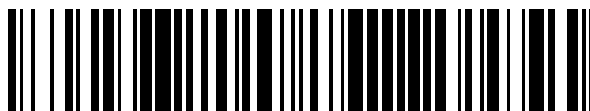


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 588 077**

51 Int. Cl.:

G01V 1/18 (2006.01)

G01P 15/093 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.04.2012** **PCT/IT2012/000115**

87 Fecha y número de publicación internacional: **01.11.2012** **WO12147112**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.04.2012** **E 12728824 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.06.2016** **EP 2643711**

54 Título: **Péndulo plegado de baja frecuencia con elevado factor de calidad mecánica en configuración vertical y sensor sísmico vertical que utiliza un péndulo plegado de este tipo**

30 Prioridad:

28.04.2011 IT RM20110220

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

28.10.2016

73 Titular/es:

UNIVERSITÁ DEGLI STUDI DI SALERNO (100.0%)
Via Giovanni Paolo II, 132
84082 Fisciano (SA), IT

72 Inventor/es:

BARONE, FABRIZIO;
GIORDANO, GERARDO y
ACERNESE, FAUSTO

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 588 077 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

Péndulo plegado de baja frecuencia con elevado factor de calidad mecánica en configuración vertical y sensor sísmico vertical que utiliza un péndulo plegado de este tipo

5 La presente invención se refiere a un péndulo plegado de baja frecuencia con elevado factor de calidad mecánica en configuración vertical y a sensor sísmico vertical que utiliza un péndulo plegado de este tipo.

Más detalladamente, la presente invención se refiere a un péndulo plegado, que se puede realizar también como un péndulo monolítico, que no está colocado en su configuración horizontal clásica y, como tal, desarrollada y conocida en la bibliografía, sino en la configuración "vertical", es decir, rotada en 90°, sea en sentido horario o antihorario. En particular, la versión monobloque de un péndulo plegado de este tipo permite realizaciones muy compactas, caracterizadas por un elevado desacoplamiento del grado de libertad vertical de los otros grados de libertad y óptimos factores de calidad mecánica.

Además, la invención se refiere a un sensor sísmico que utiliza tal péndulo plegado en la configuración vertical, midiendo el desplazamiento mutuo entre la masa de prueba del péndulo y el soporte de la misma y originando así un sensor sísmico vertical.

15 Por otra parte, considerando la aplicabilidad directa de una parte de los resultados intermedios al péndulo plegado en configuración horizontal, es objeto de la presente invención proporcionar una nueva técnica para calibrar la frecuencia de resonancia también de un péndulo horizontal.

Por último, en vista de la aplicabilidad directa de las metodologías y técnicas de la presente invención a todas las configuraciones del péndulo plegado que se obtienen por rotación del mismo, sea en sentido horario o antihorario, desde la configuración horizontal hasta la configuración vertical (rotación de 90°), es objeto de la presente invención proporcionar una técnica que permita utilizar y calibrar la frecuencia de un péndulo plegado rotado y realizar un sensor sísmico.

Técnica anterior

25 El principio en el cual se basan la mayoría de los sistemas mecánicos que están actualmente en uso para medir el desplazamiento vertical absoluto es el de la medición del desplazamiento relativo con respecto a una masa idealmente inercial. Las realizaciones existentes integran principios y técnicas de distinta naturaleza y precisión [1] [2] [3].

La calidad de la realización de la masa inercial de referencia limita la sensibilidad del sistema en general y, sobre todo, la banda de frecuencia del sistema, particularmente en la zona de frecuencias bajas. A pesar de ello, incluso en la hipótesis de que se dispusiera de una masa realmente inercial, las mediciones estarían limitadas en cualquier caso por el ruido térmico de la propia masa, el ruido del sistema de lectura y la interacción del sensor con los ruidos ambientales [1] [2] [3].

En el caso de mediciones del desplazamiento vertical, en general tales sistemas utilizan un sistema oscilante, o se pueden relacionar con el mismo, por ejemplo una cinta de longitud adecuada sujeta en uno de sus extremos. En el otro extremo de dicha cinta se sitúa una masa adecuada, que constituye de hecho la masa inercial. La realización de una medida con una buena sensibilidad a bajas frecuencias requiere, por tanto, que el sistema oscilante mecánico tenga una frecuencia de resonancia muy baja junto con un buen factor de calidad mecánica. En general, este sistema se realiza por medio de un sistema de realimentación, de manera que se mantiene fija la masa inercial en la posición elegida como referencia, por medio de un sistema de control de realimentación. La señal de error del sistema de control, obtenida mediante sensores de medida adecuados, proporciona la señal de aceleración vertical, de donde es posible extraer la señal de desplazamiento vertical absoluto, obviamente limitada por la sensibilidad y la banda de medición del sistema.

Asimismo, lo que sigue tiene suma importancia en la realización de un sistema mecánico para una medición absoluta: un desacoplamiento eficaz del grado de libertad vertical de los otros grados de libertad (movimientos horizontales, rotaciones, etc.) y un elevado factor de calidad mecánico, que es un índice de la disminución de pérdidas energéticas del sistema oscilante (ruido térmico de las articulaciones, efecto viscoso del aire, etc.), necesarios para que el movimiento aparente de la masa inercial no se vea influido por el movimiento de la parte fija del sistema mecánico que soporta una masa de este tipo.

