca la aparición de los vórtices, y esta fuerza hace oscilar el mástil 1, hacia un lado y otro. En esta realización de la invención, el mástil 1 tiene sección transversal circular, de manera que su función de captación de energía del viento no depende de la dirección del viento, que muchas veces puede variar en el tiempo. En otras realizaciones de la invención, por ejemplo, cuando haya una dirección de movimiento del fluido muy predominante, el mástil puede tener otro tipo de sección transversal, pero la circular muchas veces puede ser la más adecuada.

55 La frecuencia de la aparición de vórtices depende de la velocidad del viento. Por lo tanto, para maximizar la captación energética del mástil, puede ser deseable que los vórtices aparezcan de forma sincronizada a lo largo del mástil 1. Dado que la velocidad del viento, de acuerdo con la Ley exponencial de Hellmann, aumenta con la altura, y dado que la frecuencia de aparición de vórtices depende tanto de la velocidad relativa entre aire y mástil (que a su vez depende de la velocidad del viento) como de la dimensión característica del mástil (en este caso, del diámetro del mástil), es conveniente que el diámetro del mástil aumente con la altura, a medida que la velocidad relativa entre aire y mástil aumenta con la altura. En la figura 3 se ilustra esquemáticamente cómo según lo descrito en el documento WO-2014/135551-A1, en el caso de un mástil con un radio (R) de unos 60 mm a nivel del suelo, el radio aumenta a aproximadamente 83 mm a la altura (H) de 1 metro sobre el suelo, y a aproximadamente 105 mm a la altura de 4 metros sobre el suelo. El incremento óptimo del radio con la altura depende del valor del exponente de Hellmann y este exponente depende de las características del entorno. En lugares llanos, con hielo o hierba, su valor es mínimo y en terrenos muy accidentados o en ciudades, su valor es mayor.

65 Por otra parte, tal y como es sabido, cuando se aplica una fuerza oscilante a un elemento u objeto, la energía correspondiente se absorbe mejor si la fuerza que se aplica oscila a una frecuencia que se corresponde con la

frecuencia de oscilación natural del objeto. La frecuencia natural depende de parámetros como la densidad y la rigidez del elemento. Para una primera parte o mástil 1 de una determinada configuración y constitución, la frecuencia con la que se generan los vórtices y con la que oscila la fuerza de sustentación 1005, dependerá de la velocidad del viento. Tal y como se indica en el documento WO-2012/017106-A1 y en el documento WO-2014/135551-A1, puede ser deseable sintonizar la frecuencia de oscilación natural de la primera parte con la frecuencia de aparición de los vórtices.

Dado que esta frecuencia de aparición de vórtices, para un determinado elemento captador o mástil, depende de la velocidad del viento, puede ser deseable poder variar la frecuencia de oscilación natural del mástil en función de la velocidad del viento.

Para una barra maciza, su frecuencia de oscilación natural es:

$$\omega = (((I \cdot E \cdot K^4) / d) - a^2)^{(1/2)}$$

donde E es el módulo de Young, I es el momento de inercia seccional, d es la densidad de la barra por unidad de longitud, K es el modo espacial de oscilación (el 1^{er} modo y sus armónicos) y a es una constante de amortiguamiento. Cuanto más se amortigua una estructura (es decir, cuanta más energía se extrae de ella en forma de pérdidas viscosas, rozamiento, etc.), menor es su frecuencia de oscilación natural. La frecuencia de oscilación natural de cualquier estructura depende del amortiguamiento al que está siendo sometida. Por lo tanto, cuanta más potencia eléctrica se extraiga del generador, menor es su frecuencia de oscilación natural, salvo que se compense, por ejemplo, tensando la estructura, aumentando su rigidez, etc.

El documento WO-2014/135551-A1 describe cómo esto se puede conseguir actuando de forma activa sobre material piezoeléctrico que forma parte de la estructura del mástil. El generador ilustrado en la figura 1, un detalle del cual se puede observar en la figura 4, dispone de un sistema pasivo de adaptación de la frecuencia de oscilación natural, basado en el uso de imanes asociados al mástil 1 y a una estructura estática 2 dispuesta en correspondencia con la base del mástil 1, rodeando al mástil 1. En las figuras 1 y 4 se puede observar cómo, en esta realización de la invención, la estructura estática 2 presenta una pared 21 sustancialmente cilíndrica que envuelve el mástil 1 en correspondencia con su parte inferior.

Tal y como se puede observar en las figuras 1 y 4, esta estructura estática 2 forma una segunda parte del generador, y rodea de forma completa o parcial el mástil 1. El mástil 1 comprende una parte relativamente rígida 11, que puede ser sustancialmente hueca y producida por materiales ligeros como, por ejemplo, fibra de carbono, fibra de vidrio, resina de poliéster, resina de epoxi, fibra de basalto, madera de balsa, aluminio y/o titanio, etc. Puede ser ventajoso que el material no conduzca electricidad. Esta parte rígida puede incluir elementos de refuerzo 11a internos como nervios, cartelas o vigas que aportan rigidez estructural. El extremo superior del mástil está preferiblemente cerrado, por ejemplo, mediante una tapa.

Por otra parte, el mástil 1 comprende una parte relativamente flexible 12, que es la que une el mástil 1 a la base de anclaje 3 de manera que la parte rígida 11 puede oscilar sustancialmente con respecto a la base, a pesar de su rigidez. Esta parte flexible 12 puede ser un tipo de varilla flexible que puede deformarse elásticamente hacia los lados, de forma oscilatoria, permitiendo que la parte rígida también oscile. La parte inferior de la parte flexible 12 está empotrada en una base 22 de la estructura estática 2, y su parte superior está alojada dentro de la parte rígida 11 del mástil. En la figura 1 se puede observar cómo la varilla flexible 12 atraviesa la base 22 de la estructura estática y se empotra también en la base de anclaje. Ahora bien, una parte sustancial de la parte flexible 12 está libre y puede oscilar, junto con la parte rígida 11, hacia un lado y otro, debido a la fuerza de sustentación arriba mencionada.

En la figura 4 se puede observar cómo la parte flexible 12, en forma de varilla, soporta cinco anillos de imanes 30, y cómo de forma coaxial con respecto a estos anillos de imanes 30 hay otros cinco anillos de imanes 40, estos montados en la estructura estática 2, a su vez coaxial con respecto a la parte flexible 12 del mástil. Los imanes 30 montados en la parte flexible 12 del mástil 1 y los imanes 40 montados en la estructura estática 40 están dispuestos para repelerse mutuamente, es decir, los polos del mismo signo están enfrentados, tal y como se ilustra esquemáticamente en la figura 4 donde la parte negra del imán representa el polo N y la parte blanca el polo S.

De esta manera, cuando se produce la oscilación de mástil 1, la parte flexible 12 se va flexionando hacia un lado y hacia otro, por lo cual una parte de los imanes 30 montados en la parte flexible 12 se va acercando a una parte de los imanes 40 montados en la estructura estática 2, mientras que en el lado diametralmente opuesto de la parte flexible 12 una parte de los imanes 30 se va alejando de la parte correspondiente de los imanes 40. La fuerza de repulsión entre los imanes 30 y 40 es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los imanes 30 y 40. Cuando aumenta el viento, tiende a aumentar la amplitud del movimiento oscilatorio del mástil, con lo cual los imanes 30 y 40 tienden a acercarse cada vez más durante la parte de máxima aproximación de cada ciclo de oscilación, y con ello la fuerza máxima de repulsión que se produce entre los imanes 30 y 40 en cada ciclo de oscilación aumenta de forma correspondiente. El aumento de esta fuerza de repulsión aumenta la frecuencia de resonancia de la estructura. De esta manera, la propia estructura del generador de las figuras 1 y 4, con sus imanes

- 30 y 40, contribuye a que, al aumentar la velocidad del viento, se produzca un aumento automático de la frecuencia de resonancia del mástil, y viceversa. De esta manera, seleccionando y disponiendo adecuadamente los imanes 30 y 40, algo que se puede hacer mediante ensayos de prueba y error y/o mediante simulaciones por ordenador, se puede conseguir que la frecuencia de oscilación natural del mástil se vaya ajustando de forma automática a la velocidad del viento, para siempre estar sintonizada con la frecuencia de aparición de vórtices, consiguiéndose así una buena captación de energía a partir del movimiento del fluido. Es decir, una función de los imanes 30 y 40 puede ser la de conseguir una sintonización automática entre la frecuencia de oscilación natural del mástil y la frecuencia de aparición de vórtices.
- Es decir, por ejemplo, tanto el mástil oscilante 1 como la parte estacionaria 2 están dotados de imanes, por ejemplo, en forma de anillos magnéticos o conjuntos de imanes individuales colocados en forma de anillo, dispuestos de forma coaxial y de manera que los polos del mismo signo se repelan (norte contra norte o sur contra sur). Esto permite confinar magnéticamente el movimiento del mástil y que la frecuencia de oscilación propia del mástil aumente a medida que aumenta la amplitud de oscilación.
- La Figura 16A muestra cómo estos imanes pueden disponerse en una realización de la invención. Los imanes se disponen en anillos alrededor de un eje vertical de simetría del generador, por lo que los imanes 40 se disponen en una porción 21 de la estructura estática que forma un anillo exterior de imanes y los imanes 30 se disponen en la parte flexible 12 del mástil 1 formando un anillo interior de imanes. El anillo exterior de imanes 40 tiene una altura correspondiente a cinco imanes 40 dispuestos uno encima de otro, y el anillo interior de imanes tiene una altura correspondiente a cinco imanes 30 dispuestos uno encima de otro. En ambos anillos, los imanes se disponen siguiendo la llamada agrupación de Halbach en la dirección vertical, es decir, con las polaridades alternadas por lo que el campo magnético generado por los imanes es más fuerte en el lado donde los dos anillos de imanes se oponen entre sí, que en el otro lado. Así, se hace un uso eficaz de los imanes en términos de su contribución a la sintonización de la frecuencia de oscilación natural del mástil.
- La Figura 16B ilustra una disposición similar, pero solo con tres imanes que van uno detrás de otro en la dirección vertical.
- La Figura 16C ilustra una disposición en línea con la de la figura 16B, pero con los imanes dispuestos en una manera inclinada, por lo que tanto los anillos interior como exterior tienen una forma correspondiente a un cono truncado. Esta disposición se considera útil para el fin de producir un cierto par en la parte flexible 12, evitando que entre en modos resonantes diferentes del primer modo de oscilación resonante de la primera parte.
- La Figura 16D ilustra esquemáticamente una realización similar a la de la figura 16C, con la diferencia de que cada anillo de imanes tiene una altura T correspondiente a solo un imán. Este tipo de disposición puede ser más simple de producir que la de la figura 16C, pero no presenta las ventajas proporcionadas por el efecto Halbach.
- En la figura 4 se ha ilustrado cómo una pluralidad de bobinas 50 están montadas en la parte estática 2, en correspondencia con su parte superior donde se produce un movimiento sustancial de la varilla flexible 12 hacia los lados. Las bobinas 50 tienen sus espiras paralelas o casi paralelas al plano horizontal. Tal y como se ha ilustrado en la figura 4, las bobinas 50 están distribuidas en tres niveles, es decir, a tres alturas diferentes sobre la base del generador. Estas bobinas 50 pueden estar dotadas de núcleos ferromagnéticos 51.
- Las bobinas están dispuestas de manera que cuando el mástil 1 oscila, algunos de los imanes 30 anteriormente indicados pasan por encima y por debajo de las bobinas. Tal y como se puede observar en la figura 4, para cada bobina 50 hay un imán 30 situado a una altura algo superior a la de la bobina, y otro imán 30 situado algo por debajo de la bobina, estando la polaridad de los imanes invertida de manera que al pasar la bobina por encima de uno de los imanes 30, la bobina 50 pasa una vez por un campo magnético orientado en un sentido (por ejemplo N-S), y una vez por un campo magnético orientado en el sentido opuesto (S-N), tal y como se ha indicado de forma esquemática en correspondencia con una de las bobinas y parejas de imanes en la figura 4. El paso de la bobina por un campo magnético variable induce una fuerza electromotriz o potencial en la bobina, que puede ser recogida y adaptada mediante un sistema de potencia eléctrica 60, ilustrado de forma esquemática en la figura 4.
- Es decir, para que las vueltas produzcan una fuerza electromotriz y generen una potencia eléctrica, en la varilla flexible 12 se han dispuesto varios niveles de anillos magnéticos 30 (o un conjunto de imanes individuales colocados en forma de anillo). El número de niveles de anillos magnéticos 30 es igual al número de niveles de bobinas más uno (en la figura 4 hay cuatro niveles de anillos magnéticos asociados a los tres niveles de bobinas 50). De esta manera, el movimiento de los anillos magnéticos produce un cambio de dirección y sentido de las líneas de campo dentro de las bobinas. Cada nivel de anillos magnéticos tendrá en su vecino o vecinos a sus antagonistas desde el punto de vista magnético, es decir, si la parte más exterior de uno de los niveles de anillos magnéticos es un polo sur, su nivel o niveles vecinos tendrán en la parte más exterior un polo norte, y viceversa, tal y como se ha ilustrado de forma esquemática en la figura 4.
- En la figura 4 se puede observar, de forma esquemática, cómo los imanes 30 están montados en una estructura de soporte 13 montada sobre la parte flexible 12, y cómo las bobinas 50 están montadas en la propia estructura estática

