

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 596 514**

51 Int. Cl.:

**F03B 13/00** (2006.01)

**F03B 17/06** (2006.01)

**F03D 5/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.11.2013 PCT/EP2013/075118**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.06.2014 WO14090603**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.11.2013 E 13798338 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.07.2016 EP 2932091**

54 Título: **Convertidores de energía y sistemas de conversión de energía**

30 Prioridad:

**12.12.2012 ES 201231930**

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

**10.01.2017**

73 Titular/es:

**REPSOL, S.A. (50.0%)**

**C/ Méndez Álvaro, 44**

**28045 Madrid, ES y**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (50.0%)**

72 Inventor/es:

**BARRERO GIL, ANTONIO;**

**VELÁZQUEZ LÓPEZ, ÁNGEL GERARDO;**

**ARIAS PÉREZ, JUAN RAMÓN;**

**PRIETO ACEDO, ÓSCAR;**

**VICENTE LUDLAM, DAVID y**

**XU XU, JI**

74 Agente/Representante:

**ZEA CHECA, Bernabé**

ES 2 596 514 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

Convertidores de energía y sistemas de conversión de energía

- 5 La presente descripción se refiere a convertidores de energía y sistemas de conversión de energía. La presente descripción se refiere, más particularmente, a convertidores de energía y sistemas para convertir energía cinética desde un flujo de fluido en electricidad utilizando "*Galope Transversal*".

## ANTECEDENTES

- 10 Las vibraciones inducidas por el flujo (VIFs) tienen un gran interés en muchos campos de la tecnología y la ingeniería. El principal motivo es que pueden tener un efecto peligroso sobre las estructuras. Potencialmente pueden generar un nivel de oscilaciones inaceptable en una estructura, lo que puede poner en riesgo la integridad y/o la funcionalidad de la estructura. Históricamente, ingenieros y científicos han tratado, por lo tanto, de evitar las VIFs y/o minimizar sus efectos. Sin embargo, recientemente se ha demostrado que algunas VIFs pueden utilizarse para  
15 extraer energía del flujo.

- Los ejemplos de la presente invención se basan en el uso de un fenómeno de vibración inducida por el flujo, que generalmente se denomina Galope Transversal (GT). En el pasado se han considerado también otras vibraciones inducidas por el flujo tales como, por ejemplo, el fenómeno de vibraciones inducidas por vórtices (VIV) o "*flutter*",  
20 para la conversión de energía y la producción de electricidad.

## Vibraciones inducidas por vórtices:

- Cuando un cuerpo elástico no fuselado se encuentra bajo la acción de un flujo de fluido constante, para números de Reynolds suficientemente elevados (por ejemplo, superior a 50), el flujo se separa de la superficie del cuerpo  
25 generando una amplia estela inestable. Típicamente, el patrón de flujo se caracteriza por dos capas de corte en cada lado del cuerpo que son inestables y se enrollan para formar vórtices. Estos vórtices se desprenden de la estela periódicamente con una frecuencia proporcional a la velocidad de flujo no perturbado. Existe una velocidad de flujo en la que el desprendimiento de vórtices tiene una frecuencia cercana a la frecuencia natural de las oscilaciones del cuerpo y, para valores suficientemente bajos de masa y propiedades mecánicas, pueden inducirse  
30 oscilaciones significativas en el cuerpo. Cuando el cuerpo oscila, se desarrolla una compleja interacción entre el cuerpo oscilante y el campo de flujo alrededor del mismo. Este fenómeno de resonancia no lineal se conoce como Vibración Inducida por Vórtices (VIV). La energía cinética de las oscilaciones, en teoría, puede transformarse en energía eléctrica mediante el uso de un convertidor eléctrico. Ejemplos de dispositivos de conversión de energía basados parcial o completamente en vibraciones inducidas por vórtices se han descrito en US 7.208.845, WO  
35 2012/066550 y US 6.424.079.

- Por lo menos uno de los inconvenientes relacionados con los convertidores de energía basados en vibraciones inducidas por vórtices es que la resonancia solamente se produce en un rango de velocidad del flujo de fluido relativamente estrecho. Por lo tanto, sólo puede obtenerse una eficiencia de conversión de energía relativamente  
40 buena en un rango muy estrecho de la velocidad del flujo de fluido. Además, la amplitud de oscilación máxima (que acciona directa o indirectamente la producción de electricidad) está inherentemente limitada.

"*Flutter*":

- El "*flutter*" es una vibración inducida por el flujo que afecta a cuerpos aerodinámicos flexibles. Se trata de una inestabilidad inducida por el flujo (no una resonancia como VIV) y normalmente implica oscilaciones en dos grados de libertad, por ejemplo, transversal al flujo incidente, así como torsional (cabeceo). El "*flutter*" generalmente es un fenómeno de alta frecuencia de oscilaciones de amplitud relativamente pequeña. Por ejemplo, US 2009/0121489 y US7.986.051 describen convertidores de energía que utilizan "*flutter*". JP 2010096077 describe un procedimiento para convertir energía del agua en energía eléctrica en base al "*flutter*". US 2010/0143115 describe un procedimiento y un aparato para convertir energía cinética de una corriente de fluido en movimiento en trabajo útil basado en "*flutter*" mediante el uso de una cascada en paralelo de perfiles aerodinámicos o hidrodinámicos.  
50

- Un inconveniente relacionado con la conversión de energía basada en el fenómeno de "*flutter*" es que se trata de un fenómeno de alta frecuencia que provoca oscilaciones de pequeña amplitud. Esto en sí mismo puede hacer que la producción de electricidad resulte compleja. Por otra parte, la influencia del número de Reynolds (que indica la relación de fuerzas de inercia y fuerzas viscosas en el flujo) en las oscilaciones es muy significativo. Esto significa que solamente puede obtenerse una eficiencia de conversión de energía relativamente buena para condiciones de flujo específicas.  
55

- 60 Galope y Galope Transversal:

El Galope es un fenómeno bien conocido en el campo de la Ingeniería Civil. Comúnmente puede observarse en líneas de transmisión eléctrica de alta tensión cuando la acumulación de hielo en los cables modifica las secciones sustancialmente circulares originales de las líneas de transmisión. Una estela producida por una primera línea de

transmisión puede provocar que una línea de transmisión curso abajo inicie un galope. Este fenómeno se denomina comúnmente "*Galope por Estela*".

En estructuras delgadas con una masa relativamente pequeña, un coeficiente de amortiguación bajo, y que tienen una forma o sección transversal adecuada (tal como, por ejemplo, rectangular, triangular o una forma semicircular abierta (en forma de C, o en forma de D) el galope transversal puede producirse cuando la velocidad del flujo incidente supera un determinado valor crítico. A velocidades de flujo por encima de este valor crítico, el efecto estabilizador del amortiguamiento estructural (mecánico) es superado por el efecto desestabilizador de la fuerza del fluido, y un pequeño desplazamiento transversal del cuerpo crea una fuerza de fluido en la dirección del movimiento que tiende a aumentar la amplitud de vibración. Una vez que se supera el umbral de inestabilidad, se desarrolla un movimiento oscilatorio (que es principalmente transversal al flujo) con una amplitud creciente hasta que la energía disipada por ciclo a través la amortiguación mecánica equilibra la energía recibida por ciclo desde el flujo.

La amplitud y la frecuencia de oscilaciones estables depende de las propiedades geométricas y mecánicas del cuerpo (forma de la sección transversal, masa, frecuencia de oscilación natural y amortiguación mecánica), así como la velocidad del flujo incidente. Al aumentar la velocidad de flujo, sigue incrementando el aumento de la amplitud de las oscilaciones y, por lo menos en teoría, no hay límite superior.

Una ventaja significativa del Galope para la conversión de energía y la producción de electricidad respecto a, por ejemplo, vibraciones inducidas por vórtices, es que las oscilaciones no se producen simplemente en un rango limitado de velocidad de flujo, sino que, en cambio, se producen a cualquier velocidad de flujo por encima de la velocidad de flujo crítica. Además, las amplitudes de las oscilaciones en el Galope pueden ser relativamente grandes, mientras que, en las vibraciones inducidas por vórtices, éstas pueden ser relativamente pequeñas. La relación de amplitud/longitud característica del cuerpo de galope puede llegar a 3 o 5 o 10. La longitud característica del cuerpo puede ser, por ejemplo, la anchura de la sección transversal del cuerpo. Para vibraciones inducidas por vórtices, puede darse una amplitud máxima posible para esta relación de aproximadamente 1.

Otro aspecto relevante es que la velocidad de flujo en la que se produce el galope transversal depende en gran medida de las propiedades mecánicas del cuerpo de galope. Como regla general, contra menor es la masa y la amortiguación mecánica, menor es la velocidad de flujo crítico para el galope. Para el objetivo de una eficiencia energética, esto es una gran ventaja, ya que puede controlarse en cierta medida (por ejemplo, mediante la elección apropiada de las propiedades mecánicas) la velocidad de flujo en la que tendrá lugar el galope.

Además, el Galope Transversal es mucho menos dependiente de los números de Reynolds que otras vibraciones inducidas por el flujo que se ha descrito aquí. Esto significa que los convertidores de energía basados en Galope Transversal pueden aumentarse de escala más fácilmente.

Estudios teóricos previos desarrollados por el inventor Barrero-Gil (Barrero-Gil y otros, *Transverse Energy harvesting from Galloping*, *Journal of Sound and Vibration* 329.14 (2010), 2873-2883) han puesto de manifiesto que es posible, en principio, transferir eficientemente energía de un flujo de fluido a un prisma.

JP 2006-226221 describe convertidores de energía en base a galope transversal. Un cuerpo de vibración está montado en voladizo y la generación de electricidad se basa en la deformación de materiales piezoeléctricos. Por lo menos uno de los inconvenientes relacionados con esta disposición es que sería difícil y/o costoso obtener una conversión de energía a gran escala.

Anteriormente, "*Hydroelastic Oscillations of square cylinders*". Denis N. Bouclin, Universidad de Toronto 1975, estudió la interacción entre el desprendimiento de vórtices y las oscilaciones de tipo galope de cilindros cuadrados inmersos en una corriente de agua. Bouclin no reconoció las posibilidades de la extracción de energía de un flujo de fluido utilizando galope transversal. Más bien, la idea que hay detrás de la investigación de Bouclin era examinar el fenómeno con el fin de poder evitar los efectos negativos del galope transversal. Incluso si se hubiera reconocido la posibilidad de aprovechamiento de la energía, la puesta en marcha experimental difícilmente habría sido útil para este propósito. En los experimentos llevados a cabo por Bouclin, un cilindro cuadrado oscilante va guiado a lo largo de una guía utilizando unos cojinetes de aire con un coeficiente de amortiguación mecánica relativamente bajo. La forma cuadrada del cilindro tampoco está optimizada para galope transversal. Además, la relación de las densidades  $m^* = \rho_{\text{cuerpo de galope}} / \rho_{\text{fluido}}$  tampoco habría sido adecuada para este fin.