Sin embargo, los sistemas mecánicos con muy baja frecuencia de resonancia tienen, por lo general, dimensiones muy grandes, su realización y calibración es compleja y, sobre todo, no son dimensionalmente escalables. De hecho, tales sistemas requieren, en primer lugar, compensar la fuerza gravitatoria que actúa sobre la masa inercial, lo que constituye un problema, especialmente a bajas frecuencias, debido al peso de la propia masa y, por tanto, a la necesidad de aplicar grandes fuerzas para colocarla. Además, a medida que se ensancha la banda de medición de estos sensores de baja frecuencia aumenta considerablemente la sensibilidad del sistema a los ruidos ambientales (variaciones de temperatura, presión, humedad, etc.), así como a los problemas de desacoplamiento entre el grado de libertad vertical y los otros grados de libertad [1] [2] [3].

Sólo el sistema de baja frecuencia constituido por un péndulo de Watts [4] se distingue de todos los sistemas mecánicos existentes que se realizan también en forma monolítica (con articulaciones mecanizadas mediante electroerosión), tanto en la realización experimental conocida clásicamente con articulaciones en tracción [5] [6] como en una nueva realización con algunas articulaciones en compresión (solicitud de patente italiana [7], incluida en su totalidad en la presente memoria por referencia) que une, a una completa escalabilidad dimensional del sensor, una total posibilidad de ajuste de la frecuencia de resonancia, elevados factores de calidad, gran banda de frecuencia de medición, problemas reducidos de acoplamiento entre los diversos grados de libertad y amplia insensibilidad a los ruidos ambientales, como consecuencia de un eficaz sistema de lectura de señal basado en métodos optoelectrónicos, por ejemplo, niveles ópticos e interferómetros láser [8]. Los progresos en el desarrollo tecnológico de un péndulo plegado de este tipo que, sin embargo, debido a su estructura sólo se puede utilizar para aplicaciones horizontales, se describen en una extensa bibliografía [9-17].

Objeto y materia objeto de la invención

Es objeto de la presente invención proporcionar un péndulo plegado vertical, nunca realizado ni sugerido en la bibliografía, cuya frecuencia de resonancia se pueda calibrar tanto por medio de una masa de calibración, con procedimientos análogos a los conocidos y aplicados en la bibliografía [5-8], como por medio de la aplicación de fuerzas externas, adecuadamente cuantificadas y dirigidas.

Es objeto intermedio de la invención, necesario para realizar un péndulo plegado vertical y, por lo tanto, para proporcionar un péndulo plegado horizontal cuya frecuencia de resonancia se pueda calibrar, además de aplicar la forma clásica, como se describe en la bibliografía [5-8], también la aplicación de una fuerza externa constante y paralela a la fuerza gravitatoria (en sentido aditivo o sustractivo), cuya dirección está definida por la normal a la tangente al movimiento de la masa central en el punto de mínimo potencial, como se ilustrará con detalle en lo que sigue.

Es materia objeto específica adicional de la presente invención proporcionar un sensor (por ejemplo, sísmico) de oscilaciones verticales basado en el péndulo plegado objeto de la invención, así como una técnica que permita la calibración de los sensores sísmicos horizontales existentes, basada en el péndulo plegado, que resuelva los problemas y supere los inconvenientes de la técnica anterior.

Es materia objeto de la presente invención un péndulo plegado con frecuencia de oscilación ajustable, que comprende:

- un soporte;
- una masa de prueba;
- un péndulo simple;
- un péndulo invertido;

estando el péndulo simple y el péndulo invertido conectados por uno de sus extremos a la masa de prueba y por el otro extremo al soporte a través de 4 sistemas de articulación correspondientes, sin estar la masa de prueba conectada al soporte y siendo, por lo tanto, libre para oscilar,

caracterizándose el péndulo plegado por:

- estar situados el péndulo simple y el péndulo invertido, con referencia a la posición estática de equilibrio, esencialmente a lo largo de una dirección de disposición perpendicular a la tangente al movimiento de la masa de prueba en el punto de centrado geométrico con respecto al soporte;
- un primer medio configurado para, o adecuado para, aplicar una primera fuerza externa constante en uno o más puntos del péndulo simple y/o del péndulo invertido y/o la masa de prueba, en la dirección de la tangente al movimiento de la masa de prueba en el punto de centrado geométrico con respecto al soporte;
- un segundo medio configurado para, o adecuado para, aplicar una segunda fuerza externa constante a lo largo de dicha dirección de disposición en uno o más puntos del péndulo simple y/o del péndulo invertido y/o la masa de prueba, para generar un campo conservativo local de valor predefinido;

siendo la frecuencia de oscilación del péndulo plegado una función de dicha segunda fuerza externa.

Preferiblemente según la invención, en condiciones de gravedad y con el péndulo plegado rotado un ángulo α con respecto a la fuerza gravitatoria g , dicha primera fuerza externa constante es paralela a la componente g_{β} de la fuerza gravitatoria a lo largo de una dirección que se ha rotado en el mismo ángulo α con respecto a la fuerza gravitatoria, y es tal que compensa al menos parcialmente dicha componente g_{β} , mientras que dicha segunda fuerza externa constante es paralela a la componente g_{α} de la fuerza gravitatoria que es perpendicular a la componente g_{β} .

Preferiblemente según la invención, los sistemas de unión relevantes para el péndulo simple comprenden cada uno una o varias articulaciones en tensión con respecto a dicha segunda fuerza externa constante, y los sistemas de unión relevantes para el péndulo invertido comprenden cada uno una o varias articulaciones en compresión con respecto a dicha segunda fuerza externa constante.

- 5 Preferiblemente según la invención, dicha primera fuerza externa constante se obtiene mecánicamente mediante flexión previa de las articulaciones, por rotación de las mismas, durante la fase de producción.