2 (véase también la figura 5). También sería posible montar las bobinas 50 en el mástil, pero desde el punto de vista práctico puede ser preferible montarlas en la parte fija, para facilitar la conexión a la red externa a la que se desea transmitir la energía generada, reduciendo así el riesgo de ruptura por fatiga de los conductores que evacúan la energía, y evitar pérdidas viscosas innecesarias. La energía generada por las bobinas 50 puede ser rectificadora y
 5 acondicionada debidamente mediante un sistema 60 de electrónica de potencia, que puede incluir por ejemplo un inversor, etc., y un sistema de conducción 61 puede evacuar la potencia eléctrica generada.

La figura 6 refleja una configuración alternativa, en la que, a cada nivel de bobinas, en la figura 4 hay tres niveles de bobinas 50, las bobinas están dispuestas en dos anillos concéntricos. El número de anillos, el tamaño de las bobinas, etc., es algo que el experto en la materia elegirá en función de aspectos como las dimensiones del generador, el desplazamiento en sentido lateral de la parte flexible durante la oscilación, etc., con el fin de conseguir un rendimiento óptimo o al menos aceptable del generador.

Las figuras 7, 8 y 9 reflejan de forma esquemática cómo en algunas realizaciones de la invención, los imanes montados en el soporte 13 arriba comentado pueden estar dispuestos, en cada nivel, en forma de una pluralidad de anillos concéntricos 30, 31 y 32. La figura 9 es una vista en sección transversal vertical de los dos conjuntos de imanes ilustrados en las figuras 8 y 9, uno dispuesto encima del otro y separados por un espacio en el que pueden entrar las bobinas 50. Tal y como se puede observar, con estos dos conjuntos puestos uno a una cierta distancia del otro en sentido vertical, se establece un espacio separador en el que se producen tres cambios de polaridad o dirección del campo magnético en cada bobina. Por lo tanto, cuando debido al movimiento oscilatorio una bobina 50 pasa por dicho espacio, la bobina estará sometida a un campo magnético que cambia de polaridad una pluralidad de veces. Dado que la corriente generada depende de las variaciones en el campo magnético al que está sometida la bobina, esta variación en el campo magnético de alta frecuencia es beneficiosa para la generación de corriente.

En algunas realizaciones de la invención, los imanes 30, 31 y 32 montados en la varilla flexible 12 pueden tener adosado material ferromagnético para conducir las líneas de campo de forma idónea para, por ejemplo, aumentar, dentro de un determinado espacio, el número de cambios de polaridad/dirección del campo magnético, para maximizar el número de cambios de dirección de campo magnético a los que están sometidas las bobinas 50 durante un ciclo de oscilación del mástil.

Tal y como se desprende de lo anteriormente explicado, en una realización de la invención como la de las figuras 1 y 4, la parte superior de la parte estática tiene una función correspondiente a la del estator de un alternador no convencional diseñado para poder producir energía sin la utilización de ningún rodamiento o caja de engranajes reductora y que puede producir energía independientemente de la dirección en la que se flexione la varilla 12.

En la figura 4, se ve cómo los imanes están montados en un total de cinco filas, de las cuales las cuatro superiores contribuyen a la generación de energía eléctrica debido a su interacción con las bobinas 50, mientras que tanto las cuatro filas superiores como la inferior contribuyen al autosintonizado del generador a la velocidad del viento.

En las figuras 10A y 10B se ilustra esquemáticamente el comportamiento de un mástil sin ningún sistema de sintonizado (figura 10) y de un mástil con el sistema de sintonizado de acuerdo con una posible realización de la invención (figura 10B).

El objetivo del mecanismo de sintonizado es el de modificar la frecuencia de oscilación natural del equipo en función de la velocidad del fluido. Cuando el dispositivo carece de sistema de sintonizado es aceptable modelizar su movimiento como el de un oscilador armónico simple amortiguado (a) (Figura 10A):

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0 \quad a)$$

donde m es su masa, c es la constante de amortiguamiento donde queda incluido el amortiguamiento estructural propio del dispositivo, otras pérdidas y la energía mecánica convertida en energía eléctrica y k es la constante de elasticidad de la varilla elástica. En este caso, la frecuencia de oscilación natural del equipo es:

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad b)$$

Cuando, debido a la generación de vórtices, el mástil oscilante se ve afectado por la fuerza sinusoidal F de valor máximo F_0 (proporcional al cuadrado de la frecuencia si se considera el valor del coeficiente de sustentación constante), un retraso de φ y frecuencia $w = 2 \cdot \pi \cdot f$ (w [rad/s], f [Hz]), el movimiento podrá ser modelizado como el de un oscilador armónico amortiguado forzado:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F = F_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad c)$$

5 Cuando la frecuencia ω coincide con la frecuencia natural del equipo ω_0 , este entra en resonancia y experimenta un notable incremento en su capacidad de absorber energía del fluido.

10 Como la frecuencia ω es proporcional a la velocidad del fluido, en principio, dado que el dispositivo solo presenta una frecuencia de oscilación natural (en el primer modo de oscilación) solo existirá una única velocidad a la que el dispositivo funcionaría. Ahora bien, un generador de energía como puede ser un aerogenerador será más rentable cuanto mayor número de horas/año pueda estar en operación. Como se ha explicado más arriba, existe un pequeño rango de velocidades de viento (fenómeno aerodinámico de lock-in) en el que un equipo basado en los vórtices de Karman puede mantener su resonancia, pero este es muy inferior a lo deseable para un aerogenerador razonablemente competitivo.

15 Para que este rango de velocidades de viento pueda incrementarse, se puede incorporar un mecanismo de sintonización que modifica la frecuencia de oscilación propia del dispositivo. Así, el mástil oscilará a mayor frecuencia ante una mayor velocidad de viento, o lo que es lo mismo, ante un incremento de la frecuencia de aparición de vórtices.

20 La disposición de la figura 10B difiere de la de la figura 10A debido a la adición de dos pares de imanes en modo de repulsión. El movimiento de dicho modelo vendrá descrito por la siguiente expresión:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x + \frac{b}{(d-x)^2} - \frac{b}{(d+x)^2} = F \quad d)$$

25 donde b incluiría (la ley de Coulomb para el magnetismo), la inversa de la permeabilidad magnética y el producto de las masas magnéticas, d es la distancia que en reposo hay entre cada par de imanes.

30 Como puede observarse en la figura 11, la evolución con el desplazamiento x de la fuerza elástica F_k producida sobre la masa por deformación de la varilla y la fuerza conjunta producida por los dos pares de imanes F_b son muy diferentes. Como puede observarse y como ya se ha mencionado, a medida que la masa (el mástil) se desplaza, cerca de su posición neutra de flexión nula, la fuerza elástica es predominante frente a las fuerzas magnéticas. A medida que el desplazamiento va aumentando su influencia se va igualando y en desplazamientos elevados, la fuerza predominante es la de origen magnético.

35 Esto tiene varias implicaciones.

40 La energía cinética del mástil oscilante a su paso por su posición neutra de flexión nula depende en ambos casos de su masa y su velocidad al cuadrado. No ocurre lo mismo con la energía potencial almacenada en el momento en que su desplazamiento es máximo. En el caso representado en la figura 10A, la energía potencial es tan solo energía potencial elástica, y en el caso representado en la figura 10B, la energía potencial será tanto de carácter elástico como magnético con el matiz de que la energía potencial de origen magnético se incrementa con el cubo del desplazamiento y no con el cuadrado, como ocurre con la energía potencial elástica. Como puede verse en la figura 12, en comparación con el movimiento armónico simple amortiguado (I) para grandes desplazamientos, la trayectoria del movimiento con repulsión magnética (II) sufre un incremento de su frecuencia de oscilación. Con desplazamientos pequeños (en la parte derecha de la gráfica), donde casi toda la energía potencial es acumulada por la varilla elástica, ambas trayectorias tienen un periodo de tamaño muy semejante.

45 La figura 17 ilustra una porción de un generador de acuerdo con otra realización de la invención. Aquí, la primera parte puede moldearse generalmente como se muestra en la figura 1, e incluye una parte flexible 12. En la realización de la figura 17, esta parte flexible se rodea por un conjunto de generador que comprende un primer módulo de generador estacionario 200 que incluye bobinas 50 y 500 y un segundo módulo de generador 400 que es móvil en paralelo con el eje longitudinal 100 de la primera parte 1, es decir en esta realización, en la dirección vertical. El segundo módulo de generador 200 comprende una pluralidad de imanes 300 apilados uno sobre otro y dispuestos en anillos, y el primer módulo de generador comprende bobinas 50 que rodean los imanes en el exterior del segundo módulo de generador 400 y las bobinas 500 rodeadas por los imanes 300, dentro del segundo módulo de generador 400. Las bobinas también pueden proporcionarse con elementos de hierro o ferromagnéticos esquemáticamente ilustrados en 501, para concentrar el campo magnético. El movimiento de los imanes 300 en la dirección vertical generará una fuerza electromotriz en las bobinas como se conoce en la técnica.

60 El segundo módulo de generador comprende un miembro de armazón anular superior 602 encima de los imanes 300 y un miembro de armazón anular inferior 604 por debajo de los imanes 300. Así, el segundo módulo de generador

puede verse como de tipo pistón, dispuesto para moverse en la dirección vertical, entre las bobinas 50 y 500 del primer módulo de generador.

5 El primer módulo de generador igualmente comprende dos miembros de armazón anular 601 y 603. Uno superior de dichos miembros de armazón anular 601 se une al miembro de armazón anular superior 602 del segundo módulo de generador por elementos en forma de varilla o miembros de conexión 605 como se muestra en figura 18, mientras que el miembro de armazón anular inferior 603 del primer módulo de generador 200 se une al miembro de armazón anular inferior 604 o el segundo módulo de generador por miembros en forma de varilla 608 similares. Estos miembros con forma de varilla pueden por ejemplo ser de metal, de fibra de carbono o cualquier otro material que presente suficiente resistencia a la tracción y la fatiga.

15 La Figura 18 ilustra esquemáticamente cómo los miembros de varilla 605 se unen en un extremo al miembro de armazón anular 601 del primer módulo de generador, y en otro extremo al miembro de armazón anular 602 del segundo módulo de generador. Tres aberturas 607 se proporcionan en el miembro de armazón anular 602, permitiendo dicha abertura que un miembro en forma de varilla 605 correspondiente pase a través del miembro de armazón anular 602, teniendo dichas aberturas una extensión en la dirección vertical que permite un desplazamiento en la dirección vertical entre el miembro con forma de varilla 605 y el miembro de armazón anular 602. Unos miembros con forma de varilla 608 similares y aberturas 609 se proporcionan en correspondencia con los miembros de armazón anular inferiores 603 y 604.