La presente descripción se refiere a varios procedimientos y sistemas para mejorar la conversión de energía (y la producción de electricidad) en base a vibraciones por Galope Transversal.

## DESCRIPCIÓN

En un primer aspecto, se dispone un convertidor de energía para convertir energía cinética de un cuerpo de líquido por galope transversal. El convertidor de energía comprende un soporte, un cuerpo de galope alargado que se

extiende entre un primer extremo y un segundo extremo y que presenta una sección transversal adecuada para galope transversal, una guía sustancialmente horizontal dispuesta fuera del cuerpo de líquido para guiar el primer extremo del cuerpo de galope, uno o más medios elásticos dispuestos sustancialmente horizontales y conectados entre el cuerpo de galope y el soporte, y un generador que comprende un componente generador estático y un componente generador dinámico. El cuerpo de galope queda suspendido sustancialmente vertical de manera que el segundo extremo del cuerpo se extiende hacia el cuerpo de líquido, y el componente generador dinámico queda conectado operativamente al cuerpo de galope.

De acuerdo con este aspecto, puede conseguirse un movimiento de oscilación sustancialmente lineal del cuerpo de galope. Esta oscilación lineal puede ser de una amplitud relativamente grande, lo que puede facilitar la conversión de energía en electricidad, ya que pueden utilizarse tipos de generadores convencionales. Puesto que el cuerpo de galope queda suspendido verticalmente, y realiza un movimiento horizontal, el generador y otros componentes críticos pueden disponerse fuera del cuerpo de líquido. El cuerpo de líquido puede ser típicamente el mar, un océano o un río. Al disponer componentes críticos fuera del líquido (por ejemplo, agua salada del mar), el desgaste (por ejemplo, la corrosión) de tales componentes puede evitarse o reducirse.

Una ventaja de utilizar un flujo de líquido (por ejemplo, agua) en lugar de un flujo de aire es que el flujo de líquido puede ser menos variable en el tiempo y más predecible. De este modo, el cuerpo de galope puede optimizarse de manera fiable para un flujo de líquido y un lugar específico. Otra ventaja es que la densidad de un líquido generalmente puede ser mucho más alta que la del aire haciendo que el galope transversal sea más pronunciado y, además, el contenido de energía de un flujo de líquido (agua) es mayor que el de una corriente de aire a la misma velocidad de flujo.

En base a un análisis linealizado (es decir, simplificado), una sección transversal adecuada (o forma adecuada) para el galope en este sentido se simplifica como una sección transversal que da una forma tal que satisface el criterio de "Den Hartog":

$\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D < 0$ , donde  $C_L$  es el coeficiente de sustentación,  $C_D$  es el coeficiente de arrastre y  $\alpha$  es el ángulo de ataque.

En algunas realizaciones, los medios elásticos pueden ser medios de muelle. Por ejemplo, puede conectarse uno o más muelles a una parte del cuerpo de galope, en un extremo de un muelle, y a la estructura de soporte, en el otro extremo del muelle. Los medios elásticos también pueden estar formados, por ejemplo, por un material elástico adecuado que pueda ser estirado durante el movimiento.

En general, el cuerpo de galope puede ser o comprender un prisma.

En algunos ejemplos, el soporte puede estar flotando en el cuerpo de líquido. El soporte (por ejemplo, una plataforma) puede estar anclado/amarrado en el fondo del mar o en el fondo de un río o de otra manera puede estar conectado a un punto adecuado, por ejemplo, en una orilla del río. En otros ejemplos, la estructura de soporte puede ser fija. La estructura de soporte puede ser fija en el fondo de un río o el mar utilizando, por ejemplo, una estructura monopilar u otra estructura de pilares en una base en el fondo de un río o el mar. En otro ejemplo, la estructura de soporte podría comprender unas patas que se encuentren situadas a cada lado de un río.

En algunos ejemplos, el componente generador dinámico está formado solidario del cuerpo de galope o unido al mismo. El cuerpo de galope puede accionar, de este modo, el generador directamente (o una transmisión entre el generador y el cuerpo de galope). Por ejemplo, puede conectarse un carro motorizado al primer extremo del cuerpo de galope, de modo que el carro motorizado pueda ir guiado a lo largo de la guía horizontal.

En otros ejemplos, el componente generador dinámico puede ser un segundo cuerpo conectado al soporte mediante uno o más medios elásticos. Estos medios elásticos pueden ser, una vez más, muelles u otros. Tal como es conocido, la oscilación de un cuerpo puede reducirse conectando elásticamente otro cuerpo al mismo. Por ejemplo, los sistemas que utilizan Amortiguadores de Masa Sintonizada se basan en este principio. Seleccionando apropiadamente la masa y la rigidez (elasticidad) de la conexión del segundo cuerpo, pueden reducirse o evitarse oscilaciones no deseadas. Sin embargo, si se diseña apropiadamente, puede utilizarse también un cuerpo secundario (o masa secundaria) para mejorar la conversión de la energía (en lugar de reducir las oscilaciones) respecto a un sistema de un único cuerpo. En estos ejemplos, el segundo cuerpo puede utilizarse para accionar el generador. Haciendo coincidir correctamente la masa del segundo cuerpo, así como la conexión elástica entre el cuerpo de galope y el segundo cuerpo, puede conseguirse una mejora de la eficiencia de la conversión de energía.

Podría alcanzarse de manera similar una mejora de la eficiencia de la conversión de energía en convertidores de energía en los que el propio cuerpo de galope acciona el generador (o la transmisión entre el cuerpo y el generador

de galope) y en el que un segundo cuerpo está acoplado elásticamente al cuerpo de galope. Las ganancias que pueden conseguirse incorporando el segundo cuerpo (segunda masa) dependen de nuevo de la masa del segundo cuerpo (en comparación con la masa del primer cuerpo), y la conexión elástica entre el primer y segundo cuerpo.

5 En algunas realizaciones, por lo menos una parte del cuerpo de galope (por ejemplo, un prisma) puede ser giratoria alrededor de un eje longitudinal del cuerpo de galope y el convertidor de energía comprende, además, un actuador para hacer girar la parte giratoria. Opcionalmente, el cuerpo de galope puede comprender una parte superior y una parte inferior, y en el que la parte inferior va montada de manera giratoria alrededor de la parte superior. Durante oscilaciones de galope estándar, el ángulo de ataque del cuerpo de galope respecto al flujo incidente varía  
10 continuamente (así como la fuerza del fluido a lo largo de la dirección de la oscilación). Existe un ángulo de ataque para el que la fuerza del fluido a lo largo de la dirección de la oscilación es máxima y la transferencia de energía entre la fuerza del fluido y el cuerpo oscilante también es máxima. Los inventores han encontrado que la conversión de energía puede mejorarse adaptando de manera sustancialmente continua el ángulo de cabeceo de la parte inferior del cuerpo de galope, es decir, la parte del cuerpo de galope en contacto con el líquido de modo que pueda  
15 garantizarse el ángulo de ataque óptimo durante mayores períodos de tiempo, o sustancialmente en todo momento.

También, en estas realizaciones, el cuerpo de galope puede adaptarse de una manera relativamente fácil para un cambio de dirección de flujo (por ejemplo, un flujo de marea). En otras realizaciones, la estructura de soporte podría ser giratoria o adaptable para adaptarse a condiciones del flujo variables.  
20

En algunas realizaciones, el convertidor de energía puede comprender un sistema de control de cabeceo para enviar comandos al actuador, en el que dichos comandos se basan en mediciones de la posición y/o velocidad del cuerpo de galope y la velocidad de flujo del cuerpo de líquido. En un ejemplo, el convertidor de energía puede incluir sensores para medir el desplazamiento y/o la velocidad del cuerpo de galope. Estos sensores podrían ser basados  
25 en láser, o podrían utilizarse acelerómetros adecuados. En algunos ejemplos, puede medirse tanto una posición como una velocidad por separado. En otros ejemplos, una de éstas (posición o velocidad) puede medirse directamente y la otra (velocidad o posición) puede derivarse a partir de esta medición.

Además, pueden utilizarse sensores adecuados para medir la velocidad de flujo de líquido (por ejemplo, medidores de flujo). En un ejemplo alternativo, puede suponerse que la velocidad de flujo de líquido es una constante conocida. Un microprocesador puede procesar los datos desde el (los) sensor(es) y enviar comandos adecuados al accionador, por ejemplo, un servomotor.  
30

En algunas realizaciones, el cuerpo de galope puede ser sustancialmente hueco. La masa/densidad del cuerpo de galope tiene una influencia significativa en el movimiento de galope. En base al conocimiento del campo del flujo de líquido, puede determinarse una masa/densidad adecuada. De acuerdo con la masa/densidad deseable, podrá decidirse hacer el cuerpo de galope sustancialmente hueco.  
35

En algunas realizaciones, el cuerpo de galope comprende, además, una placa extrema en su segundo extremo, que puede ser sustancialmente plana. Dicha placa extrema (plana) puede reducir los perjudiciales efectos dinámicos del líquido alrededor de la parte inferior del cuerpo de galope.  
40

En algunas realizaciones, la sección transversal del cuerpo de galope puede ser variable entre el primer extremo y el segundo extremo. En algunos ejemplos, la forma de la sección transversal del cuerpo de galope es sustancialmente constante entre el primer extremo y el segundo extremo, pero la sección transversal tiene dimensiones variables. Dependiendo del cuerpo de líquido en el cual se encuentra suspendido el cuerpo de galope, puede producirse un efecto de cizallamiento de la velocidad (es decir, una velocidad de líquido variable en función de la profundidad). Para compensar estos efectos de cizallamiento, la sección transversal del cuerpo de galope puede estar adaptada de manera que cada sección contribuya al galope sustancialmente en la misma cantidad.  
45  
50

En algunas realizaciones, la sección transversal del cuerpo de galope puede tener sustancialmente forma de C. En experimentos de laboratorio que han llevado a cabo los inventores, se encontró sorprendentemente que la forma en C para el cuerpo de galope produce resultados muy favorables cuando el flujo de líquido incide sobre el lado abierto de la forma de C.  
55

En algunas realizaciones, la resistencia del generador puede ser variable. El movimiento de galope y la eficiencia de conversión se ven influenciados por el coeficiente de amortiguación de la estructura de galope. Variando la resistencia (fuerza electromagnética aplicada directa o indirectamente por el generador al cuerpo de galope), se puede influir en la eficiencia de conversión.  
60

En otro aspecto, se dispone un sistema de conversión de energía que comprende una pluralidad de convertidores de energía de acuerdo con cualquiera de las realizaciones sustancialmente tal como se ha descrito anteriormente.