Preferiblemente según la invención, dicha primera fuerza externa constante es una fuerza magnética que actúa sobre la masa de prueba.

- 10 Preferiblemente según la invención, dicha segunda fuerza externa constante es una fuerza magnética que actúa sobre la masa de prueba.

Es materia objeto específica adicional de la presente invención un péndulo plegado con frecuencia de oscilación ajustable, que comprende:

- 15 - un soporte;
- una masa de prueba;
- un péndulo simple;
20 - un péndulo invertido;

estando el péndulo simple y el péndulo invertido conectados por uno de sus extremos a la masa de prueba y por el otro extremo al soporte a través de cuatro sistemas de articulación correspondientes, sin estar la masa de prueba conectada al soporte y siendo, por lo tanto, libre para oscilar, comprendiendo los sistemas de articulación relevantes para el péndulo simple una o varias articulaciones en tensión, comprendiendo los sistemas de articulación relevantes para el péndulo invertido una o varias articulaciones en compresión,

- 25 caracterizándose el péndulo plegado por que:

- 30 - comprende medios configurados para, o adecuados para, aplicar una fuerza externa constante en uno o más puntos del péndulo simple y/o del péndulo invertido y/o la masa de prueba, en la dirección de la tangente al movimiento de la masa de prueba en el punto de centrado geométrico con respecto al soporte;

siendo la frecuencia de oscilación del péndulo plegado una función de dicha fuerza externa.

- 35 Preferiblemente según la invención, dicha fuerza externa constante es una fuerza magnética que actúa sobre la masa de prueba.

Preferiblemente según la invención, se forma a partir de un bloque monolítico de material, adecuadamente mecanizado.

Preferiblemente según la invención, se mecaniza y corta mediante electroerosión el bloque monolítico.

- 40 Preferiblemente según la invención, cada uno de dichos sistemas de unión comprende dos articulaciones.

Preferiblemente según la invención, dichas una o varias articulaciones son articulaciones elípticas.

Preferiblemente según la invención, dichos sistemas de unión comprenden dos articulaciones trazadas por eliminación de dos elipses con excentricidad $\varepsilon > 3,2$ y que tienen una separación mutua $d > 10$ micrómetros.

- 45 Preferiblemente según la invención, la masa de prueba tiene una forma que es esencialmente paralelepípedica con una abertura central, realizada para reducir su masa.

Preferiblemente según la invención, la distancia entre las caras enfrentadas de la masa de prueba o del soporte y en cada caso del péndulo simple o el péndulo invertido es al menos 250 μm .

Es materia objeto específica adicional de la presente invención un sensor de oscilaciones, en particular sensor sísmico, que comprende:

- 50 - un péndulo plegado que comprende una masa de prueba y un soporte, un péndulo simple y un péndulo invertido;
- un sistema para detectar el desplazamiento aparente de la masa de prueba con respecto al soporte,

- 55 y está caracterizado por que el péndulo plegado es el péndulo plegado materia objeto de la invención.

Preferiblemente según la invención, dicho sistema para detectar el desplazamiento aparente de la masa de prueba es un sistema óptico y comprende:

- 5 - una fuente luminosa que envía un haz de luz sobre dicha masa de prueba, y precisamente sobre
- un espejo que está integrado con dicha masa de prueba,
- 10 - un dispositivo para detectar la luz reflejada por dicho espejo;
- un dispositivo de tratamiento electrónico para calcular dicho desplazamiento aparente.

Se describirá ahora la invención a modo de ilustración, pero no a modo de limitación, haciendo referencia a las Figuras de los dibujos adjuntos, en donde:

- 15 - la Figura 1 muestra un esquema de principio de un péndulo plegado conforme a las enseñanzas conocidas;
- la Figura 2 muestra un esquema en vista lateral del péndulo plegado monolítico horizontal descrito en [7] [8] (en donde son visibles 4 de las 8 articulaciones existentes en total), utilizado para los ensayos;
- 20 - la Figura 3 muestra un esquema en vista lateral del péndulo plegado monolítico horizontal descrito en [7] [8] (en donde son visibles 4 de las 8 articulaciones existentes en total) colocado verticalmente (por rotación de 90° en el sentido antihorario), utilizado para los ensayos de la presente invención, mediante la aplicación sobre el mismo de:
- 25 a) una fuerza magnética atractora constante entre el soporte lateral del sensor y la masa central, generada por imanes permanentes MC1, MC2, aplicada por medio de la conexión PM2 de manera lateral sobre el apoyo F y a la masa central PM (para calibrar la frecuencia de resonancia natural del sensor);
- 30 b) una fuerza magnética repulsiva constante entre la base del sensor y la masa central PM, generada por medio de imanes permanentes MG1, MG2, aplicada por medio de la conexión PM1 a la base F de apoyo y a la masa central PM (se necesita dicha fuerza para compensar la fuerza gravitatoria local y para centrar la masa central PM del sensor en el centro del soporte F);
- 35 - la Figura 4 muestra un esquema de principio del péndulo plegado de la Figura 1, rotado en un ángulo en sentido antihorario;
- la Figura 5 muestra un esquema en vista lateral del péndulo plegado monolítico horizontal descrito en [7] [8] (en donde son visibles 4 de las 8 articulaciones existentes en total), utilizado para los ensayos de la presente invención, sobre el cual se ha aplicado una fuerza magnética atractora entre la base del sensor y la masa central PM, generada por una configuración magnética permanente MT1, MT2 aplicada al soporte F por medio de conexiones PM3 y a la masa central PM;
- 40 - la Figura 6 muestra la progresión de la frecuencia de resonancia natural del péndulo plegado monolítico horizontal en el aire, en función de la distancia relativa entre los imanes permanentes aplicados al soporte y a la masa central, para dos posiciones del imán fijo en la masa central, 101 mm y 90 mm, con desplazamiento arbitrario;
- 45 - la Figura 7 muestra la progresión de la frecuencia de resonancia natural del péndulo plegado monolítico vertical en el aire, en función del módulo de la distancia relativa entre los imanes permanentes aplicados al soporte y a la masa central;
- 50 - la Figura 8 muestra la progresión del factor de calidad del péndulo plegado vertical monolítico en el aire, en función de la frecuencia de resonancia obtenida por variación de la distancia relativa entre los imanes permanentes aplicados al soporte lateral y a la masa central: los datos muestran una progresión lineal
- 55 (coeficiente de correlación igual a 0,99), según lo previsto por la teoría de un oscilador en presencia de fricción viscosa, debida principalmente al aire presente entre el péndulo, el péndulo invertido y la masa central.