20 En la figura 18 se ilustra esquemáticamente cómo los puntos de conexión 605A y 605B del miembro con forma de varilla 605 al miembro de armazón anular 601 y el miembro de armazón anular 602, respectivamente, se separan por un ángulo α en el plano horizontal, en relación con el eje de simetría 606 del segundo módulo de generador (en esta realización este eje de simetría se alinea con el eje de simetría 100 de la primera parte 1). En este caso, este ángulo es aproximadamente 120°. Esta separación sustancial de los puntos de unión puede ser ventajosa ya que permite el uso de miembros de conexión 605 relativamente rígidos, por ejemplo metal o barras o varillas de fibra de carbono, lo que puede ayudar a mantener la posición relativa del primer módulo de generador y el segundo módulo de generador sustancialmente fija en el plano perpendicular al eje longitudinal de la primera parte, evitando así el contacto entre el primer módulo de generador y el segundo módulo de generador, mientras que al mismo tiempo se permite una amplitud suficiente del movimiento del segundo módulo de generador en relación con el primer módulo de generador, en paralelo con dicho eje longitudinal de la primera parte.

30 Solo tres miembros con forma de varilla se muestran en la figura 18, pero cualquier otro número adecuado de miembros con forma de varilla puede usarse, y la colocación angular de los puntos de unión en los miembros de armazón anular puede elegirse como se prefiera por el experto en la materia.

35 La Figura 17 muestra cómo el segundo módulo de generador se suspende o flota en el aire, debido a la repulsión entre un anillo de imanes 220 dispuesto por debajo del segundo módulo de generador 400 y un anillo de imanes 420 dispuesto en la parte inferior del segundo módulo de generador. Así, la interacción entre estos imanes 220 y 420 desvía el segundo módulo de generador hacia arriba, contra la fuerza ejercida por gravedad. Por otro lado, en esta realización de la invención, los imanes 460 asociados con el primer módulo de generador y los imanes 260 asociados con el segundo módulo de generador 200 en la parte superior del segundo módulo de generador, desvían el segundo módulo de generador hacia abajo. En algunas realizaciones de la invención, los imanes pueden sustituirse por resortes y/o los imanes no están presentes en la parte superior del segundo módulo de generador, ya que en algunas realizaciones la gravedad puede servir sola para desviar el segundo módulo de generador hacia abajo.

40 Por otro lado, unos imanes 702 o 703 adicionales se unen al segundo módulo de generador 400 en la parte superior del mismo, y se disponen para interactuar con imanes 700 o 701 correspondientes unidos a la primera parte, en este caso la parte flexible 12 del mástil 1. Más específicamente, estos imanes 700 o 701 se disponen en un armazón 705 unido a la parte flexible 12, comprendiendo el armazón una pluralidad de brazos (tres brazos en la realización mostrada en las figuras 19A y 19B). En la figura 19A, unos imanes esféricos o parcialmente esféricos 700 se disponen en correspondencia con los extremos de los brazos del armazón. En la figura 19B, se muestra una realización alternativa, con imanes 701 que tienen una forma similar a una tira en el plano horizontal que se extiende a lo largo de los brazos. En la figura 17 se muestra esquemáticamente cómo los imanes con una forma esférica 702 o similar a una tira 703 correspondiente se disponen en la parte superior del segundo módulo de generador 400.

45 La Figura 17 muestra la parte flexible 12 en la posición neutral, es decir, extendiéndose verticalmente a lo largo del eje vertical 100. En este caso, los imanes de desplazamiento 700 (o 701) unidos al armazón 705 están cerca de los imanes desplazados 702 (o 703) dispuestos en la parte superior del segundo módulo de generador 400, desviando así el segundo módulo de generador hacia abajo. Durante el movimiento oscilante de la primera parte 1 que incluye la parte flexible 12, la distancia entre los imanes de desplazamiento 700/701 y los imanes desplazados 702/703 aumentará y disminuirá cíclicamente. Por otro lado, el segundo módulo de generador puede, debido a la manera en la que se suspende debido a la interacción entre los imanes 220 y 420 (y/o resortes) y opcionalmente entre los imanes 260 y 460 (y/o resortes) y debido a la gravedad, oscilar arriba y abajo. Durante cada ciclo de oscilación de la primera parte 1, la interacción entre los imanes de desplazamiento 700/701 y los imanes desplazados 702/703

proporciona repetitivamente un impulso al segundo módulo de generador 400, transfiriendo así energía de la primera parte 1 al segundo módulo de generador 400, lo que iniciará la oscilación y continuará oscilando, por lo que esta oscilación desplaza los imanes 300 en relación con las bobinas 50 y 500, generando energía eléctrica.

5 Se ha demostrado que esta disposición es una opción apropiada para la generación de energía eléctrica fuera del movimiento oscilante de la primera parte producido por los vórtices. Además, la realización descrita puede verse como especialmente ventajosa ya que no hay fricción entre las partes móviles, y no hay cojinetes de bolas que requieran lubricación. El uso de elementos de por ejemplo titanio, acero o fibra de carbono para interconectar físicamente el primer módulo de generador y el segundo módulo de generador puede ser una solución apropiada y
10 resistente, permitiendo un funcionamiento a largo plazo sin la necesidad de sustituir partes debido al desgaste, y sin ninguna necesidad de lubricación. El hecho de que el segundo módulo de generador pueda hacerse oscilar a una frecuencia superior a la frecuencia de oscilación de la primera parte puede ser útil para mejorar la eficacia de la conversión de energía representada por la oscilación de la primera parte, en energía eléctrica.

15 La disposición descrita de los imanes desplazados y de desplazamiento también puede considerarse especialmente ventajosa, ya que el desplazamiento lateral de los imanes de desplazamiento puede implicar que la duración de las altas fuerzas de repulsión entre los imanes de desplazamiento y los imanes desplazados es bastante corta, por lo que la transferencia de energía de la primera parte al segundo módulo de generador ocurre durante un período corto, de una forma similar a un impulso. La oscilación del segundo módulo de generador se determinará por un lado
20 por este impulso, es decir por la energía recibida desde la primera parte, y por la masa del segundo módulo de generador, por la amortiguación que ocurre debido a la extracción de energía eléctrica de las bobinas, por la rigidez de los miembros de conexión 105 y por las fuerzas de repulsión ejercidas por los imanes 220/420 y 260/460.

Por otra parte, tal y como se ha descrito más arriba, el documento WO-2012/017106-A1 propone que el diámetro del mástil aumente con la altura introduciendo la Ley exponencial de Hellmann según la cual la velocidad del aire
25 aumenta con la altura. De este modo los vórtices se podrían producir de manera sincronizada en todas las secciones del mástil. Ahora bien, en el documento WO-2012/017106-A1 no se ha tenido en cuenta la variación de la velocidad relativa del aire frente al mástil que se debe al propio movimiento del mástil.

30 La geometría del mástil debe diseñarse cuidadosamente para que los vórtices generados actúen de manera sincronizada en toda su longitud, de manera que se evite que los vórtices generados a una altura se anulen completa o parcialmente con los generados en otra altura. Para que la geometría del mástil realice un desempeño óptimo o adecuado no solo es necesario tener en cuenta el perfil de velocidades de aire presente en la zona de trabajo del dispositivo, sino que también es necesario tener en cuenta la propia oscilación del mástil, dado que la
35 oscilación del mástil influye en la velocidad relativa entre aire y mástil.

Tal y como se ha explicado anteriormente, en muchas realizaciones de la invención el mástil comprende un elemento rígido 11, sustentado o soportado por una varilla elástica 12, que en algunas realizaciones de la invención puede considerarse de sección constante y longitudinalmente isotrópica. Si esto es así, la posición A (véanse las
40 figuras 13A y 13B) de su extremo superior libre (es decir, el extremo superior de la zona en la que la deformación de la varilla no está limitada por su empotramiento en el elemento rígido) en cualquiera de sus planos radiales X-Y puede calcularse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x &= \frac{L}{\theta} \cdot (1 - \cos(\theta)) \\ y &= \frac{L}{\theta} \cdot \text{sen}(\theta) \end{aligned} \quad \text{e)}$$

45 donde L es la longitud de la zona deformable de la varilla (es decir, la parte de la varilla que no está empotrada en la base o en la parte rígida) y θ es el ángulo flexionado respecto de la vertical.

En las figuras 13C y 13D se observa cómo se puede trazar un segmento AA' de longitud l , con el extremo superior coincidente con el extremo libre superior de la varilla elástica y con un ángulo θ respecto de la vertical (véase la
50 figura 13D). La posición de A' viene dada por la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} x &= \frac{L}{\theta} \cdot (1 - \cos(\theta)) - l \cdot \text{sen}(\theta) \\ y &= \frac{L}{\theta} \cdot (\text{sen}(\theta)) - l \cdot \cos(\theta) \end{aligned} \quad \text{f)}$$

55 Se puede observar que para ángulos de flexión θ suficientemente pequeños, el valor de l para el que el

desplazamiento de A' sea mínimo durante una oscilación de la varilla resulta ser $l \approx \frac{L}{2}$ (véase la figura 14). Dada su "inmovilidad" frente a la flexión de este punto, en su posición se puede aplicar la fórmula de Von Karman. Se puede fijar como parámetro de diseño el diámetro d del mástil en el punto donde su desplazamiento producido por la oscilación es despreciable, a saber, a media altura de la parte flexible de la varilla:

5

$$f\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{S \cdot v\left(\frac{L}{2}\right)}{d} \quad g)$$

Para poder generalizar esta fórmula para cualquier valor de y , se puede suponer que a cualquier altura y , en el rango de Reynolds en el que el dispositivo va a trabajar, el valor de Strouhal es aproximadamente constante e

idéntico al valor que toma cuando $y = \frac{L}{2}$. Se puede fijar como objetivo que la frecuencia de aparición de vórtices permanezca constante a cualquier altura.

10

$$f(y) = f = \frac{S \cdot v_r(y)}{D(y)} = \text{constante} \quad h)$$

donde $v_r(y)$ es la velocidad relativa del aire (i) que incide sobre el mástil en movimiento. Esta velocidad relativa tiene dos componentes, una la velocidad absoluta del aire en relación con el suelo y otra la velocidad respecto del mástil originada por la oscilación del mismo. Como es obvio, la velocidad media de oscilación será cuatro veces la amplitud máxima de oscilación dividido entre el periodo (o multiplicado por su inversa, la frecuencia).