Otros objetivos, ventajas y características de realizaciones de la invención serán claros para los expertos en la materia tras examinar la descripción, o pueden derivarse al poner en práctica la invención.

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

5 A continuación se describirán realizaciones particulares de la presente invención por medio de unos ejemplos no limitativos, con referencia a los dibujos que se acompañan, en los cuales:

La figura 1 ilustra diversas secciones transversales adecuadas para cuerpos de galope de acuerdo con diferentes ejemplos de la presente invención;

10 La figura 2 ilustra un convertidor de energía de acuerdo con un ejemplo de la presente invención;

La figura 3 ilustra esquemáticamente una resistencia variable de un generador que puede utilizarse en algunos ejemplos de la presente invención;

La figura 4 sirve para ilustrar un procedimiento para controlar un ángulo de ataque de un cuerpo de galope de acuerdo con un ejemplo de la presente invención;

15 La figura 5 ilustra otro ejemplo de un convertidor de energía de acuerdo con la presente invención;

La figura 6 ilustra esquemáticamente todavía otro ejemplo de un convertidor de energía de acuerdo con la presente invención;

La figura 7 es una gráfica que ilustra resultados experimentales de la eficiencia medida por los inventores;

20 La figura 8 es una gráfica que ilustra resultados experimentales que proporciona una ilustración del efecto del control activo del cabeceo en un cuerpo de galope sobre la eficiencia de la conversión de energía;

La figura 9 ilustra un ejemplo de un cuerpo de galope con sección transversal variable de acuerdo con una realización de la presente invención; y

La figura 10 ilustra un sistema de conversión de energía de acuerdo con un ejemplo de la presente invención.

#### 25 DESCRIPCIÓN DETALLADA

La figura 1 ilustra esquemáticamente sólo algunos ejemplos de las formas que son adecuadas para galope transversal. Los ejemplos que se ilustran en la figura 1 incluyen una forma de C, una forma rectangular, una forma semicircular (cerrada) y una forma triangular. El signo de referencia U indica la dirección del flujo en el cual puede suspenderse el cuerpo de galope, mientras que el signo de referencia D indica la dimensión del cuerpo de galope (o prisma) en la dirección transversal (normal al flujo).

30

La figura 2 ilustra esquemáticamente un primer ejemplo de un convertidor de energía de acuerdo con la presente invención. El convertidor de energía 12 comprende una estructura de soporte 1, que puede estar flotando y puede anclarse/amarrarse, por ejemplo, en el fondo del mar o en el fondo de un río. En otro ejemplo, la estructura de soporte podría ser fija.

35

Un cuerpo de galope 2 en forma de prisma puede quedar suspendido verticalmente desde el soporte. El cuerpo de galope 2 está conectado a ambos lados de la estructura de soporte a través de unos muelles adecuados 5. En otros ejemplos, podrían utilizarse medios elásticos alternativos. En una alternativa adicional, podría utilizarse también un único muelle (es decir, una estructura de muelle solamente en un lado del cuerpo de galope). El cuerpo de galope podría tener cualquier sección transversal adecuada para el galope, en particular, podría tener cualquiera de las formas descritas anteriormente.

40

En un primer extremo (fuera del cuerpo de líquido) del cuerpo de galope, queda conectado un carro motorizado 3 el cual va guiado a lo largo de una guía horizontal 4. La guía horizontal puede quedar soportada sobre el soporte 1 por dos patas de apoyo, una en cada extremo, tal como se ilustra esquemáticamente en la figura 2. En este ejemplo, incluso si el soporte 1 está flotando en el cuerpo de líquido, entonces la guía horizontal puede disponerse todavía fuera del cuerpo de líquido.

45

El movimiento de galope resultante puede ser un movimiento oscilante sustancialmente horizontal. En los ejemplos ilustrados, los muelles están conectados al carro motorizado 3.

50

Además, se dispone un generador eléctrico. El generador eléctrico puede tener cualquier forma adecuada y puede ser, por ejemplo, lineal o rotativo. Un componente generador dinámico (por ejemplo, un rotor) puede ser accionado por medio del carro motorizado 3. En caso de movimiento rotativo del generador, puede disponerse una transmisión adecuada para transformar el movimiento oscilante horizontal en movimiento circular. Por ejemplo, puede emplearse un cigüeñal y un volante de inercia para utilizar un generador rotativo convencional. En el ejemplo ilustrado de la figura 2, el carro motorizado 3 soporta una o más bobinas 8 y la parte estática del componente es un imán permanente 9. El movimiento relativo de la bobina respecto al campo magnético puede inducir corrientes en las bobinas. En otro ejemplo ventajoso, la bobina puede ser un componente estático del generador, mientras que el cuerpo de galope 2 (o, en este caso, el carro motorizado 3) lleva los imanes permanentes.

55

60

En algunas realizaciones, el generador eléctrico puede sustituirse por otros medios para la conversión de energía, tales como, por ejemplo, un compresor.

Además, en la figura 2 se ilustra muy esquemáticamente una unidad de control 7. La unidad de control 7 puede comprender un microprocesador que reciba señales de sensores sobre la velocidad de flujo de líquido y/o el movimiento oscilante. En base a estas señales, podría adaptarse un control del generador para variar la resistencia electromagnética. En el caso de un generador rotativo, el par del generador puede adaptarse utilizando componentes electrónicos conocidos, tales como convertidores.

Cabe señalar que solamente está en contacto con el cuerpo de líquido el cuerpo de galope y una parte de la plataforma. El generador 6, y otros componentes críticos tales como, por ejemplo, la guía horizontal 4 o la unidad de control 7, se encuentran fuera del cuerpo de líquido. Por lo tanto, el rozamiento de la guía horizontal puede minimizarse más fácilmente. Y unos componentes (eléctricos) sensibles quedan mucho más protegidos, por ejemplo, de la corrosión.

La potencia media transferida desde el flujo de líquido con una velocidad U al cuerpo de galope oscilante viene dada por

$$P = \rho U^3 DL\eta/2, \quad (\text{Ec. 1.1})$$

donde  $\eta$  es la eficiencia de la transferencia de energía, D es una dimensión transversal característica del cuerpo de galope (por ejemplo, la anchura),  $\rho$  es la densidad del líquido y L es la longitud sumergida del cuerpo de galope.

Tal como se explica además en las publicaciones Barrero-Gil y otros ("*Transverse Galloping at low Reynolds numbers*", *Journal of Fluids and Structures* 25, 7 (2009), 1236 - 1242), Barrero-Gil y otros ("*Hysteresis in Transverse Galloping: The role of inflection points.*" *Journal of Fluids and Structures* 25,6 (2009), 1007- 1020), y tal como se explica en Barrero-Gil y otros ("*Transverse Energy harvesting from Galloping*, *Journal of Sound and Vibration* 329.14 (2010), 2873-2883") la amplitud normalizada del movimiento de galope en una operación en estado estacionario viene dada por:

$$A^* = \left( \frac{4U^*}{3a_3} (4m^* \xi - a_1 U^*) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{Ec. 1.2}) \text{ y}$$

la eficiencia de la transferencia de energía viene dada por:

$$\eta = 2a_1 \left( \frac{4m^* \xi - a_1 U^*}{3a_3 U^*} \right) + 6a_3 \left( \frac{4m^* \xi - a_1 U^*}{3a_3 U^*} \right) \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Aquí,  $a_1 > 0$  y  $a_3 < 0$  son constantes que caracterizan el flujo de líquido alrededor del cuerpo de galope que dependen de la forma del cuerpo de galope;  $m^*$  es la relación entre la densidad del líquido y la densidad del cuerpo de galope,  $\xi$  es un coeficiente de amortiguación mecánica adimensional del cuerpo de galope y  $U^*$  ("velocidad reducida") viene dada por la siguiente ecuación:

$$U^* = \frac{U}{\omega_n D}, \text{ donde } \omega_n \text{ es la frecuencia de oscilación natural del cuerpo de galope (en reposo y en el aire).}$$

Puede observarse que para valores  $U^* > U_G^* = 4 m^* \xi / a_1$  se produce galope transversal ( $A^* > 0$  y  $\eta > 0$ ). Aquí,  $U^*$  puede considerarse como la velocidad crítica del flujo de líquido para producir galope transversal.

La ecuación 1.3 determina la eficiencia de la transferencia de energía en función de las propiedades mecánicas y geométricas del cuerpo de galope, y la velocidad del flujo de líquido incidente. En base a la ecuación 1.3 puede derivarse que la eficiencia máxima que puede alcanzarse viene dada por

$$\eta_{\max} = - \frac{a_1^2}{6a_3} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

A continuación, se indican algunas consideraciones sobre el diseño y control para maximizar la conversión de energía. Si la eficiencia del generador es  $\eta_E$ , entonces la potencia eléctrica generada viene dada por:

$$P_E = \rho U^3 DL \eta_E / 2 \quad (\text{Ec. 1.5})$$

5 En el caso de generación electromagnética lineal con una bobina de longitud  $H$ , que tiene  $N$  vueltas, un campo magnético  $B$ , una resistencia eléctrica  $R_c$ , una resistencia eléctrica de la carga  $R_L$  (véase también la figura 3, en la cual se ilustra esquemáticamente un circuito que representa el generador electromagnético), y en la que una frecuencia angular es pequeña (lo que significa que el efecto de la inductancia  $L_c$  puede despreciarse), la potencia eléctrica viene dada por:

$$P_E = \frac{1}{T} \int_0^T R_L i^2 dt \quad (\text{Ec. 1.6), donde}$$

10  $T$  es un período de tiempo de promediado, e  $i$  es la corriente que pasa por la resistencia de carga.