Principio de funcionamiento de la invención

El principio innovador del péndulo plegado en configuración vertical con baja frecuencia de resonancia y elevado factor de calidad mecánica, y sensor de oscilaciones (por ejemplo, sísmicas) y sistema de amortiguación vertical que
60 utiliza un péndulo plegado de este tipo, tiene su origen en el modelo de sensor sísmico monolítico original "péndulo plegado" como se describe en [5] y los desarrollos y mejoras posteriores y eficaces del modelo y la tecnología descritos en [6], también por medio de una realización innovadora que ya ha conducido a la solicitud de patente internacional para un péndulo plegado horizontal [7] [8].

Como se describirá con detalle en lo que sigue, se ha inventado un péndulo plegado en configuración vertical de este tipo gracias a una interpretación totalmente innovadora y nunca discutida en la bibliografía de las ecuaciones que describen el comportamiento del péndulo plegado horizontal como se conoce en la bibliografía [4- 8].

La validez de dicha interpretación del modelo y la formulación matemática del nuevo modelo que la describe se han llevado a la práctica a través de una de las posibles realizaciones experimentales de la misma que, además, verifica por completo el modelo sobre el cual se basa la presente invención. Los resultados científicos y tecnológicos alcanzados y descritos en lo que sigue permiten sentar las bases de una vía científica y tecnológica para realizar sensores sísmicos verticales compactos con baja frecuencia, sensibilidad muy elevada y escasa sensibilidad a los ruidos ambientales.

El punto de partida para la descripción del péndulo plegado vertical de baja frecuencia es la configuración original, el péndulo de Watts ("péndulo plegado"), bien conocido en la bibliografía, por ejemplo para proporcionar una frecuencia de resonancia teóricamente igual a cero con cualesquiera pequeñas dimensiones, incluso aunque durante la realización práctica intervengan factores mecánicos y de sensibilidad que fijan un límite inferior a la frecuencia de resonancia. En lo que sigue se describirá el modelo de péndulo plegado horizontal, siendo un modelo de este tipo un elemento básico para el modelo de péndulo plegado vertical.

El modelo lagrangiano desarrollado por Liu *et al.* [4], que se basa en el esquema mecánico descrito en la Figura 1, proporciona una descripción precisa de la dinámica de un péndulo plegado horizontal. El esquema mecánico consiste en dos brazos verticales (conectados a un único apoyo F), un péndulo (también denominado péndulo sencillo (SP) en lo que sigue) de longitud l_p y masa m_p , y un péndulo invertido (también denominado péndulo invertido (IP) en lo que sigue), de longitud l_{ip} y masa m_{ip} , conectados entre sí por una masa central rígida (también denominada masa de prueba (PM) en lo que sigue), m_c . La distancia entre los puntos de rotación de la masa central es fija e igual a l_d . En el modelo de Liu *et al.* [4], los dos brazos verticales se modelizan como masas equivalentes concentradas situadas en su centro geométrico, de donde se deriva que $l_{b1} = l_p/2$ para el péndulo y $l_{b2} = l_{ip}/2$ para el péndulo invertido, aproximaciones bien justificadas por las realizaciones mecánicas de todos los prototipos realizados. En cambio, la masa central, m_c , se modeliza como dos masas equivalentes concentradas, m_{c1} y m_{c2} , siendo ($m_c = m_{c1} + m_{c2}$), situadas en los puntos de rotación de la masa central a distancias l_{c1} y l_{c2} , respectivamente. La inserción de una masa de calibración, m_t (también denominada masa de calibración (CM) en lo que sigue) a una distancia l_t del punto de rotación de la masa central del péndulo, incrementa los valores de las masas equivalentes m_{c1} y m_{c2} en fracciones de la masa de calibración, con cantidades que dependen de la posición l_t de m_t , basándose en las relaciones [6]:

$$m_{c1nueva} = m_{c1anterior} + m_t \left(1 - \frac{l_t}{l_d}\right) \quad m_{c2nueva} = m_{c2anterior} + m_t \frac{l_t}{l_d} \quad (1)$$

lo que permite, como se verá en lo que sigue, variar el valor de la frecuencia de resonancia del mismo péndulo plegado.