20

$$v_r(y) = (v^2(y) + (4 \cdot X(y) \cdot f)^2)^{\frac{1}{2}} \quad i)$$

siendo $X(y)$ la amplitud de la oscilación a cada altura y . Sustituyendo i) en la ecuación $h)$ y elevando al cuadrado, se obtiene:

25

$$f^2 = \frac{S^2 \cdot (v^2(y) + 16 \cdot X^2(y) \cdot f^2)}{D(y)^2} \rightarrow f^2 = \frac{S^2 \cdot v^2(y)}{D(y)^2 - 16 \cdot S^2 \cdot X^2(y)} \quad j)$$

Igualándolo al cuadrado de $g)$ se obtiene:

30

$$D^2(y) = \frac{d^2 \cdot v^2(y)}{v^2\left(\frac{L}{2}\right)} + 16 \cdot S^2 \cdot X^2(y) \quad k)$$

Para un dispositivo de altura total H y una amplitud "nominal" de oscilación máxima en su parte más elevada de β veces su diámetro en ese punto $X(H) = \beta \cdot D(H)$ y teniendo en cuenta que el mástil es considerado completamente rígido, se obtiene:

35

$$X(y) = \frac{y - \frac{L}{2}}{H - \frac{L}{2}} \cdot \beta \cdot D(H) \rightarrow X(H) = \beta \cdot D(H) \quad l)$$

Aplicando esto a la ecuación $k)$ para $y = H$ se obtiene:

$$D^2(H) = \frac{d^2 \cdot v^2(H)}{v^2\left(\frac{L}{2}\right)} + 16 \cdot S^2 \cdot \beta^2 \cdot D^2(H) \rightarrow D^2(H) = \frac{d^2 \cdot v^2(H)}{v^2\left(\frac{L}{2}\right) \cdot (1 - 16 \cdot S^2 \cdot \beta^2)} \quad m)$$

Combinando esto con las ecuaciones l) y k) se obtiene:

$$D^2(y) = \frac{d^2}{v^2\left(\frac{L}{2}\right)} \left[v^2(y) + \frac{16 \cdot S^2 \cdot \beta^2}{(1 - 16 \cdot S^2 \cdot \beta^2)} \cdot \left(\frac{y - \frac{L}{2}}{H - \frac{L}{2}} \right)^2 \cdot v^2(H) \right] \quad n)$$

Finalmente:

$$D(y) = \frac{d}{v\left(\frac{L}{2}\right)} \cdot \left[v^2(y) + \frac{16 \cdot S^2 \cdot \beta^2}{(1 - 16 \cdot S^2 \cdot \beta^2)} \cdot \left(\frac{y - \frac{L}{2}}{H - \frac{L}{2}} \right)^2 \cdot v^2(H) \right]^{\frac{1}{2}} \quad o)$$

Esta expresión describe la variación de la dimensión característica de un mástil que genera en toda su longitud y de manera sincronizada vórtices teniendo en cuenta el perfil de velocidades de aire y la oscilación propia.

Para calcular $v(y)$ con $y = \frac{L}{2}$, $y = H$ o cualquier otro valor comprendido entre 0 y H , se pueden introducir expresiones que tratan de representar con diferente fidelidad la distribución de velocidades del aire con la altura. Normalmente podrá introducirse la ley exponencial de Hellmann para atmósferas neutras, la formulación asociada a la teoría de similitud de Monin-Obukhov para atmósferas neutras, estables e inestables, etc.

La figura 15 ilustra esquemáticamente la evolución con la altura del diámetro de un mástil de altura H para una amplitud de trabajo en su parte más alta de $\beta \cdot D(H)$ y un diámetro inferior d .

El diámetro d es un artefacto matemático útil para describir la evolución de diámetros (o de dimensiones características) del resto del mástil, pero no es necesario que el elemento rígido del mástil realmente exista como tal,

físicamente, a la altura $y = \frac{L}{2}$.

Las expresiones “primer módulo de generador” y “segundo módulo de generador” se usan para referirse a diferentes partes, tal como parte estacionaria y parte móvil, del conjunto a cargo de convertir energía cinética en energía eléctrica por desplazamiento relativo entre imanes o similar en relación con bobinas. El uso del término “módulo” no pretende indicar un carácter específicamente modular del generador.

En este texto, el término “imán” se refiere generalmente a un imán permanente, aunque cuando sea apropiado también se pueden usar electroimanes, como entiende fácilmente un experto en la materia.

En este texto, la palabra “comprende” y sus variantes (como “comprendiendo”, etc.) no deben interpretarse de forma excluyente, es decir, no excluyen la posibilidad de que lo descrito incluya otros elementos, etapas, etc.

Por otra parte, la invención no está limitada a las realizaciones concretas que se han descrito, sino que abarca también, por ejemplo, las variantes que pueden ser realizadas por el experto medio en la materia (por ejemplo, en cuanto a la elección de materiales, dimensiones, componentes, configuración, etc.), dentro de lo que se desprende de las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un generador de energía eléctrica, que comprende:

5 una primera parte (1) que tiene un primer extremo y un segundo extremo, estando configurado el primer extremo para anclarse en un punto de anclaje, siendo libre el segundo extremo de tal manera que la primera parte puede realizar un movimiento oscilante con respecto al punto de anclaje, estando configurada la primera parte para situarse en un fluido y configurada para, cuando el fluido se mueve, generar vórtices en el fluido de manera que se genere una fuerza de sustentación sobre la primera parte (1) que produce un movimiento de oscilación y bamboleo de la primera parte (1) con respecto al punto de anclaje, teniendo dicho movimiento de oscilación una amplitud; y
 10 una segunda parte (2) que rodea al menos parcialmente dicha primera parte (1);
caracterizado por que el generador comprende un sistema de generación de un campo magnético que produce una fuerza de repulsión magnética entre la primera parte (1) y la segunda parte (2) que varía con el movimiento de oscilación de la primera parte (1) y que tiene un valor máximo que aumenta cuando aumenta la amplitud del movimiento de oscilación de la primera parte (1).

20 2. El generador de la reivindicación 1, en donde el sistema de generación de un campo magnético comprende al menos un primer imán (30) asociado a la primera parte (1) y al menos un segundo imán (40) asociado a la segunda parte (2), estando dicho al menos un primer imán (30) y dicho al menos un segundo imán (40) dispuestos de tal manera que se repelen mutuamente y dispuestos de manera que cuando se produce el movimiento de oscilación de la primera parte, la distancia entre dicho al menos un primer imán y dicho al menos un segundo imán varía de acuerdo con dicho movimiento de oscilación.

25 3. El generador según la reivindicación 2, en donde dicho al menos un primer imán (30) comprende al menos dos partes diametralmente opuestas, y en donde dicho al menos un segundo imán (40) comprende al menos dos partes diametralmente opuestas, enfrentadas a dichas al menos dos partes diametralmente opuestas de dicho, al menos un, primer imán (30).

30 4. El generador según la reivindicación 3, en donde dicho al menos un primer imán está configurado como al menos un anillo (30).

35 5. El generador según cualquiera de las reivindicaciones 3 o 4, en donde dicho al menos un segundo imán (40) está configurado como al menos un anillo.

40 6. El generador según cualquiera de las reivindicaciones 2-5, en donde dicho al menos un primer imán (30) comprende una pluralidad de imanes (30) dispuestos a diferentes alturas sobre una base del generador, y en donde dicho al menos un segundo imán (40) comprende una pluralidad de imanes (40) dispuestos a diferentes alturas sobre la base del generador.

45 7. El generador según cualquiera de las reivindicaciones 2-6, en donde dicho al menos un primer imán (30) comprende una primera pluralidad de imanes (30) dispuestos sustancialmente adyacentes entre sí y con polaridades dispuestas de tal manera que el campo magnético producido por dicha primera pluralidad de imanes (30) es más fuerte en un lado de dichos imanes enfrente de dicho al menos un segundo imán (40) que en un lado opuesto, y/o
 50 en donde dicho al menos un segundo imán (40) comprende una segunda pluralidad de imanes (40) dispuestos sustancialmente adyacentes entre sí y con polaridades dispuestas de tal manera que el campo magnético producido por dicha segunda pluralidad de imanes (40) es más fuerte en un lado enfrente de dicho al menos un primer imán (30) que en un lado opuesto.

8. El generador según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 7 en donde el al menos un primer imán (30) y el al menos un segundo imán (40) están dispuestos de manera inclinada en relación con un eje longitudinal de la primera parte.

55 9. El generador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la primera parte está dispuesta de tal manera que la amplitud del movimiento de oscilación aumenta con la velocidad del fluido, al menos dentro de un intervalo determinado de velocidades.

60 10. El generador según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 8, en donde la fuerza de repulsión entre el al menos un primer imán y el al menos un segundo imán es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el primer imán y el segundo imán, y en donde cuando la velocidad del fluido aumenta, la amplitud del movimiento de oscilación tiende a aumentar, por lo que los imanes tienden a acercarse durante una parte de aproximación máxima de cada ciclo oscilante, por lo que la fuerza de repulsión máxima producida entre el al menos un primer imán y el al menos un segundo imán en cada ciclo de oscilación aumenta de manera correspondiente, por lo que el incremento de la fuerza de repulsión aumenta la frecuencia de resonancia de la primera parte, por lo que la estructura del generador contribuye a un aumento automático en la frecuencia de resonancia de la primera parte cuando la
 65

velocidad del fluido aumenta, y viceversa.

5 11. El generador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la primera parte comprende una parte sustancialmente rígida (11) y otra parte sustancialmente flexible y elástica (12) para anclar en el punto de anclaje, de tal manera que, dada la flexibilidad y elasticidad de la parte sustancialmente flexible y elástica, la primera parte puede realizar un movimiento oscilante en relación con el punto de anclaje.

10 12. El generador según cualquiera de las reivindicaciones 2-8 y 10, que comprende un subsistema de imanes (30, 31, 32, 300) y al menos una bobina (50, 500), estando configurado el generador de manera que el movimiento de oscilación de la primera parte (1) produce un desplazamiento relativo entre el subsistema de imanes (30, 31, 32, 300) y dicha al menos una bobina (50, 500), de manera que una fuerza electromotriz se genera en dicha al menos una bobina (50, 500).

15 13. El generador según la reivindicación 12, en donde el subsistema de imanes incluye dicho al menos un primer imán (30).

20 14. El generador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la primera parte (1) comprende un mástil oscilante, y en donde la segunda parte (2) comprende una estructura estática situada en correspondencia con la base del mástil.

15. El generador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el incremento de la fuerza de repulsión aumenta la frecuencia de resonancia de la primera parte (1).

25 16. Un método para hacer que un generador de energía eléctrica se sintonice con la velocidad del viento, comprendiendo el generador de energía eléctrica:

30 una primera parte (1) que tiene un primer extremo y un segundo extremo, estando anclado el primer extremo a un punto de anclaje y estando libre el segundo extremo, configurándose así la primera parte (1) para ubicarse en un fluido y configurada de manera que, cuando el fluido se mueve, genera vórtices en dicho fluido, por lo que una fuerza de sustentación se genera en la primera parte (1), lo que produce un movimiento oscilante y de bamboleo de la primera parte (1) en relación con el punto de anclaje, y una segunda parte (2) que rodea, al menos parcialmente, dicha primera parte;

35 comprendiendo el método la etapa de disponer al menos un primer imán (30) en la primera parte y al menos un segundo imán (40) en la segunda parte (2), de manera que dicho al menos un primer imán (30) y dicho al menos un segundo imán (40) se repelen entre sí, en donde la fuerza de repulsión magnética entre la primera parte (1) y la segunda parte (2) varía con el movimiento de oscilación de la primera parte (1) y tiene un valor máximo que aumenta cuando la amplitud del movimiento de oscilación de la primera parte (1) aumenta, por lo que el aumento de la fuerza de repulsión aumenta la frecuencia de resonancia de la primera parte (1).