La corriente viene dada por:

$$i = \frac{(NBH)x}{(R_L + R_c)} \quad (\text{Ec. 1.7), donde}$$

15  $x$  es la velocidad de oscilación de la bobina respecto a un imán (o viceversa). Si se supone que la velocidad relativa entre la bobina y el imán es igual a la velocidad de galope  $\dot{y}$ , entonces

$$P_E = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{R_L (NBH)^2 \dot{y}^2}{(R_L + R_c)^2} dt \quad (\text{Ec. 1.8), y}$$

$$20 \quad \eta_E = \frac{2P_E}{rU^3 DLh} \quad (\text{Ec. 1.9}).$$

25 La velocidad de oscilación del cuerpo de galope,  $\dot{y}$ , depende de las propiedades mecánicas (masa, rigidez y amortiguación) y de la forma de la sección transversal del cuerpo de galope, de la amortiguación introducida por el generador y de la velocidad del flujo de líquido incidente (véase la Ec. 1.2).

Hay que señalar que la amortiguación total  $\xi_T$  del sistema corresponde a la amortiguación del sistema sin conectar el generador  $\xi$  más la amortiguación introducida por el generador  $\xi_G$ , que viene dada por:

$$30 \quad \xi_G = \frac{(NBH)^2}{2m\omega_N(R_L + R_c)}$$

Las ecuaciones anteriores 1.8 y 1.9 muestran la importancia de controlar la resistencia (carga) del generador con el fin de mejorar el rendimiento del convertidor de energía.

35 En realizaciones preferidas, puede incorporarse un sistema de control para controlar  $R_L$  con el fin de mejorar de manera general la producción de electricidad, en particular en el caso de flujo de líquido incidente variable. Este sistema de control puede incluir por lo menos un sensor para medir la velocidad del flujo de líquido incidente. Este sensor puede ser de cualquier tipo adecuado y puede ser, por ejemplo, un medidor de flujo de tipo hélice.

40 La ecuación 1.8 lleva a la siguiente ecuación:

$$P_E = \frac{R_L (NBH)^2 A^{*2} \omega_N^2 D^2}{2(R_L + R_c)^2} \quad (\text{Ec. 1.10) donde}$$

45  $A^*$  puede determinarse a partir de la ecuación 1.2, en la que debe tenerse en cuenta que el coeficiente de amortiguamiento es la amortiguación total  $\xi_T = \xi + \xi_G$ . La Ec. 1.10 da, por lo tanto, una expresión matemática que permite vincular la resistencia del generador (carga) para mejorar/optimizar la producción de electricidad para unas propiedades mecánicas y geométricas determinadas del cuerpo de galope y una velocidad de flujo de líquido incidente. (Se observa que, para este fin, el máximo de  $P_E$  puede encontrarse mediante la diferenciación de  $P_E$  respecto a  $R_L$  y encontrando la  $R_L$  óptima igualando la función diferenciada a cero).

Además, las ecuaciones anteriores 1.2, 1.3 y 1.4 proporcionan una base para determinar un diseño de un convertidor de energía para un flujo de líquido determinado (que puede ser un flujo marino asociado al flujo de las mareas o el flujo de un río), seleccionando apropiadamente las propiedades geométricas y mecánicas del cuerpo de galope, así como las características del generador con el fin de lograr una elevada conversión de energía.

También se observa que, en algunas realizaciones, en lugar de o además de variar la carga del generador (resistencia), también puede adaptarse la rigidez de los medios elásticos. En estas realizaciones, los medios elásticos que conectan el cuerpo de galope al soporte pueden incorporar, por ejemplo, sistemas electroreológicos o magnetoreológicos para poder adaptar la rigidez de los medios elásticos.

La figura 4 sirve para ilustrar esquemáticamente un procedimiento para controlar un ángulo de ataque de un cuerpo de galope de acuerdo con un ejemplo de la presente invención. En algunas realizaciones, puede incorporarse un control de comportamiento activo (cabeceo) de una parte del cuerpo galope.

En base a extensas pruebas en un canal de recirculación de agua, los inventores han encontrado que el galope puede mejorarse de manera significativa variando de una manera sustancialmente continua el ángulo de ataque del cuerpo de galope (por ejemplo, un prisma). Se ha encontrado que las oscilaciones pueden aumentarse tanto en términos de amplitud como de frecuencia.

La ley óptima para variar el ángulo de ataque es una función de la oscilación del prisma que viene dada por

$$a_c(t) = c_1 \tan^{-1}(y/U), \quad (\text{Ec 1.11})$$

de modo que el ángulo de ataque efectivo viene dado por

$$a(t) = (1+c_1) \tan^{-1}(y/U). \quad (\text{Ec 1.12})$$

Para  $U^* < 1,3$ ,  $c_1 = 0,5$  y para valores mayores de  $U^* c_1 = 0,3$ .  $y$  es la velocidad de oscilación del prisma y  $U$  es la velocidad del flujo incidente.  $a_c = 0$  representa la situación en la que no hay actuación.

La figura 5 ilustra esquemáticamente otro ejemplo de un convertidor de energía. En este ejemplo, se incorpora un control de cabeceo de un cuerpo de galope. En la figura 5, el signo de referencia  $U$  se refiere al flujo de líquido incidente. Se dispone un cuerpo de galope (prisma) 22 sustancialmente vertical y, en este ejemplo, comprende una parte superior 22a y una parte inferior 22b. La parte superior 22a puede estar dispuesta sustancialmente fuera del cuerpo de líquido y puede ir guiada a lo largo de una guía horizontal. La parte inferior 22b se extiende necesariamente hacia el cuerpo de líquido. La parte inferior 22b está montada de manera giratoria en la parte superior 22a.

En este ejemplo se incorpora un control de cabeceo para controlar activamente el ángulo de ataque del cuerpo de galope en cualquier momento dado. El control de cabeceo puede comprender un servomotor 26 (con o sin engranajes reductores adecuados) para accionar un actuador 27. El actuador 27 puede ser un piñón que engrane con un engranaje anular dispuesto en la parte inferior 22b del cuerpo de galope. Al accionar el piñón, la parte inferior 22b gira alrededor de la parte superior 22a y el ángulo de ataque del flujo de líquido incidente puede controlarse activamente. En otro ejemplo, el accionamiento de giro puede conseguirse mediante otras técnicas adecuadas, tales como, por ejemplo, actuadores hidráulicos.

Otro aspecto de este sistema de control de cabeceo es que éste puede ajustar el cuerpo de galope a cambios en la dirección de flujo (por ejemplo, flujo de mareas).

El signo de referencia 24 se refiere a la guía sustancialmente horizontal ilustrada esquemáticamente que guía el cuerpo de galope 22 y el signo de referencia 29 indica una parte del soporte del convertidor de energía que incorpora la guía 24.

La figura 6 ilustra esquemáticamente otro ejemplo de un convertidor de energía. Un cuerpo de galope 2 en forma de prisma que tiene una sección transversal en forma de "C abierta" puede quedar sustancialmente suspendido verticalmente de una parte de un soporte 1 de manera que por lo menos una parte inferior del cuerpo de galope se extiende hacia un cuerpo de líquido. Mediante el signo de referencia 10 se indica un flujo de líquido incidente. El nivel de líquido medio se indica mediante el signo de referencia 11. En el caso de un convertidor de energía en el mar, el signo de referencia 11 puede entenderse como el nivel medio del mar (MSL).

Fuera del cuerpo de líquido se dispone una guía horizontal 4. Como en un ejemplo ilustrado anteriormente, un carro motorizado 3 puede ir guiado a lo largo de la guía horizontal y puede estar conectado a la estructura de soporte mediante un primer muelle 5. Como en un ejemplo anterior, puede incorporarse un sistema de control 7 que, en base a mediciones adecuadas, pueda controlar, por ejemplo, la resistencia (carga) del generador 6 y/o la rigidez de uno o más de los distintos muelles (5, 13, y 14) y/o un ángulo de ataque del cuerpo 2. En la figura 6 se ilustra muy esquemáticamente un control de cabeceo 19 capaz de girar el cuerpo de galope 2.

El control puede basarse en mediciones del flujo de líquido incidente, y la posición y/o la velocidad del cuerpo de galope.

Contrariamente al ejemplo mostrado anteriormente, el carro motorizado 3 no acciona directamente el generador. En su lugar, se dispone una conexión operativa a través del muelle 13 con un segundo cuerpo 15. El segundo cuerpo 15 puede llevar imanes permanentes 18. El movimiento del segundo cuerpo 15 produce un desplazamiento de los imanes permanentes 18 respecto a la bobina 9 que pertenece al generador 6. En una disposición alternativa, la posición de los imanes permanentes y las bobinas pueden intercambiarse, es decir, el segundo cuerpo puede llevar una o más bobinas y el estator del generador puede incorporar imanes permanentes.

Los signos de referencia 1 y 2 se refieren a las oscilaciones horizontales del cuerpo de galope 2 (con el carro motorizado 3) y el segundo cuerpo 15, respectivamente. Ambas de estas oscilaciones pueden ser, de acuerdo con este ejemplo, a lo largo de la misma guía horizontal 4.

También en esta figura, el generador sólo se ha ilustrado muy esquemáticamente y será evidente que, también en este ejemplo, el generador puede ser, por ejemplo, un generador lineal o rotativo. En caso de un generador rotativo, puede incluirse una transmisión adecuada para convertir el movimiento oscilante en rotación.

También en este ejemplo, las únicas partes del convertidor de energía que se encuentran en contacto con el cuerpo de líquido son el cuerpo de galope 2 y el soporte 1. No es necesario que el generador 6, el segundo cuerpo 15, el carro motorizado 3, la guía horizontal 4 y los medios elásticos 3, 14 y 15 se encuentren en contacto con el líquido. Esto puede prolongar la vida útil del convertidor de energía y reducir los costes operativos ya que puede reducirse el desgaste. También puede facilitar el mantenimiento de estos componentes.

También en este ejemplo, el interior del prisma (cuerpo de galope) puede ser hueco y podría disponerse una placa extrema sustancialmente plana en el segundo extremo del prisma.

Durante las pruebas en un canal de agua, los inventores han encontrado que, seleccionando adecuadamente la masa del segundo cuerpo y la rigidez de los muelles 5, 13 y 14, puede mejorarse la producción de electricidad. Además, incorporando un segundo cuerpo, puede aumentarse el ancho de banda de velocidades de flujo de líquido adecuadas donde la eficiencia es significativa.