En particular, suponiendo longitudes iguales de los dos brazos verticales, ($l_b = l_{b1} = l_{b2}$) y distancias iguales de los puntos de rotación de la masa central, ($l_c = l_{c1} = l_{c2}$), hipótesis confirmada por los prototipos de péndulo plegado monolítico, entonces, para pequeños ángulos de rotación de los brazos del péndulo, la energía potencial se puede aproximar mediante:

$$U = \left\{ \frac{(m_{b1} - m_{b2})gl_b}{2} + \left[(m_{c1} - m_{c2}) + m_t \left(1 - \frac{2l_t}{l_d}\right) \right] gl_c + k_\theta \right\} \theta^2 \quad (2)$$

en donde θ es el ángulo de rotación y k_θ es la constante elástica angular total de las articulaciones. En consecuencia, la frecuencia de resonancia del péndulo plegado, f_o , se expresa por [8]:

$$f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\left[\frac{(m_{b1} - m_{b2})l_b}{2l_c} + (m_{c1} - m_{c2}) + m_t \left(1 - \frac{2l_t}{l_d}\right) \right] \frac{g}{l_c} + \frac{k_\theta}{l_c^2}}{(m_{b1} + m_{b2}) \frac{l_b^2}{3l_c^2} + (m_{c1} + m_{c2}) + m_t}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{geq} + K_{eq}}{M_{eq}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eq}}{M_{eq}}} \quad (3)$$

en donde ω_θ es la frecuencia angular de resonancia, k_{eq} es la constante elástica equivalente, que es la suma de la constante elástica lineal gravitatoria equivalente, K_{geq} ,

$$K_{geq} = \left[(m_{b_1} - m_{b_2}) \frac{l_b}{2l_c} + (m_{c_1} - m_{c_2}) + m_t \left(1 - \frac{2l_t}{l_d} \right) \right] \frac{g}{l_c} \quad (4)$$

y la constante elástica equivalente, K_{eq} ,

$$K_{eq} = \frac{k_\theta}{l_c^2} \quad (5)$$

mientras que la masa equivalente, M_{eq} , se expresa por:

$$M_{eq} = (m_{b_1} + m_{b_2}) \frac{l_b^2}{3l_c^2} + (m_{c_1} + m_{c_2}) + m_t \quad (6)$$

La ecuación (3) permite determinar otro parámetro importante para el diseño del péndulo plegado horizontal, la sensibilidad a la calibración, S_{f_o} , fundamental para garantizar una calibración fácil y estable de la frecuencia de resonancia, f_o . Se obtiene una expresión analítica de S_{f_o} por derivación de la ecuación (3) con respecto a la posición de la masa de calibración, l_c [8]:

$$S_{f_o} = \frac{df_o}{dl_c} = \frac{g}{2\pi l_c l_d} \frac{m_t}{\sqrt{M_{eq}(m_t) K_{eq}}} \quad (7)$$

Esta ecuación muestra que la sensibilidad de la calibración del péndulo plegado horizontal, además de una dependencia obvia de los parámetros geométricos del péndulo plegado, es, de hecho, directamente proporcional al valor de la masa de calibración, m_t . Se señalará aquí que las relaciones que describen el comportamiento de tal péndulo plegado se han derivado considerando la aceleración de la gravedad, g , siempre presente y constante, ya que un péndulo plegado de este tipo ha sido desarrollado y se utiliza en posiciones fijas dentro del campo gravitatorio terrestre. Las aplicaciones del sistema objeto de la presente invención en el espacio, en donde no existe campo gravitatorio, no modifican, en principio, las reivindicaciones de esta invención, en particular en lo referente a la técnica de calibración que se describirá a continuación.

La ecuación (3) muestra también los límites de su uso. En efecto, en ausencia de campo gravitatorio (es decir, incluso con campo gravitatorio compensado), la constante gravitatoria equivalente, K_{geq} , desaparece por que se transforma en la aceleración de la gravedad, g . Por tanto, (3) se reduce a:

$$f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{k_\theta}{l_c^2}}{(m_{b_1} + m_{b_2}) \frac{l_b^2}{3l_c^2} + (m_{c_1} + m_{c_2}) + m_t}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eq}}{M_{eq}}} \quad (8)$$

de donde se deduce que, en ausencia de gravedad, el péndulo plegado pierde todas sus características principales de capacidad de ajuste, posibilidad de presentar frecuencias de resonancia bajas, etc., estando, de hecho, limitado por las constantes elásticas rotacionales de las articulaciones que no pueden compensarse de ninguna manera.

Uno de los elementos clave, que constituye uno de los elementos de novedad introducidos en el marco de la invención, es el de actuar sobre el valor de la constante elástica lineal gravitatoria equivalente, K_{geq} , mediante la aplicación de una fuerza externa constante paralela (en sentidos aditivo y sustractivo) a la fuerza gravitatoria, cuya dirección geométrica es perpendicular a la tangente al movimiento de la masa central del péndulo plegado horizontal en el punto de potencial mínimo.

Para ello, no es importante la tipología de dicha fuerza (magnética, electromagnética, electrostática, etc.), sino su constancia en el tiempo, necesaria para generar un campo conservativo local similar al campo gravitatorio terrestre, pero que tiene un valor determinado en la fase de diseño. La tipología de la fuerza resulta importante, en cambio, con el fin de evaluar el acoplamiento de dicha fuerza y, por lo tanto, del péndulo plegado horizontal, con ruidos ambientales externos.

Es importante precisar que, en principio, dicha fuerza no tiene necesariamente que actuar simultáneamente sobre todos los componentes mecánicos móviles del péndulo plegado (péndulo, péndulo invertido, masa central y masa de calibración), sino que también se puede realizar para que actúe sobre un único componente, si esto resulta técnicamente más conveniente para su realización y para las aplicaciones requeridas.