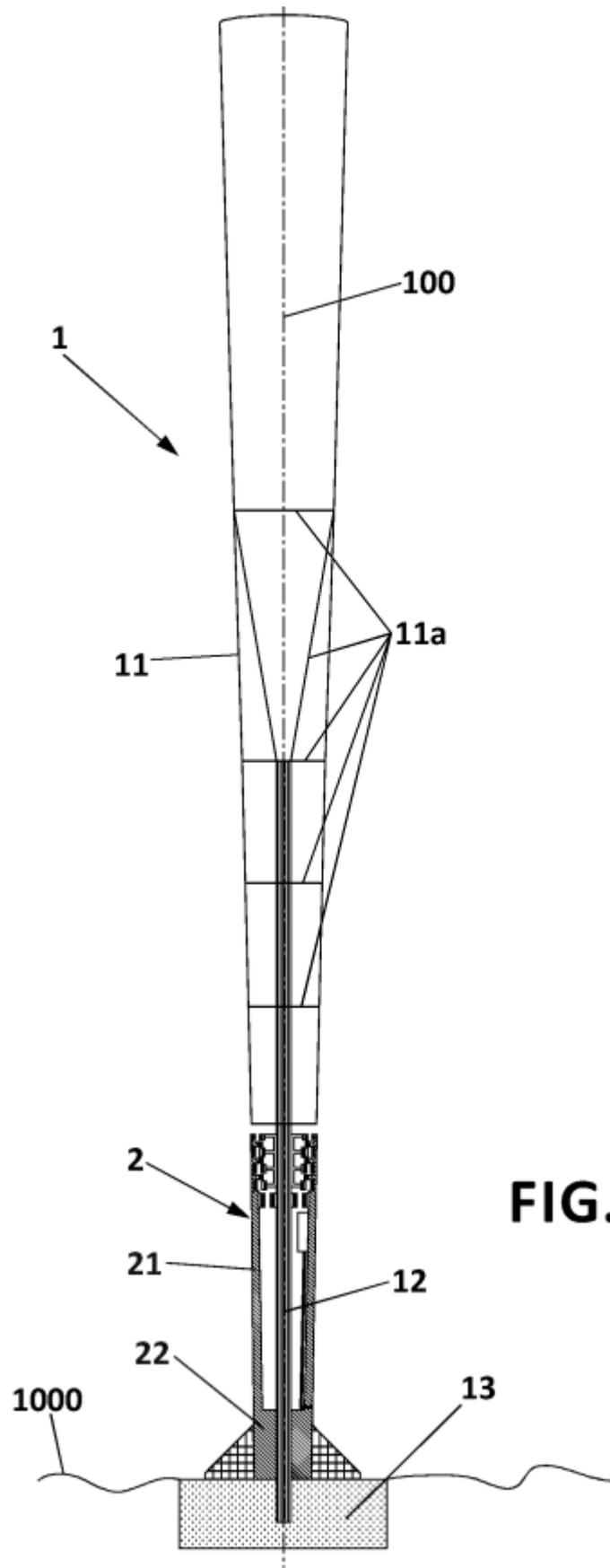


FIG. 1

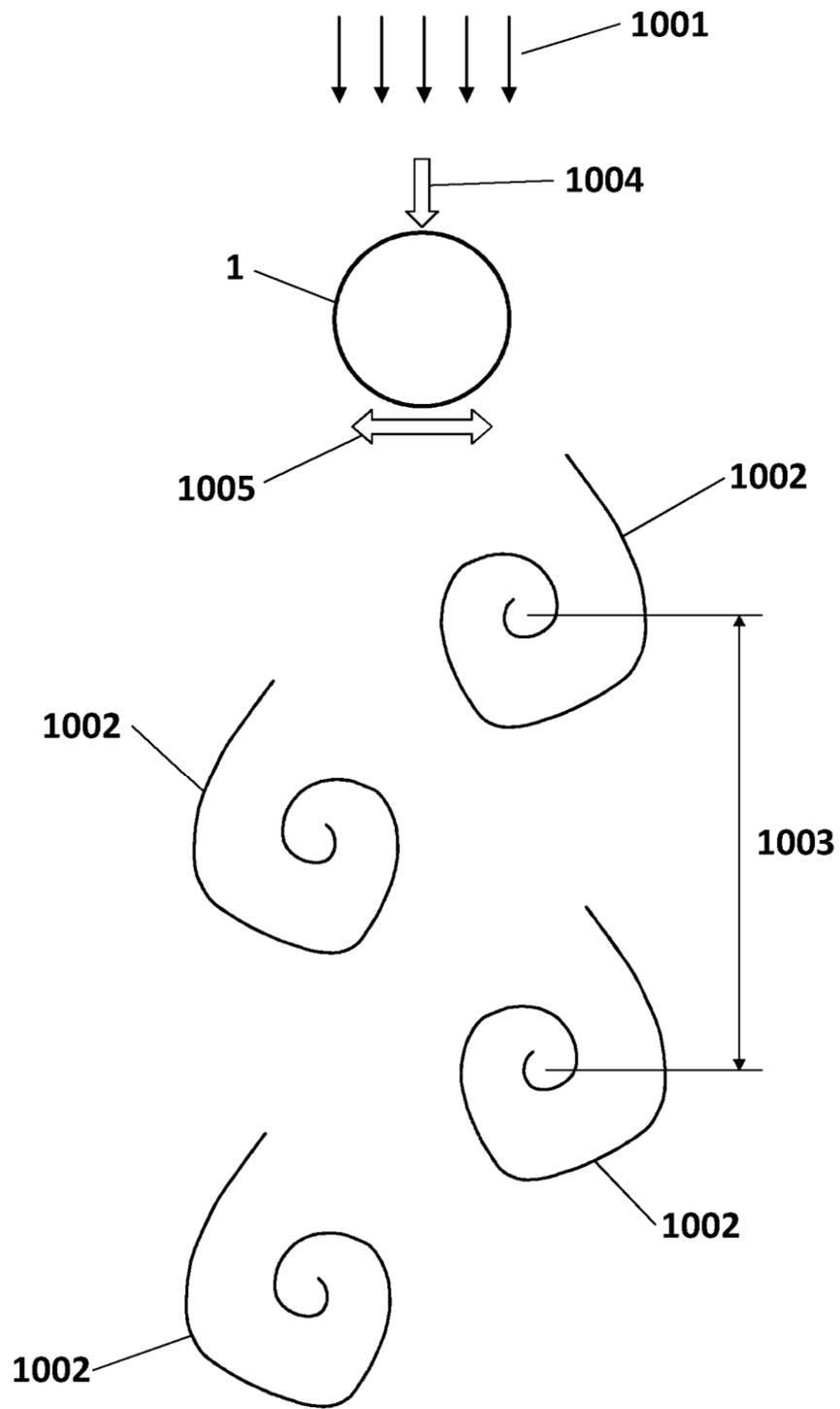


FIG. 2

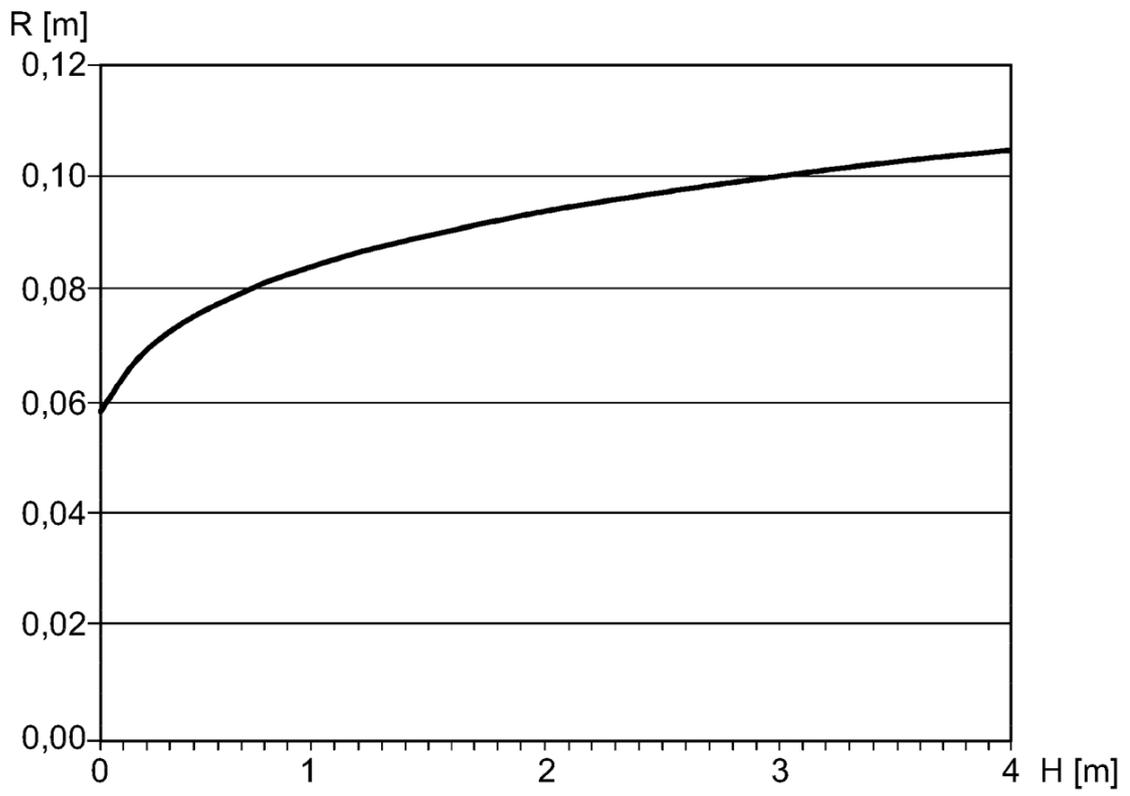


FIG. 3

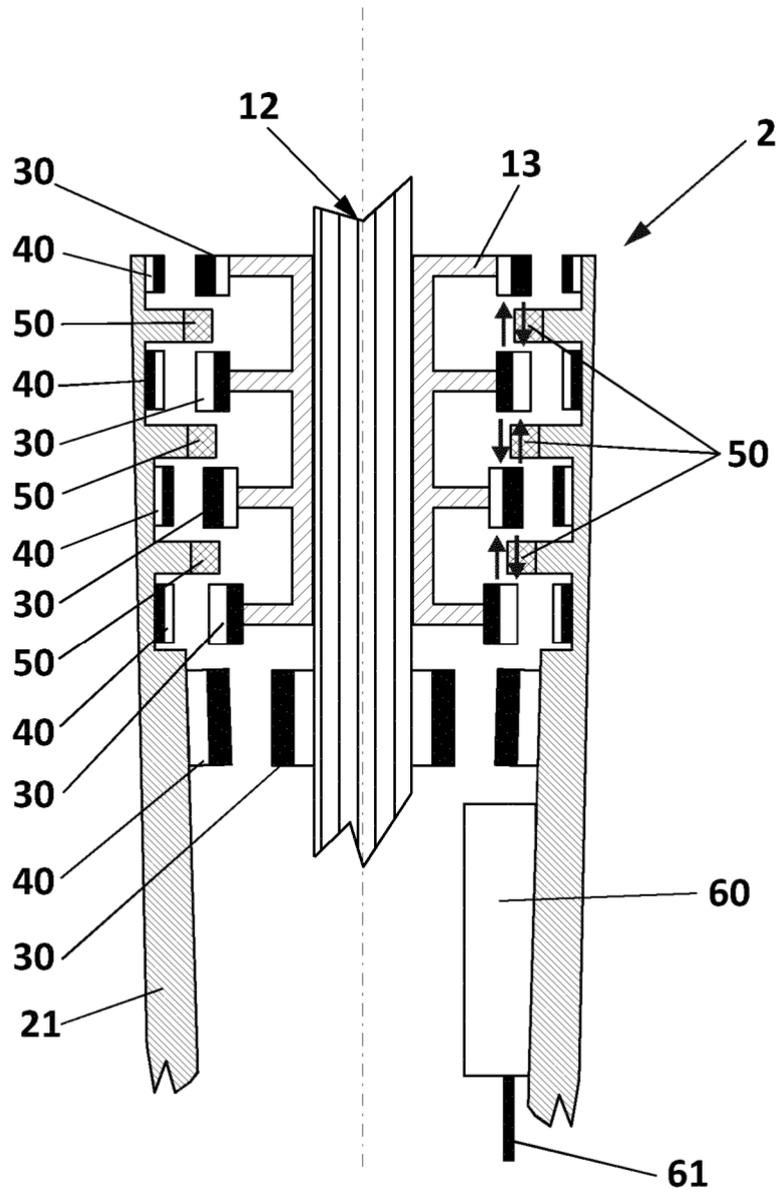


FIG. 4

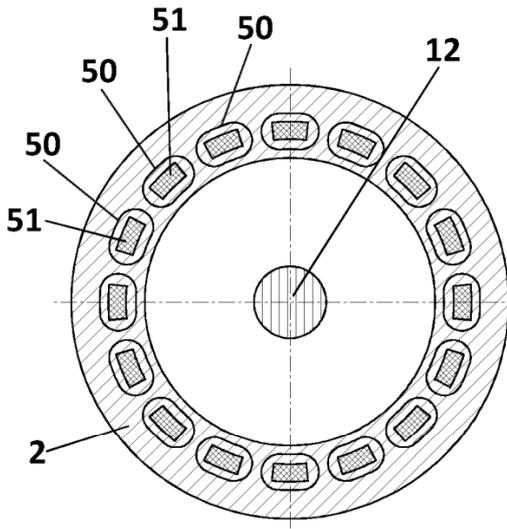


FIG. 5

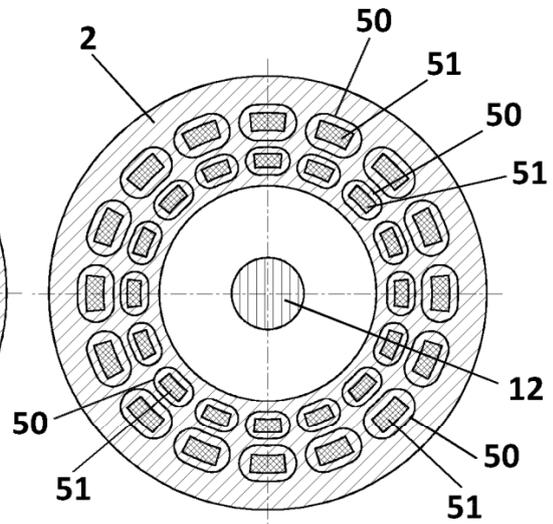


FIG. 6

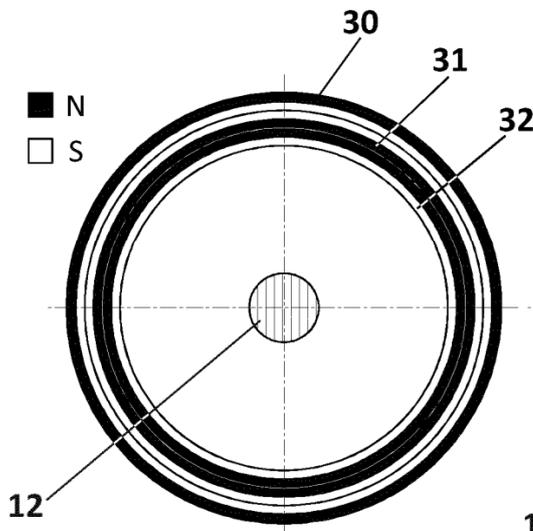