#### Pruebas de diferentes diseños

Se han llevado a cabo experimentos en un canal de recirculación de agua con un prisma montado sobre muelles. Se llevó a cabo un control activo con el fin de actuar en tiempo real sobre el comportamiento del prisma. La eficiencia  $\eta$  puede definirse como la energía del flujo a través de la dimensión transversal del prisma  $\eta = 2P / (\rho U^3 DL)$ , donde  $P$  es la potencia extraída al flujo,  $\rho$  es la densidad del flujo de líquido,  $U$  es la velocidad del flujo de líquido,  $D$  es la dimensión transversal del prisma, y  $L$  es la longitud sumergida del prisma.

La figura 7 es una gráfica que ilustra resultados experimentales de eficiencia medida por los autores en función de la velocidad reducida  $U^*$ .

Bajo unas condiciones óptimas, se han medido valores  $\eta$  de aproximadamente 1,2 (hay que tener en cuenta que  $\eta$  se define con referencia a la dimensión  $D$  y, por lo tanto, puede tener valores superiores a 1).

Si se considera la eficiencia como la energía del flujo a través de la dimensión transversal cubierta por el prisma durante su oscilación, se tiene que introducir  $C_p = \eta / (1 + 2A^*)$ , donde  $A^* = y_{max}/D$ .

Bajo unas condiciones óptimas, se han medido valores de  $C_p = 0,43$  (puede utilizarse una cantidad de 0,39 si se resta el uso de energía del servomotor).

Además, en particular, cuando se incorpora un segundo cuerpo, puede aumentarse el ancho de banda de velocidades de flujo adecuadas y el dispositivo puede funcionar de manera eficiente en una amplia gama de velocidades de flujo.

En los experimentos, se ensayaron diferentes formas/secciones transversales del prisma, tales como, por ejemplo, triangular, rectangular, semicírculo cerrado y semicírculo abierto ("forma de C"). La longitud sumergida del prisma en los experimentos fue de 87 cm y los prismas eran de acero. El cuerpo de galope estaba conectado a la estructura de soporte en cada lado con un muelle helicoidal que tenía una rigidez de 170 N/m. El primer extremo del cuerpo de galope se dispuso para ir guiado a lo largo de la guía horizontal utilizando rodamientos de rodillos.

Durante los experimentos, se controló el parámetro  $m^* \cdot \xi$ .  $m^*$  es la relación entre la densidad del líquido y la densidad del cuerpo de galope, y  $\xi$  es un coeficiente de amortiguación mecánica adimensional del cuerpo de galope.

Con referencia ahora a la figura 8, se muestra una gráfica con los resultados experimentales obtenidos por los inventores, que demuestran el efecto del control del comportamiento activo (cabeceo) en el cuerpo de galope (prisma) sobre las oscilaciones. Se proporcionan datos de experimentos clásicos de Bouclin (*Hydroelastic oscillations of square cylinders*, Bouclin, Universidad de British Columbia, 1977) (signo de referencia 30, los signos más), así como datos medidos de manera independiente por los inventores en su canal de agua (signo de referencia 31, los círculos pequeños). Los datos de las pruebas experimentales de los inventores en este caso también se refieren a cilindros cuadrados, al igual que en los experimentos realizados por Bouclin.

La figura 8 muestra la amplitud normalizada de oscilaciones  $A^*$  en función de la velocidad reducida  $U^*$ . Se proporcionan también, superpuestos sobre los citados datos, resultados experimentales obtenidos para una sección transversal semicircular abierta (tipo C) sin control en el cabeceo (signo de referencia 32) y con control de cabeceo (signo de referencia 33). Dado que  $A^*$  está muy relacionada con la transferencia de energía del flujo al cuerpo de galope, puede observarse que la sección transversal semicircular abierta "captura" más energía del flujo y, más aún, cuando se realiza un control activo con un control de ley apropiado (en este caso, la frecuencia observada de las oscilaciones es también mayor).

En estos experimentos, se utilizó la misma configuración que se describió anteriormente. Para los cilindros cuadrados (signo de referencia 31), el parámetro  $m^* \cdot \xi$  era igual a 0,04. Para los ensayos que tenían un cuerpo de galope con una sección transversal en "C abierta", el mismo parámetro tenía un valor de aproximadamente 0,6. Otras características de los ejemplos de la presente invención han mejorado todavía más la extracción de energía de galope transversal de diversas maneras.

La siguiente Tabla 1 muestra, a modo de ejemplo, dimensiones características de un único prisma utilizado en los ejemplos de convertidores de energía de tamaño pequeño/mediano/grande, así como la captura de la energía esperada en una corriente de agua de 2 m/s en el punto de diseño óptimo. Los diseños que incluyen el prisma de tamaño pequeño se diseñan teniendo en cuenta principalmente pequeños estuarios o ríos de poca profundidad. Los dispositivos de tamaño medio pueden diseñarse principalmente para corrientes de mareas cerca de la orilla del mar o ríos. Los convertidores de energía de acuerdo con el prisma de tamaño grande pueden diseñarse para corrientes marinas estables.

|                                | Tamaño de prisma pequeño  | Tamaño de prisma medio  | Tamaño de prisma grande   |
|--------------------------------|---|---|---|
| D (m)                          | 1   | 2   | 4   |
| L (m)                          | 4   | 8   | 16  |
| P (kW)                         | 19,2  | 76,8  | 307,2   |
| $\eta$                         | 1,2   | 1,2   | 1,2   |
| $C_p$                          | 0,39  | 0,39  | 0,39  |
| K (N/m)                        | 2665  | 2678  | 2685  |
| $\xi$                          | 3,9   | 7,8   | 15,6  |
| M (kg/m)                       | 122,1   | 245,4   | 491,9   |
| Sección transversal del prisma | Forma de C abierta  | Forma de C abierta  | Forma de C abierta  |
| Tipo de generador              | Rotativo o lineal, síncrono o asíncrono, opcionalmente imanes permanentes | Rotativo o lineal, síncrono o asíncrono, opcionalmente imanes permanentes | Rotativo o lineal, síncrono o asíncrono, opcionalmente imanes permanentes |
| Cabeceo                        | sí  | sí  | sí  |

Aquí, K se refiere a la constante del muelle y  $\xi$  se refiere a la amortiguación introducida por el acoplamiento al generador. Finalmente, M es la masa por unidad de longitud del prisma.

Es evidente que, de acuerdo con las condiciones locales (profundidad, corrientes, ondas, etc.), pueden utilizarse dimensiones alternativas para el cuerpo de galope.

5 También se ha encontrado que el control adecuado del ángulo de ataque del cuerpo de galope puede permitir eficiencias de conversión tan elevadas como para sistemas de conversión de alas rotativos (es decir, turbinas de corrientes marinas). Hay que señalar, sin embargo, que los convertidores de energía de acuerdo con ejemplos de la presente invención pueden ser de fabricación significativamente más económica (la forma del elemento mecánico de captación de energía es significativamente más simple, el tipo en C (medio tubo o "semicírculo abierta"), en comparación con los de una pala albeada) y en uso (los costes de mantenimiento pueden reducirse ya que todas las partes mecánicas y eléctricas, excepto para el cuerpo de galope, se encuentran instaladas por encima de la superficie del agua).

10 Los convertidores de energía pueden diseñarse de acuerdo con las condiciones de cada lugar (incluyendo, por ejemplo, batimetría, olas, velocidades de flujo, etc.) optimizando la relación de costes/producción.

15 La estructura de soporte (por ejemplo, plataforma) y los cuerpos de galope pueden fabricarse utilizando acero, pero pueden tener un consumo de acero relativamente bajo en comparación con las turbinas de agua de eje horizontal actuales. Esto permite reducir los costes de inversión. Las técnicas de fabricación utilizadas para la fabricación de los convertidores de energía de acuerdo con diversos ejemplos de la invención son bien conocidas ("tecnología probada") y se prevé que no se requiera ningún astillero especial, muelle o cualquier otra instalación especial. Tampoco parece necesario el uso de embarcaciones especiales para operaciones de puesta y/o retirada de servicio.

20 Los componentes de potencia pueden situarse convenientemente por encima de la superficie del agua y pueden quedar protegidos de una manera relativamente sencilla con el fin de reducir la corrosión. Los componentes principales son, por lo tanto, de acceso relativamente fácil cuando se requiere mantenimiento. No se requerirán operaciones submarinas, así como tampoco embarcaciones especiales o personal altamente calificado. Esto permite minimizar así los costes de mantenimiento. La estructura de soporte puede realizarse lo suficientemente estable como para asegurar una fácil accesibilidad. La estabilidad también mejorará los intervalos de tiempo disponibles para las operaciones de mantenimiento, teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas.

25 En términos de rendimiento, la producción de energía en los experimentos supera los resultados obtenidos aprovechando otras vibraciones inducidas por el flujo, tales como, por ejemplo, Vibraciones Inducidas por Vórtices (VIV) o "flutter". Se han encontrado también que las densidades de energía expresadas en  $W/m^3$  son competitivas con turbinas de corriente de eje horizontal convencionales.

30 Teniendo en cuenta los costes previstos y el rendimiento del dispositivo, el coste final de la electricidad generada por medio de los ejemplos de la presente invención puede ser lo suficientemente bajo como para competir con cualquier otra tecnología renovable marina del estado de la técnica.

35 La figura 9 ilustra un ejemplo de un cuerpo de galope con una sección transversal variable de acuerdo con una realización de la presente invención. La figura 9 sirve para ilustrar que, dentro de un cuerpo de líquido (por ejemplo, el mar o un río), la velocidad del flujo puede no ser uniforme a lo largo de la altura  $z$  (o a lo largo de la longitud  $L$  de la parte del cuerpo de galope que se extiende hacia el cuerpo de líquido).

40 A medida que varía la velocidad de flujo en función de  $z$ , la sección transversal del cuerpo de galope también puede variar. La sección transversal puede tener sustancialmente la misma forma/configuración a lo largo de la longitud del cuerpo de galope, pero las dimensiones pueden variar. En algunos ejemplos, las dimensiones pueden variar linealmente. Variando adecuadamente las dimensiones, la contribución de cada sección del cuerpo de galope al movimiento de galope (y la transferencia de energía) puede ser sustancialmente la misma.