Por ejemplo, la aplicación de una fuerza constante a la masa central del sensor, que se puede describir dinámicamente por una aceleración, a_{est} , modifica la expresión de la frecuencia de resonancia (3) a

$$f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{[(m_{b1}-m_{b2})\frac{l_b}{2l_c} + (m_{c1}-m_{c2}) + m_t(1-\frac{2l_c}{l_d})]g_{eq} + \frac{k_\theta}{l_c^2}}{(m_{b1}+m_{b2})\frac{l_b^2}{3l_c^2} + (m_{c1}+m_{c2}) + m_t}} \quad (9)$$

en donde $g_{eq} = g + a_{est}$ es la aceleración gravitatoria equivalente, suma de la aceleración de la gravedad, g , y la aceleración externa, a_{est} , generada por las fuerzas externas aplicadas constantes. Esta relación permite comprobar que es posible modificar la frecuencia de resonancia del sistema con una simple variación de la amplitud de la fuerza externa aplicada, sin ninguna intervención mecánica sobre el péndulo plegado.

Debe señalarse en la expresión (9) del modelo que el efecto de la aplicación de una fuerza externa a la masa central se ha propagado también a las masas de los brazos y de la masa de calibración. De hecho, en este modelo se han considerado longitudinalmente inextensibles (en tracción y en compresión) las articulaciones, de manera que la fuerza aplicada a la masa central se considera, basándose en esta hipótesis, aplicada de manera idéntica a las masas de los brazos del péndulo y a la masa de calibración. Modelos más precisos sólo podrían mejorar la precisión de la determinación de la frecuencia de resonancia del péndulo plegado, pero, de hecho, no modifican la esencia del principio sobre el que se basa esta invención.

Resulta evidente que este tipo de configuración hace totalmente utilizable el péndulo plegado en la configuración horizontal incluso para aplicaciones en ausencia de gravedad (por ejemplo, en una aplicación espacial del péndulo invertido), dado que la aceleración, a_{est} , generada por la fuerza externa constante aplicada, compensa de manera controlada la ausencia de la aceleración de la gravedad, g .

Además, una variación de la aceleración de la gravedad, g_{eq} , tiene un efecto directo sobre el valor de la frecuencia de resonancia, como se puede verificar por la relación (3). Tal efecto se puede cuantificar expresando la sensibilidad de la frecuencia de oscilación natural respecto a las variaciones de la constante g_{eq} , dada por

$$S_{f_0} = \frac{df_o}{dg_{eq}} = \frac{1}{8\pi^2} \frac{K_{g_{eq}}}{f_o M_t} \quad (10)$$

La introducción de una fuerza constante, que también se reivindica en la presente invención por sus implicaciones y modificaciones estructurales, incluso en la realización del péndulo plegado horizontal, se convierte en el elemento fundamental para la realización de péndulos plegados verticales, que son una novedad absoluta que nunca se ha realizado ni discutido en la bibliografía. De hecho, como se demostrará en lo que sigue, esta innovación permite recrear las mismas condiciones de trabajo de un péndulo plegado horizontal, manteniendo todas las características peculiares que lo distinguen de las demás configuraciones y que son sus puntos fuertes, entre los cuales, en particular, se recordarán: bajas frecuencias de resonancia, soluciones compactas, tales como las monolíticas, y el acoplamiento más reducido del grado de libertad de la medida con respecto a los otros grados de libertad [5-8].

La estructura básica del péndulo plegado vertical, materia objeto de la invención, es la de un péndulo horizontal rotado 90° en el sentido de las agujas del reloj (o en sentido antihorario), para el cual se reproducen las mismas condiciones de funcionamiento del péndulo horizontal (Figura 3).

En la configuración vertical, la masa central está obligada a tener un movimiento puramente vertical. Sin embargo, la rotación, en 90°, del péndulo plegado modifica el efecto de la acción de la aceleración de la gravedad, g . En efecto, esta última ya no actúa en la dirección perpendicular al movimiento, sino en la dirección paralela al movimiento de la masa central.

Como se observa en la Figura 3, la masa central asume una posición de equilibrio vertical, definido por la ecuación que regula su posición estática. Esta posición, suponiendo en primera aproximación articulaciones caracterizadas por un coeficiente de deformación elástica angular idéntico, se puede definir por una constante elástica global, K_θ , que tiene en cuenta tanto las constantes elásticas como la forma geométrica del sistema, y por una masa total, M_t , que es la suma de todas las masas (péndulo, péndulo invertido, masa central y masa de calibración), mediante la relación clásica:

$$\frac{M_t g l_c}{2} + K_\theta \theta_o = 0 \quad (11)$$

Esta relación proporciona el ángulo θ_o en el cual está situado de forma estática el péndulo vertical. En otros aspectos, teniendo en cuenta que las constantes elásticas de las articulaciones tienen generalmente valores muy pequeños (esto es debido al hecho de que, sobre todo en las realizaciones monolíticas, las articulaciones son generalmente muy delgadas, con el fin de conseguir frecuencias de resonancia muy bajas y realizar calibraciones cómodas y eficaces, sobre todo a bajas frecuencias), generalmente la masa central cae sobre el bastidor, invalidando el funcionamiento del péndulo plegado. Sin embargo, al tratarse de una colocación puramente estática, es posible configurar de nuevo el péndulo plegado a la configuración estática generalmente centrada de un péndulo plegado horizontal de dos formas distintas, pero igualmente eficaces, cuya aplicación depende de los valores de las masas que constituyen el péndulo.