FIG. 7

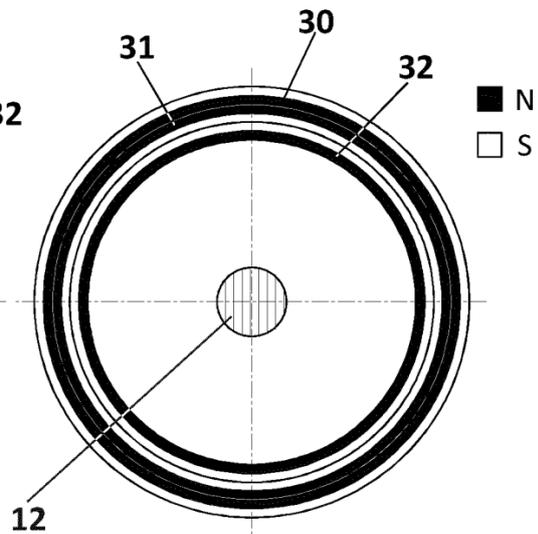


FIG. 8

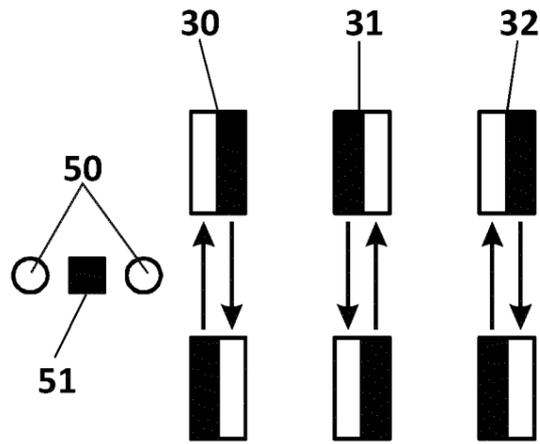


FIG. 9

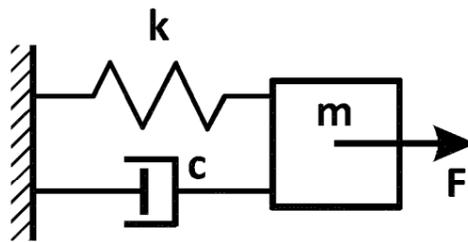


FIG. 10A

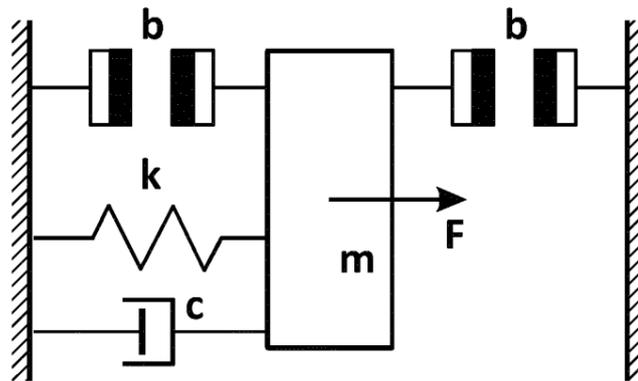


FIG. 10B

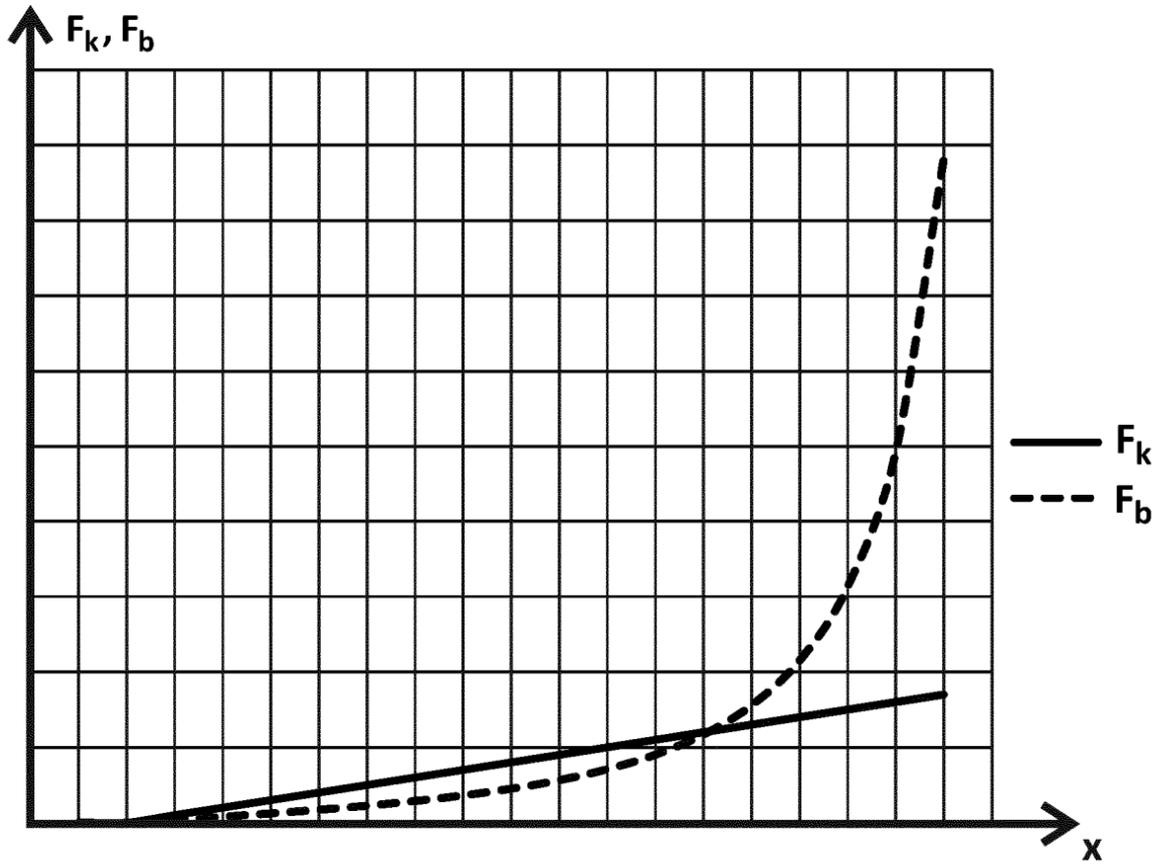


FIG. 11

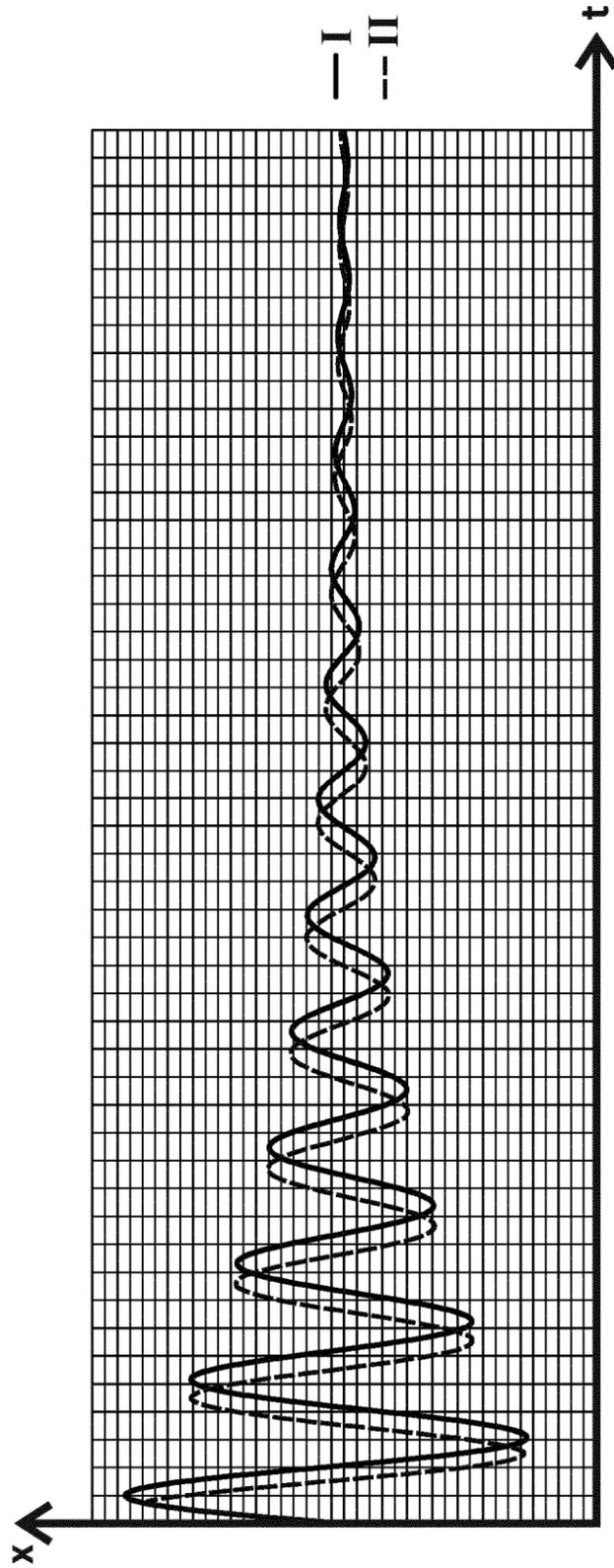