En un ejemplo,  $U^*(z) = \frac{U(z)}{w_N D(z)}$  puede ser igual a una constante

45 50 La figura 10 ilustra esquemáticamente un sistema de conversión de energía que comprende un único soporte que incorpora una pluralidad de convertidores de energía, tal como se describe con referencia a la figura 6. Los experimentos que han llevado a cabo los autores sugieren que puede ser beneficioso mantener la distancia transversal entre cuerpos de galope en por lo menos  $2 \times D$  (siendo  $D$  una dimensión característica del cuerpo de galope, por ejemplo, la anchura) y mantener la distancia en línea (es decir, la distancia entre dos cuerpos de galope en la dirección del flujo) en por lo menos  $2 \times D$ .

55 60 La figura 10 sirve también para ilustrar que los sistemas de conversión de energía de acuerdo con diferentes ejemplos de la presente invención pueden ser escalados de una manera relativamente sencilla. En la figura 10, cada uno de los convertidores de energía individuales que se muestra es sustancialmente igual. Sin embargo, no es necesario tener convertidores de energía idénticos en único sistema de conversión de energía. Dependiendo del flujo de fluido local, puede ser beneficioso emplear diferentes convertidores de energía en las distintas posiciones dentro del sistema de conversión de energía, por ejemplo, emplear un convertidor de energía en una fila curso abajo

diferente de una fila curso arriba. Alternativamente, los convertidores de energía que pueden encontrarse más cerca de los bordes de un cuerpo de líquido (por ejemplo, un río) pueden ser diferentes de los convertidores situados más centralmente.

5 Puede ser beneficioso emplear una sección transversal de diferente forma y tamaño para cada cuerpo de galope en función de su posición relativa con los otros. Además, la masa de cada cuerpo de galope también puede ser diferente y puede ser beneficioso aplicar una ley de control individualizada en el cabeceo para cada cuerpo de galope.

10 En la figura 10, se muestra esquemáticamente cada uno de los convertidores de energía comprendiendo un sistema de control individual. Sin embargo, en implementaciones alternativas, puede emplearse un sistema de control que controle una pluralidad o todos los convertidores de energía.

15 A pesar de que solamente se ha descrito aquí una serie de realizaciones y ejemplos particulares de la invención, los expertos en la materia comprenderán que son posibles otras realizaciones alternativas y/o usos de la invención y modificaciones obvias y sus equivalentes. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de las realizaciones particulares descritas. Por lo tanto, el alcance de la presente invención no debe quedar limitado por las realizaciones particulares, sino que debe determinarse sólo mediante una lectura razonable de las siguientes reivindicaciones.

20

**REIVINDICACIONES**

1. Convertidor de energía para convertir energía cinética desde un flujo en un cuerpo de líquido por galope transversal, que comprende  
 5 un soporte (1),  
 un cuerpo de galope alargado (2; 22) que se extiende entre un primer extremo y un segundo extremo y que tiene una sección transversal adecuada para galope transversal,  
 una guía sustancialmente horizontal (4) para guiar el primer extremo del cuerpo de galope,  
 uno o más elementos elásticos (5) dispuestos sustancialmente horizontales y conectados entre el cuerpo de galope  
 10 y el soporte, y  
 un generador (6) que comprende un componente generador estático (9) y un componente generador dinámico (8; 18), y en el que  
 el cuerpo de galope (2; 22) queda suspendido sustancialmente vertical de manera que el segundo extremo del cuerpo se extiende hacia el cuerpo de líquido, y  
 15 el componente generador dinámico (18) está conectado operativamente al cuerpo de galope, caracterizado por el hecho de que la sección transversal del cuerpo de galope alargado cumple el criterio de *Den Hartog* y por el hecho de que la guía sustancialmente horizontal está dispuesta fuera del cuerpo de líquido.
2. Convertidor de energía de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que el soporte (1) está  
 20 flotando en cuerpo de líquido.
3. Convertidor de energía de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que el soporte (1) es fijo.
4. Convertidor de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 3, caracterizado por el hecho de que  
 25 el componente generador dinámico (8; 18) está formado solidario o unido al cuerpo de galope (2; 22).
5. Convertidor de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 3, caracterizado por el hecho de que el componente generador dinámico (8; 18) está formado solidario o unido a un segundo cuerpo (15) conectado al  
 30 soporte por uno o más elementos elásticos (14).
6. Convertidor de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 5, caracterizado por el hecho de que por lo menos una parte del cuerpo de galope es giratoria alrededor de un eje longitudinal del cuerpo de galope y comprendiendo el convertidor de energía, además, un actuador para hacer girar la parte giratoria.
- 35 7. Convertidor de energía de acuerdo con la reivindicación 6, caracterizado por el hecho de que el cuerpo de galope comprende una parte superior (22a) y una parte inferior (22b), y en el que la parte inferior (22b) está montada de manera giratoria alrededor de la parte superior.
8. Convertidor de energía de acuerdo con la reivindicación 6 o 7, caracterizado por el hecho de que comprende,  
 40 además, un sistema de control de cabeceo para enviar comandos al actuador (27), en el que dichos comandos se basan en mediciones de la posición y/o la velocidad del cuerpo de galope y la velocidad del flujo.
9. Convertidor de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 8, caracterizado por el hecho de que  
 45 el cuerpo de galope es sustancialmente hueco.
10. Convertidor de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 9, caracterizado por el hecho de que el cuerpo de galope comprende, además, una placa extrema en su segundo extremo.
11. Convertidor de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 10, caracterizado por el hecho de  
 50 que la sección transversal del cuerpo de galope es variable entre el primer extremo y el segundo extremo.
12. Convertidor de energía de acuerdo con la reivindicación 11, caracterizado por el hecho de que la forma de la sección transversal del cuerpo de galope es sustancialmente constante entre el primer extremo y el segundo extremo, pero la sección transversal tiene dimensiones variables.
- 55 13. Convertidor de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 12, caracterizado por el hecho de que la sección transversal del cuerpo de galope tiene sustancialmente forma de C.
14. Convertidor de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 13, caracterizado por el hecho de  
 60 que una resistencia del generador es adaptable.
15. Sistema de conversión de energía que comprende una pluralidad de convertidores de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 14.