La primera forma consiste en una fuerza paralela externa a la fuerza gravitatoria, que la compensa (o, con menor eficacia desde el punto de vista de la dinámica del sensor, de forma parcial).

Dicha fuerza se puede aplicar, por ejemplo, a la masa central, lo que técnicamente es la opción más conveniente. También en este caso, la tipología de dicha fuerza (magnética, electromagnética, electrostática, etc.) no es importante, sino su constancia a lo largo de tiempo, necesaria para generar un campo conservativo local similar y opuesto al campo gravitatorio terrestre. En cambio, la tipología de la fuerza es importante, también en este caso, a fin de evaluar los acoplamientos de dicha fuerza y, por tanto, del péndulo plegado, con ruidos ambientales externos. En este caso el ángulo, θ_o , se reduce a $\theta_o = 0$ y el péndulo plegado asume exactamente la misma configuración geométrica estática que asumiría si estuviera colocado en la configuración horizontal (Figura 3).

La segunda forma consiste en la realización de una configuración de péndulo plegado vertical por medio de flexión previa de las articulaciones, obtenida por rotación de las mismas. Para ello, se utiliza el valor de la fuerza elástica de rotación generada por la torsión de las articulaciones del péndulo plegado. Las articulaciones están diseñadas y realizadas de manera que el peso de la masa central, la masa de calibración, el péndulo y el péndulo invertido se compensan exactamente por el momento de torsión generado, de manera que la masa central estará situada exactamente en la posición geométrica estática que asumiría si el péndulo plegado estuviera colocado en configuración horizontal. Aunque es más difícil de realizar, ya que necesita evaluaciones muy precisas en la fase de diseño y realización de los sensores, esta configuración es, de hecho, insensible a los efectos de los ruidos ambientales verticales.

A la vista de lo que se ha demostrado en lo que antecede y las suposiciones que se han hecho, incluso para el péndulo plegado vertical colocado en su posición de equilibrio geométrico, para pequeños ángulos de rotación de los brazos del péndulo, la energía potencial se puede aproximar mediante:

$$U = \left\{ \frac{(m_{b1} - m_{b2})g l_b}{2} + \left[(m_{c1} - m_{c2}) + m_t \left(1 - \frac{2l_t}{l_d} \right) \right] l_c a_{est} + k_\theta \right\} \theta^2 \quad (12)$$

en donde θ es el ángulo de rotación, k_θ es la constante elástica angular total de las articulaciones y a_{est} es la aceleración externa generada por las fuerzas externas constantes aplicadas, aplicada por ejemplo a la masa central, y para la cual rigen todas las hipótesis y consideraciones previamente efectuadas, lo que afecta a la precisión del modelo, pero no modifica la esencia del principio sobre el que se basa la invención.

De ello se deduce que la frecuencia de resonancia del péndulo plegado vertical, f_v , se describe por una relación estructuralmente análoga a la del péndulo horizontal (ecuación (9)), en donde la aceleración gravitatoria equivalente se reduce a la única aceleración externa:

$$f_v = \frac{\omega_v}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\left[(m_{b1} - m_{b2}) \frac{l_b}{2l_c} + (m_{c1} - m_{c2}) + m_t \left(1 - \frac{2l_t}{l_d} \right) \right] \frac{a_{est}}{l_c} + \frac{k_\theta}{l_c^2}}{(m_{b1} + m_{b2}) \frac{l_b^2}{3l_c^2} + (m_{c1} - m_{c2}) + m_t}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{a_{eq}} + K_{e_{eq}}}{M_{eq}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{v_{eq}}}{M_{eq}}} \quad (13)$$

en donde ω_v es la frecuencia de resonancia angular vertical, M_{eq} es la masa equivalente y $K_{v_{eq}}$ es la constante elástica vertical equivalente, es decir, la suma de la constante elástica equivalente de las articulaciones $K_{e_{eq}}$ y la constante elástica lineal equivalente de las fuerzas externas, $K_{a_{eq}}$,

$$K_{a_{eq}} = \left[(m_{b1} - m_{b2}) \frac{l_b}{2l_c} + (m_{c1} - m_{c2}) + m_t \left(1 - \frac{2l_t}{l_d} \right) \right] \frac{a_{est}}{l_c} \quad (14)$$

De manera similar a lo que se ha hecho para el péndulo plegado horizontal, también para el péndulo vertical es posible definir una expresión que cuantifique su sensibilidad a la calibración, S_{f_v} , fundamental para garantizar una calibración fácil y estable de la frecuencia, f_v , que se obtiene por derivación de la ecuación (13) con respecto a la posición de la masa de calibración, l_c ,

$$S_{f_v} = \frac{df_v}{dl_t} = \frac{a_{est}}{2\pi l_c l_a} \frac{m_t}{\sqrt{M_{eq}(m_t)K_{veq}}} \quad (15)$$

Esta ecuación demuestra que la sensibilidad de la calibración del péndulo plegado, además de depender obviamente de los parámetros geométricos del péndulo plegado es, de hecho, directamente proporcional al valor de la masa de calibración, m_t , y al valor de la aceleración externa, a_{est} .

En lugar de ello, la sensibilidad de la frecuencia de resonancia, f_v , a las variaciones de la aceleración generadas por las fuerzas estáticas externas aplicadas, a_{est} , está dada por

$$S_{f_v} = \frac{df_v}{da_{est}} = \frac{1}{8\pi^2} \frac{K_{veq}}{f_v M_t} \quad (16)$$

De hecho, un péndulo plegado, rotado en un ángulo cualquiera comprendido entre 0° (péndulo plegado horizontal) y 90° (péndulo plegado vertical), siempre se puede modelizar mediante la combinación de los comportamientos de un péndulo horizontal y de un péndulo vertical. Efectivamente, la rotación, en un ángulo genérico α , del bastidor externo con respecto al plano horizontal modifica la dirección de la acción de la aceleración de la gravedad, g .