FIG. 12

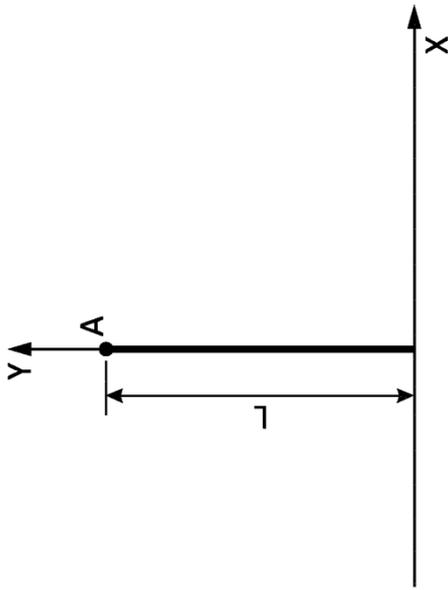


FIG. 13A

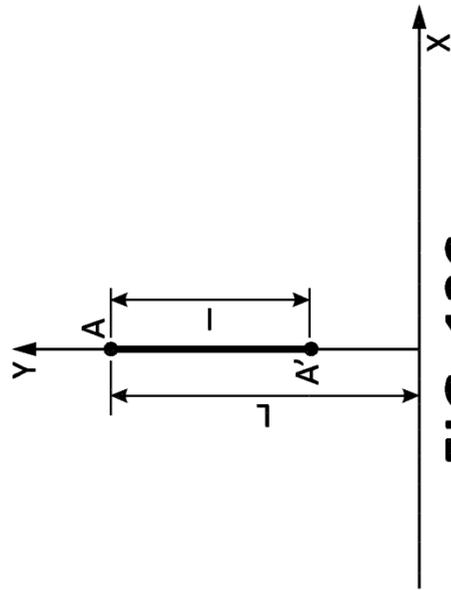


FIG. 13C

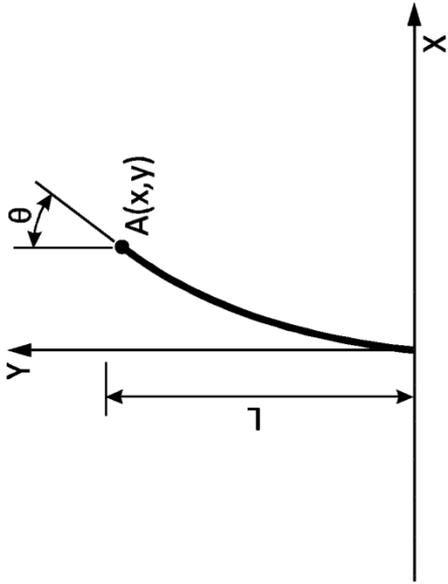


FIG. 13B

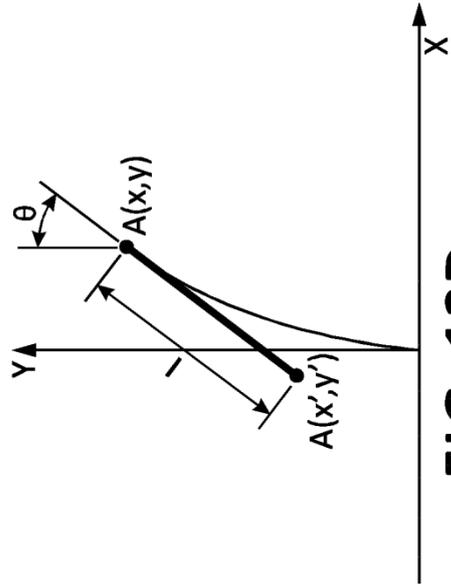


FIG. 13D

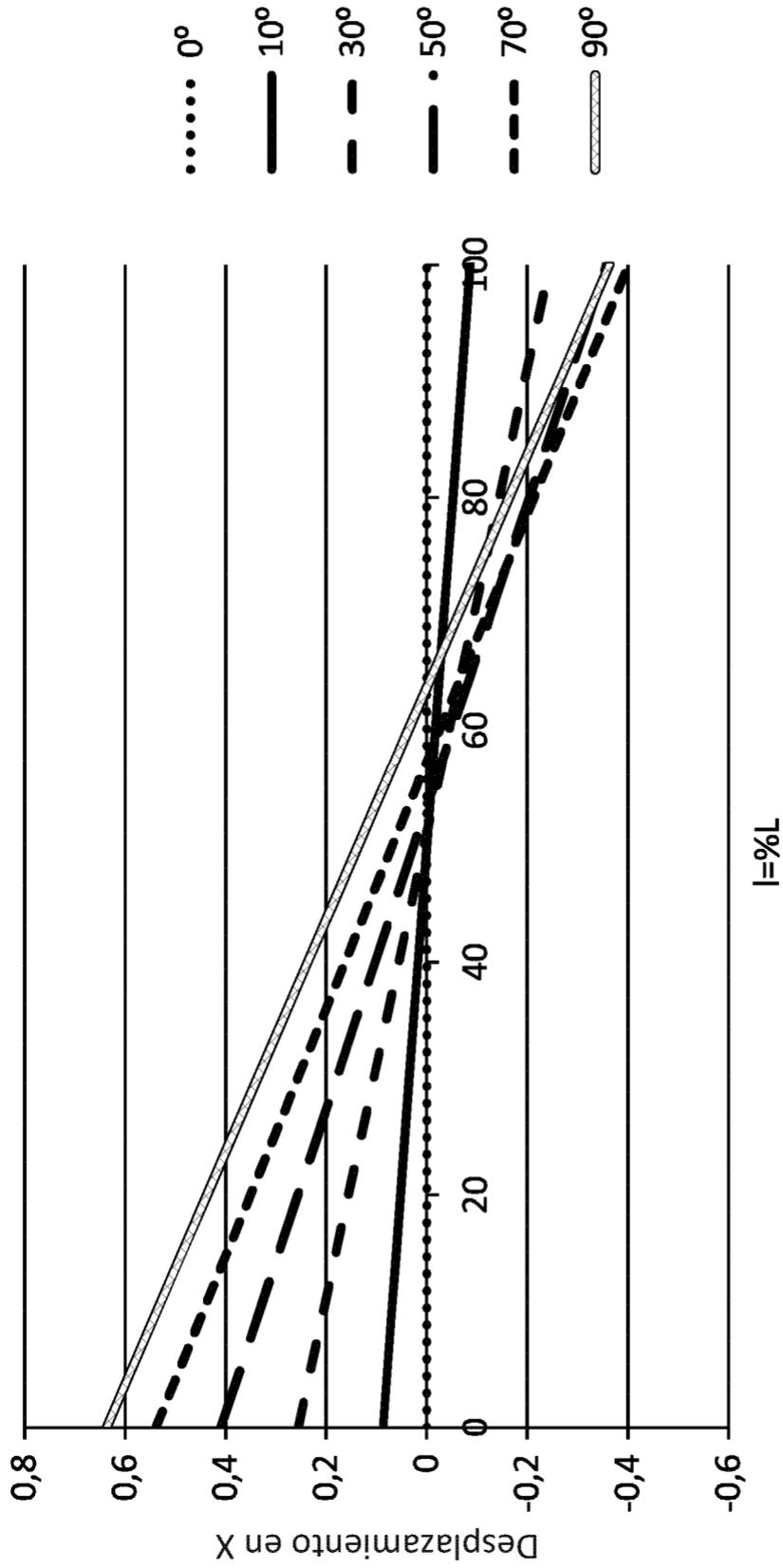


FIG. 14

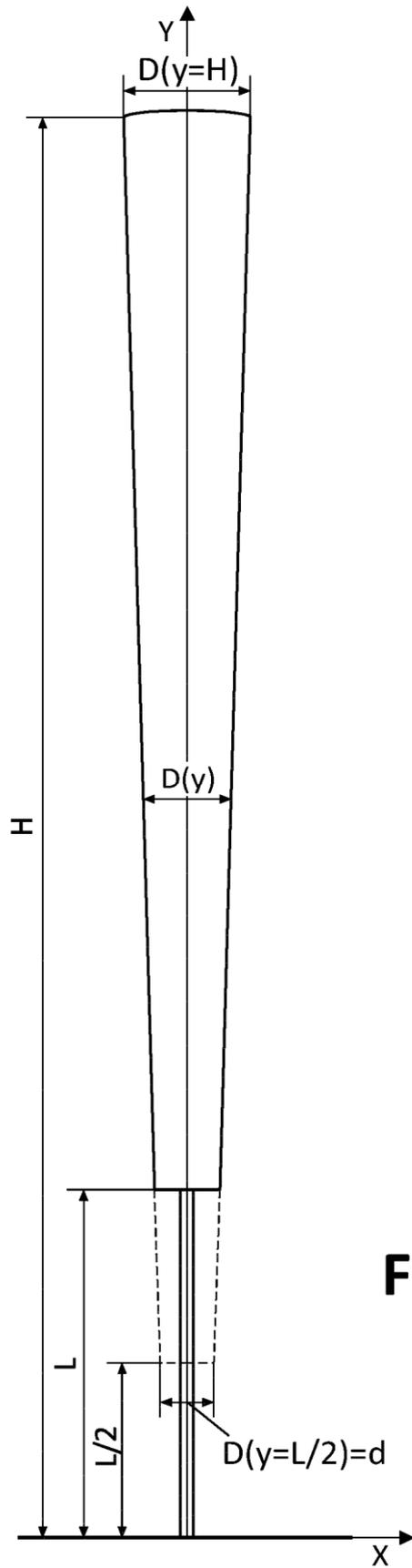


FIG. 15