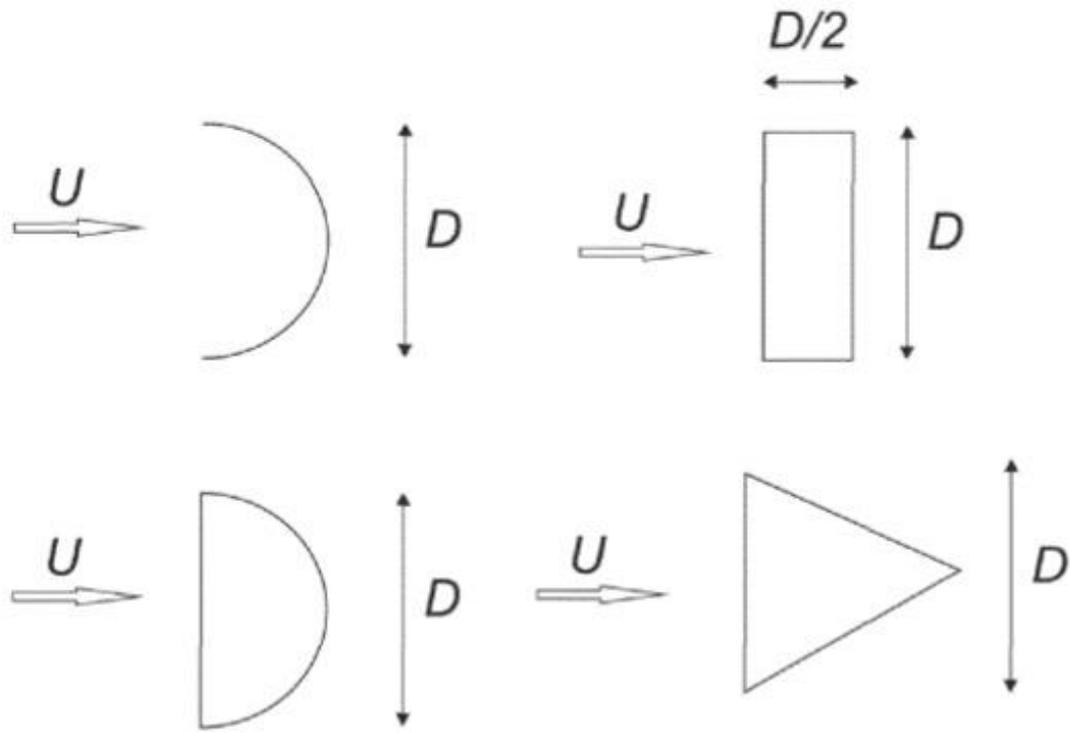


Fig.1

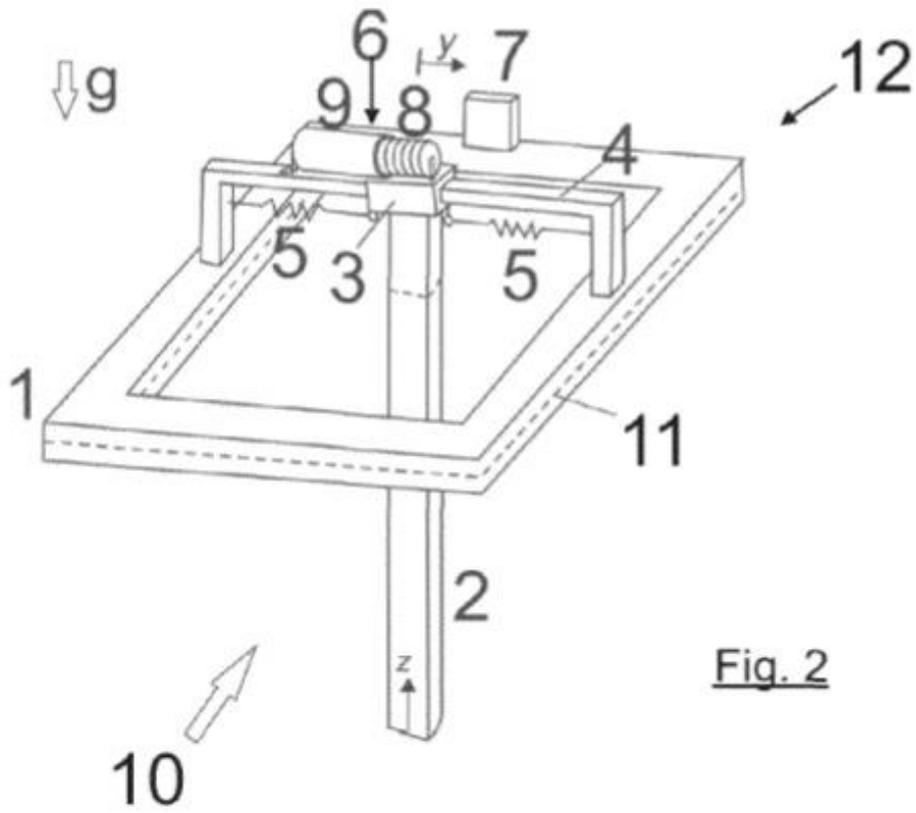


Fig. 2

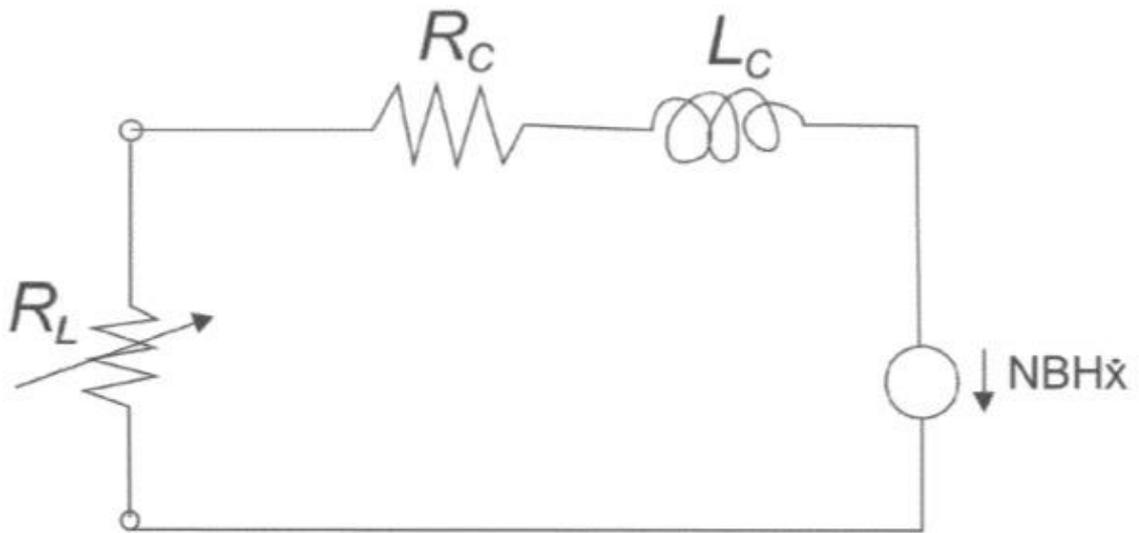


Fig. 3

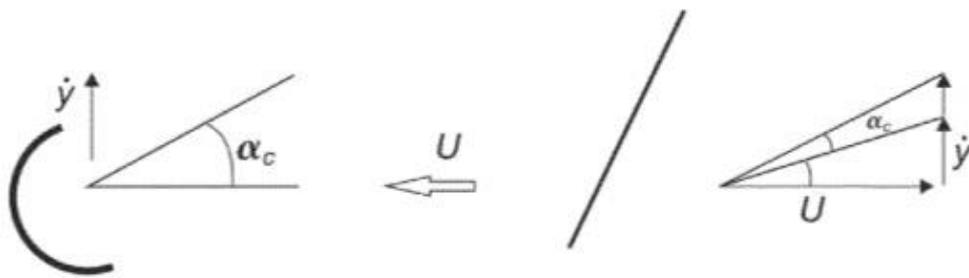


Fig. 4

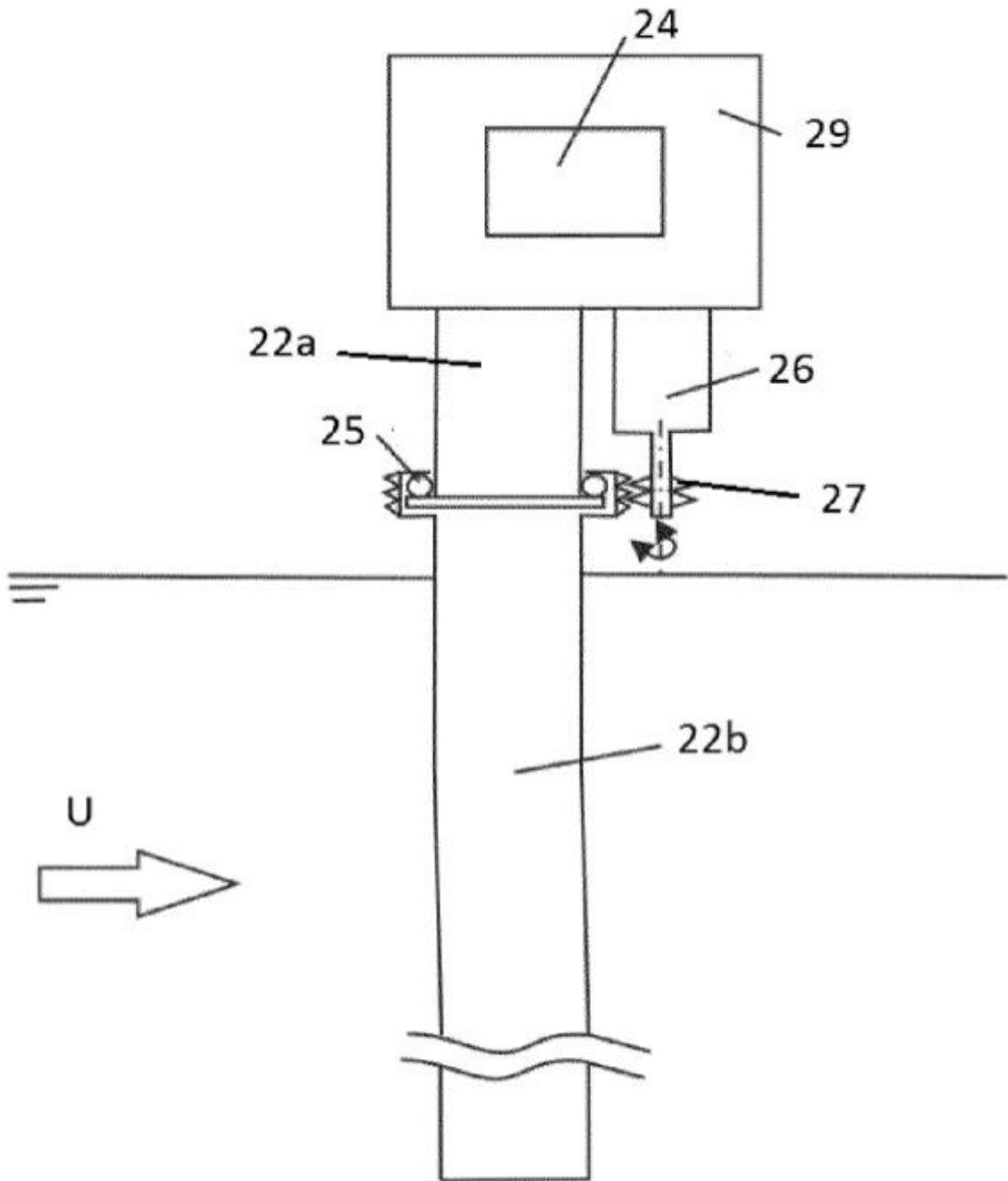


Fig. 5

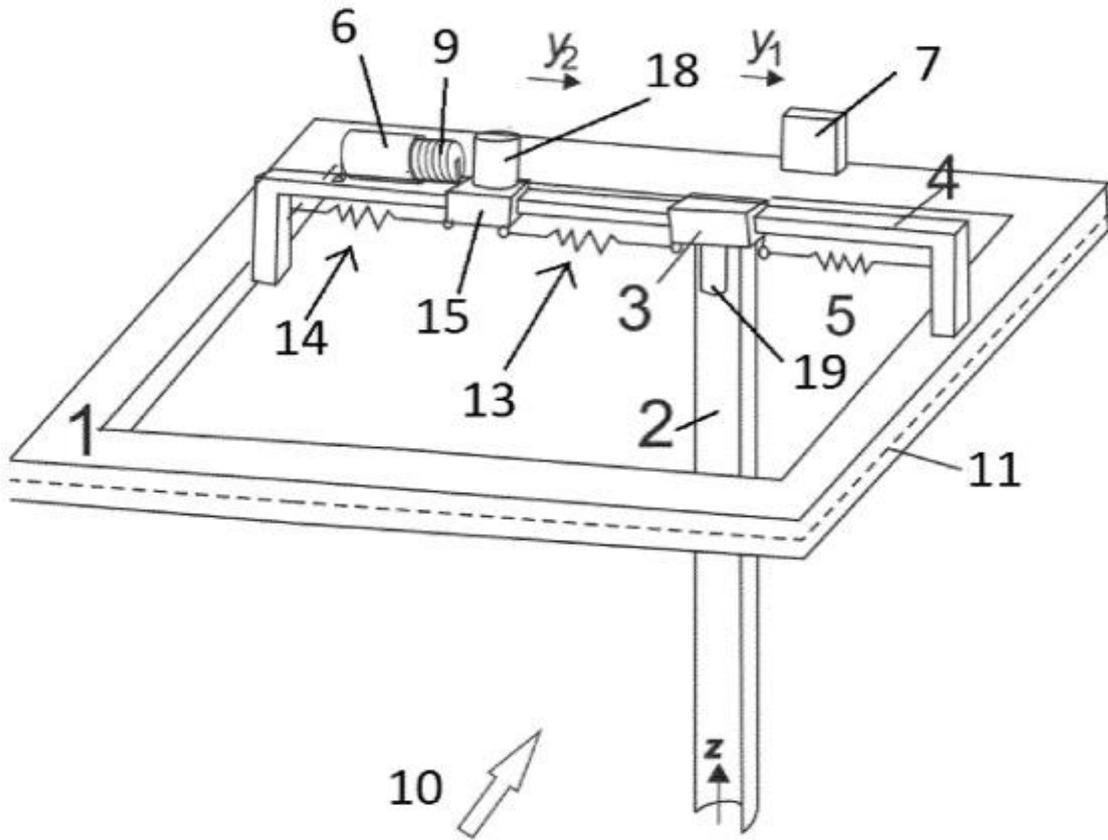


Fig. 6

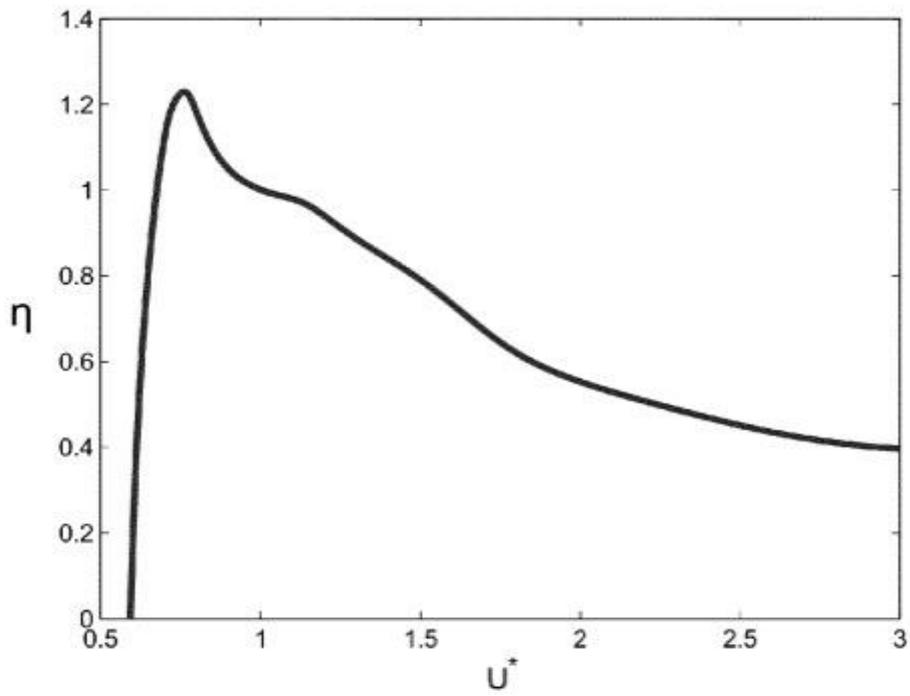


Fig 7.

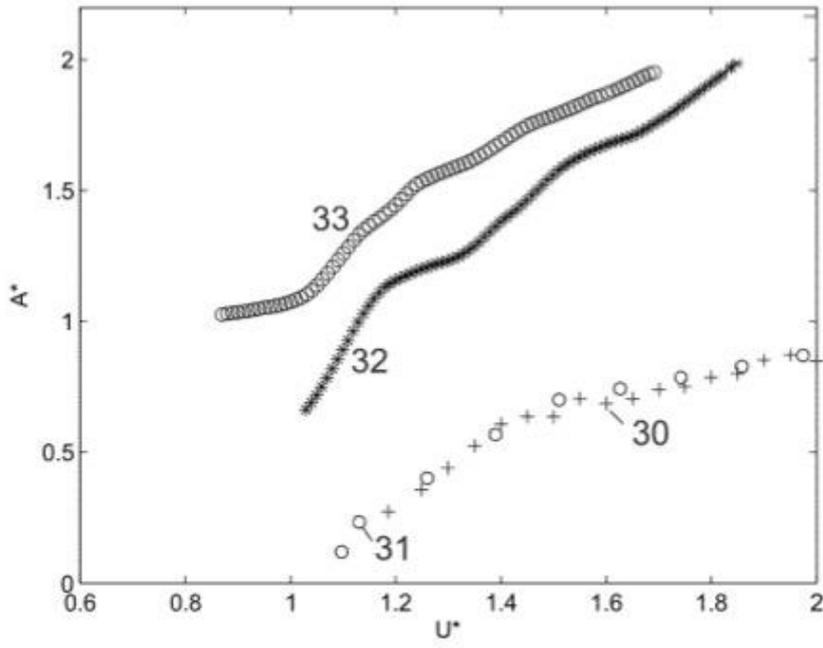


Fig 8.

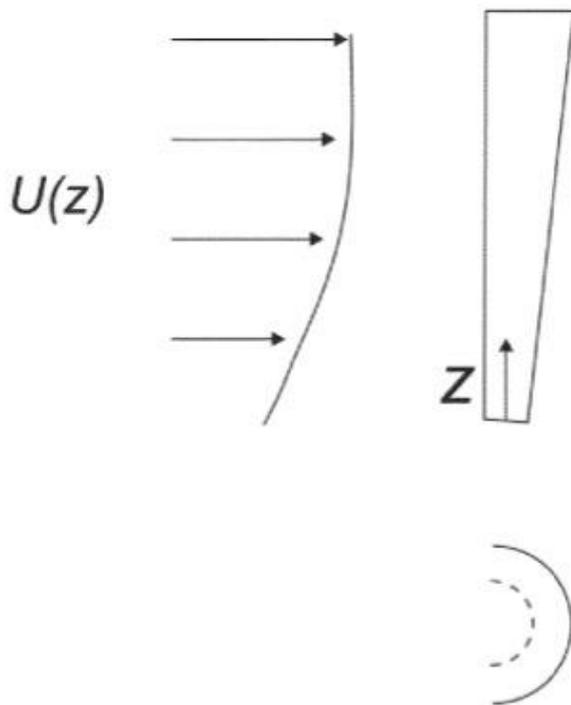


Fig. 9

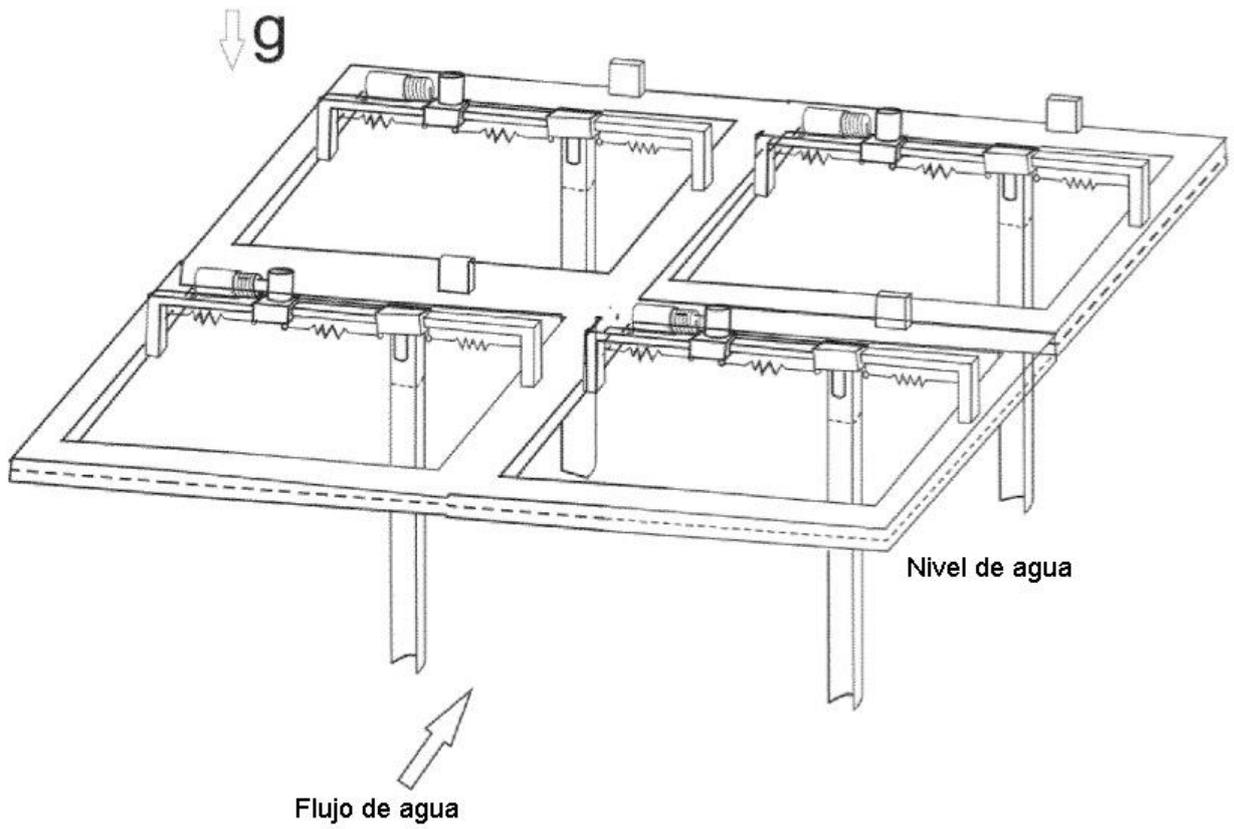


Fig. 10

**REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN**

Esta lista de referencias citadas por el solicitante es únicamente para la comodidad del lector. No forma parte del documento de la patente europea. A pesar del cuidado tenido en la recopilación de las referencias, no se pueden excluir errores u omisiones y la EPO niega toda responsabilidad en este sentido.

5

**Documentos de patentes citados en la descripción**

- |    |   |  |
|----|---|--|
| 10 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• US 7208845 B [0004]</li> <li>• WO 2012066550 A [0004]</li> <li>• US 6424079 B [0004]</li> <li>• US 20090121489 A [0006]</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• US 7986051 B [0006]</li> <li>• JP 2010096077 A [0006]</li> <li>• US 20100143115 A [0006]</li> <li>• JP 2006226221 A [0015]</li> </ul> |
|----|---|--|

**15 Literatura diferente de patentes citada en la descripción**

- |    |  |   |
|----|--|---|
| 20 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>GALLOPING.</b> <i>Journal of Sound and Vibration</i>, 2010, vol. 329 (14), 2873-2883 [0014]</li> <li>• <b>DENIS N. BOUCLIN.</b> <i>Hydroelastic Oscillations of square cylinders</i>, 1975 [0016]</li> <li>• <b>BARRERO-GIL y otros.</b> <i>Transverse Galloping at low Reynolds numbers. Journal of Fluids and Structures</i>, 2009, vol. 25 (7), 1236-1242 [0050]</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>BARRERO-GIL y otros.</b> <i>Hysteresis in Transverse Galloping: The role of inflection points. Journal of Fluids and Structures</i>, 2009, vol. 25 (6), 1007-1020 [0050]</li> <li>• <b>BARRERO-GIL y otros.</b> <i>Transverse Energy harvesting from Galloping. Journal of Sound and Vibration</i>, 2010, vol. 329. (14), 2873-2883 [0050]</li> <li>• <b>BOUCLIN.</b> <i>Hydroelastic oscillations of square cylinders, Bouclin</i>, 1977 [0090]</li> </ul> |
|----|--|---|