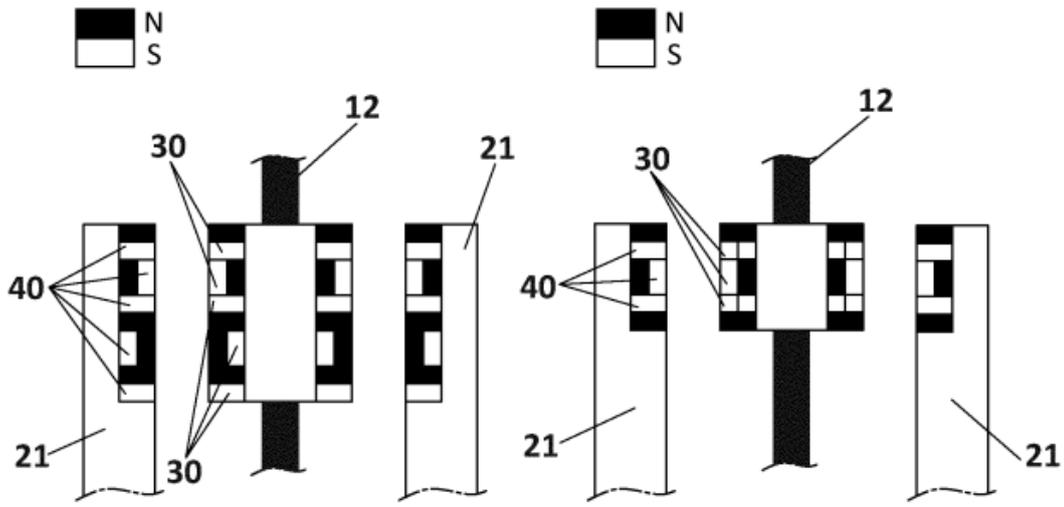


FIG. 16A

FIG. 16B

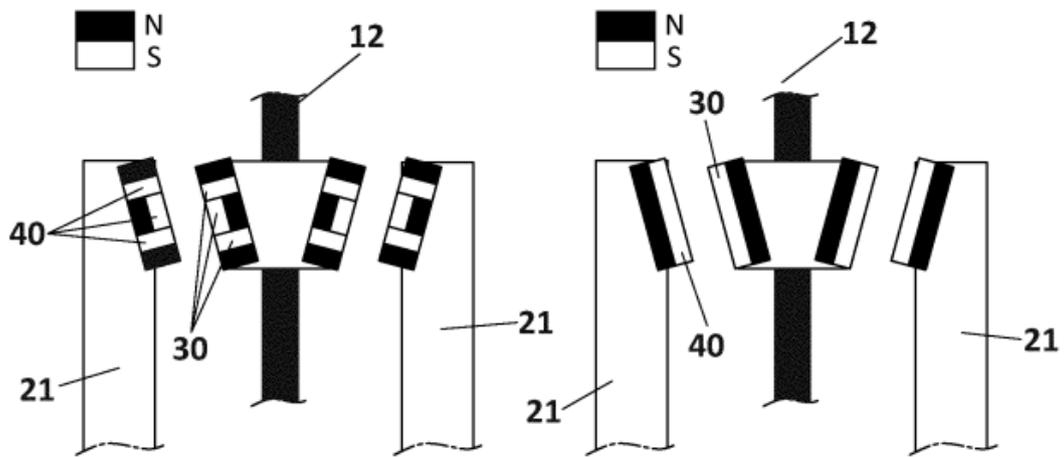


FIG. 16C

FIG. 16D

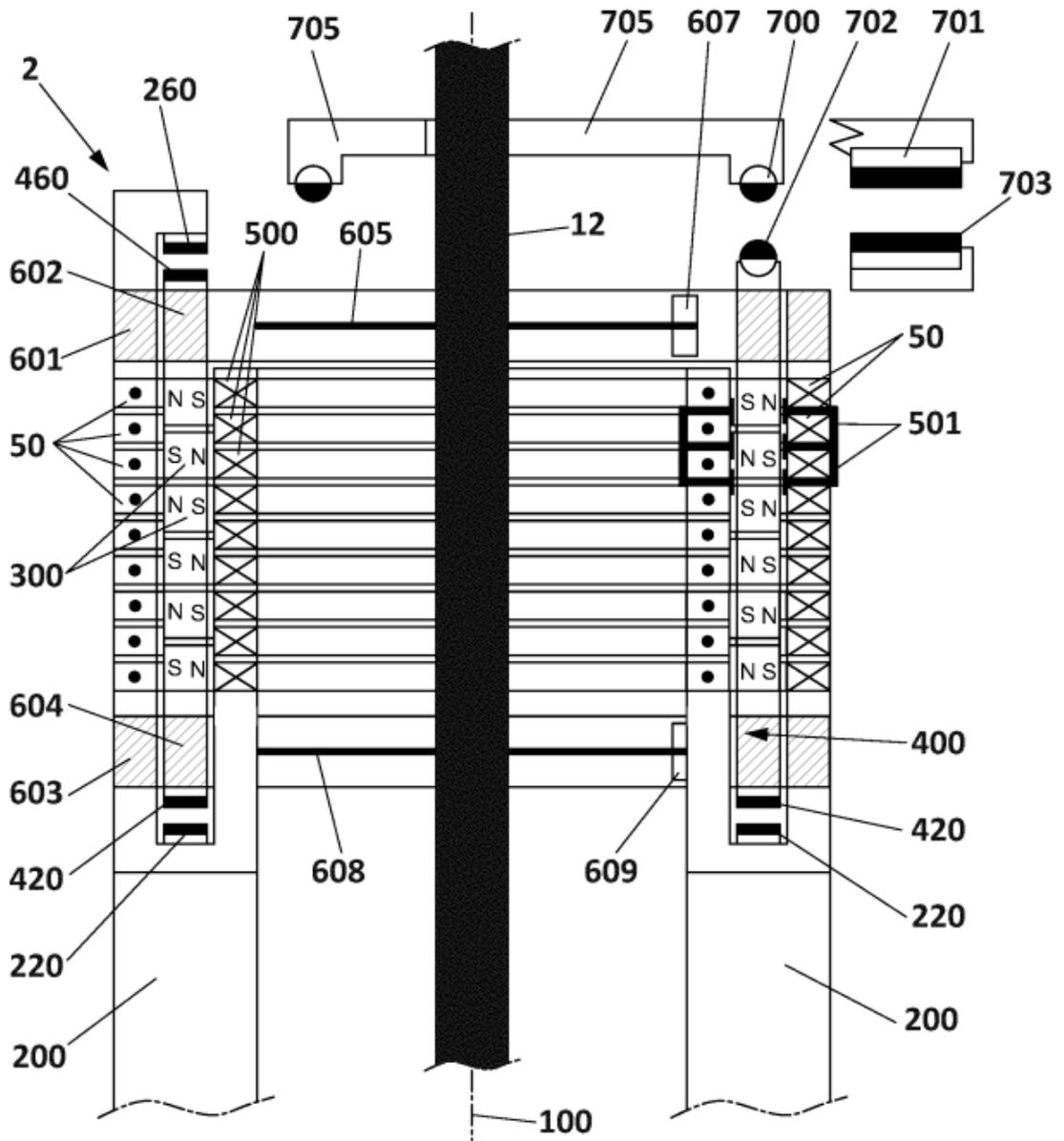


FIG. 17

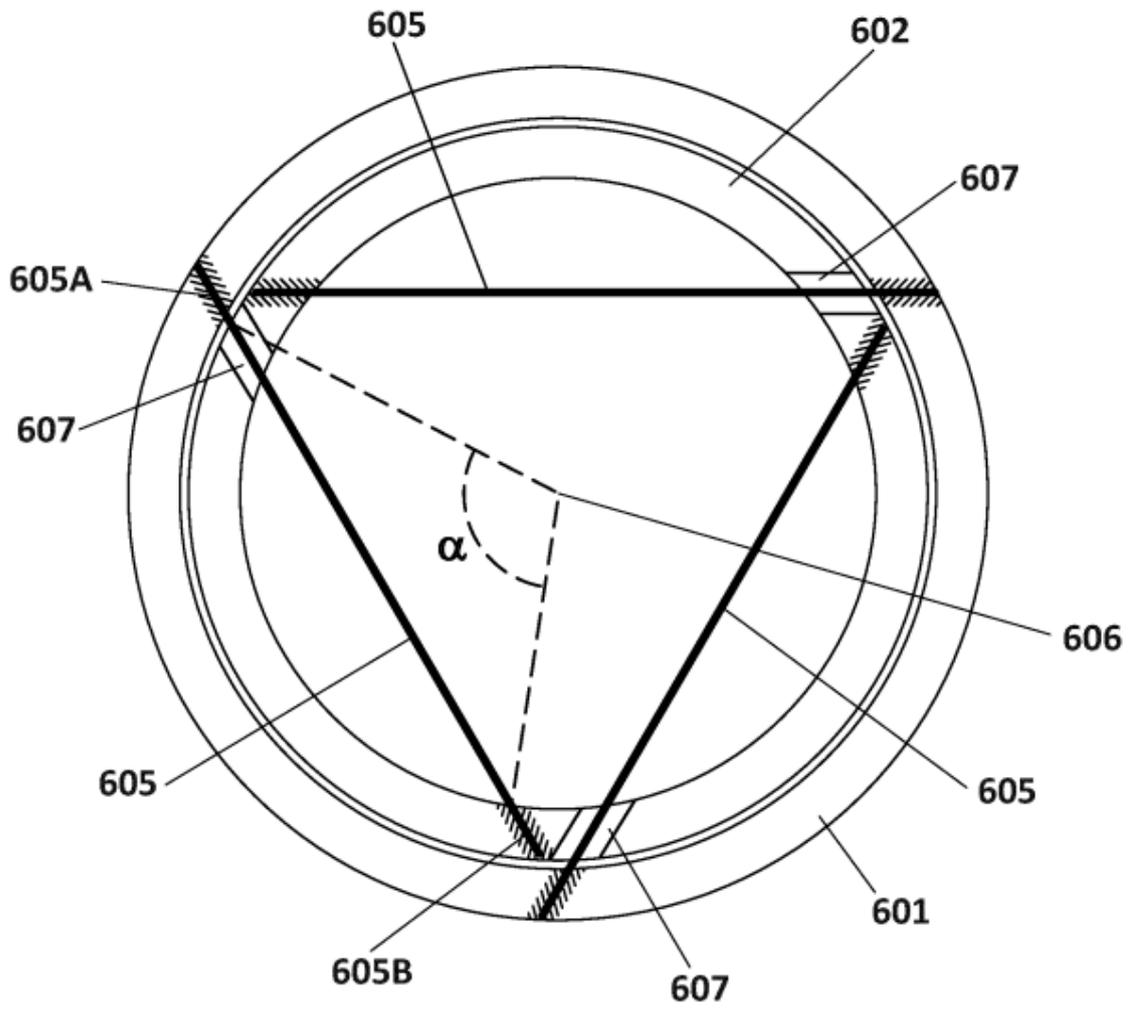


FIG. 18

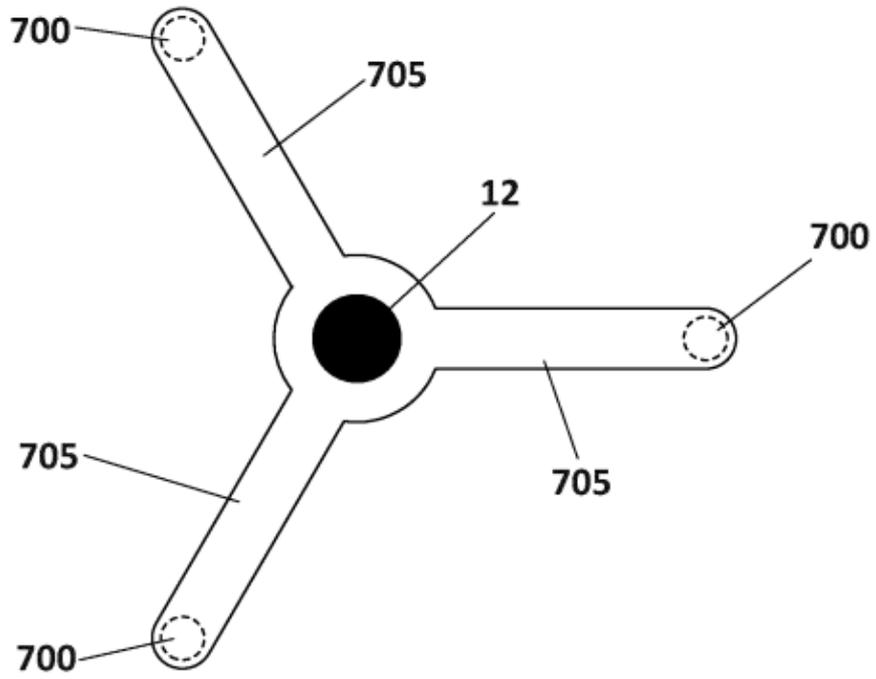


FIG. 19A

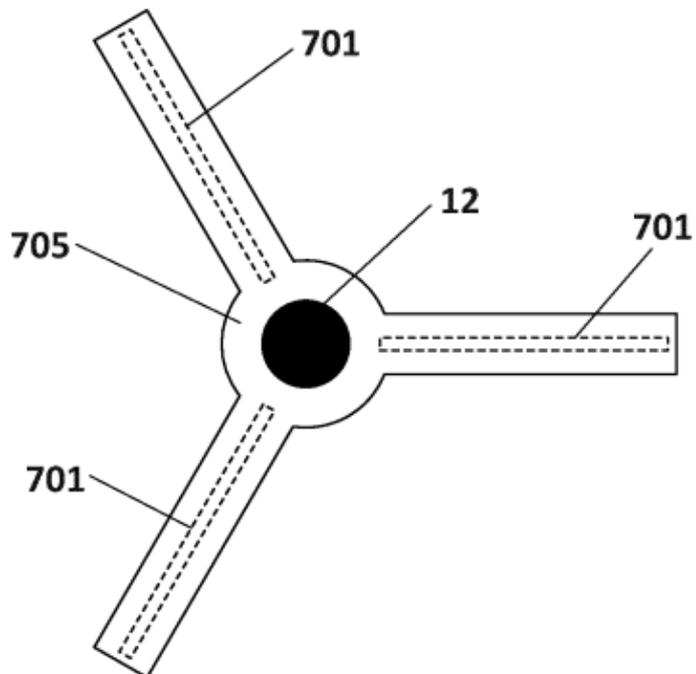


FIG. 19B