Por tanto, se puede descomponer la aceleración de la gravedad, g , en dos componentes, una componente perpendicular al movimiento de la masa central, $g_\alpha = g \cdot \cos \alpha$, y una componente paralela al movimiento de la masa central, $g_\beta = g \cdot \sin \alpha$ (Figura 4).

Para un correcto funcionamiento del péndulo plegado rotado, o al menos para maximizar su dinámica, la componente de g paralela al movimiento de la masa central, g_β , se puede compensar estáticamente de forma análoga a lo anteriormente descrito para el péndulo plegado en configuración vertical. De hecho, si se trata de una colocación puramente estática, es posible configurar de nuevo el péndulo plegado en la configuración estática centrada por aplicación de una fuerza externa paralela a la componente g_β de la fuerza gravitatoria, que la compense totalmente (o, con menor eficacia desde el punto de vista de la dinámica del sensor, de forma parcial) o bien por medio de la realización de una configuración de péndulo plegado mediante flexión previa de las articulaciones, obtenida por rotación de las mismas.

En cambio, la frecuencia de resonancia del péndulo plegado rotado se describe siempre por la ecuación (9), donde la aceleración gravitatoria equivalente viene dada por:

$$g_{eq} = g_\alpha + a_{est} \cdot \quad (17)$$

Por tanto, al haber definido la aceleración gravitatoria equivalente por medio de la ecuación (17), el modelo del péndulo plegado, rotado en un ángulo cualquiera entre 0° y 90° , en el sentido horario o en el sentido antihorario, se describe de manera completa por las ecuaciones de la ecuación (9) a la ecuación (16).

Realización experimental de la invención

El esquema básico empleado para realizar el prototipo de péndulo plegado vertical es idéntico al clásico para un péndulo plegado horizontal monolítico, tal como se describe en la bibliografía [5-8], constituido esencialmente por un péndulo simple, un péndulo invertido y una varilla que conecta los extremos oscilantes de dichos péndulos [6].

Se ha elegido la implementación monolítica de un péndulo plegado de este tipo con el fin de realizar un péndulo de reducidas dimensiones, completamente escalable, no muy sensible a los ruidos ambientales y con bajo nivel de ruido térmico, en particular a baja frecuencia [5-8] [18]. Además, al realizarse todos los componentes mecánicos (partes oscilantes y articulaciones) a través de mecanizado por corte mediante electroerosión de un único bloque de material, el ruido térmico, de hecho generado por las articulaciones, resulta, de hecho, minimizado [6] [18].

En las Figuras, la referencia F se refiere al bastidor, la referencia PM a la masa de prueba, la referencia IP al péndulo invertido y la referencia SP al péndulo simple, G se refiere, por su parte, a una articulación genérica. Se puede añadir a la masa de prueba PM una masa adicional CM, que no ha sido producida a partir del mismo bloque monolítico y a la que se denomina masa de calibración, para utilizarla en la calibración del sistema en cuanto a frecuencia (variación de la frecuencia de resonancia natural).

El sistema así compuesto necesita 4 articulaciones flexibles. Todas las articulaciones se han realizado por pares (8 articulaciones en total), con el fin de limitar los efectos torsionales en las propias articulaciones y, por tanto, reducir al mínimo el acoplamiento entre grados de libertad transversal horizontales y longitudinales (Figura 2, Figura 3 y Figura 5). Tales articulaciones conectan, respectivamente:

- un extremo del péndulo simple y el bastidor que lo soporta;
- el extremo oscilante del péndulo simple y un extremo de la varilla de conexión entre péndulos;
- el otro extremo de la varilla de conexión y el extremo oscilante del péndulo invertido;
- el extremo del péndulo invertido y la estructura que soporta el péndulo plegado.

El prototipo de sensor monolítico, como se muestra en Figura 2, se ha realizado partiendo de un bloque de aluminio (aleación 7075-T6) de 134 mm x 140 mm x 40 mm mediante mecanizado de precisión. Se ha empleado la técnica de electroerosión (EDM, por sus siglas en inglés) para separar del soporte el brazo del péndulo, el brazo del péndulo invertido y la masa central. También se han realizado por corte mediante electroerosión las cuatro articulaciones, utilizando un corte fino de 250 μm . Estas articulaciones se realizan con un perfil elíptico de grosor mínimo 100 μm y una relación de elipticidad igual a 16/5. Los brazos de los péndulos (de 81,5 mm de longitud, 102 mm de grosor, separados 3,50 mm de la masa central y del soporte) están diseñados para minimizar la masa y el momento de inercia sin perder rigidez y simetría. De hecho, los mejores resultados, en términos de baja frecuencia de resonancia y alto valor respectivo del factor de calidad mecánica junto con dimensiones compactas del sistema, los han obtenido Barone *et al.* [8]. La utilización de articulaciones de tipo elíptico, además de garantizar elevados factores de calidad para las realizaciones monolíticas, sobre todo a baja frecuencia, confiere una robustez adecuada a la articulación, a pesar de las reducidas dimensiones de su perfil. Obviamente, se pueden utilizar otras varias configuraciones geométricas de las articulaciones, con diferente funcionalidad y características, también en relación con el ruido térmico introducido, que constituye, en principio, el límite definitivo de la sensibilidad del propio sensor [18] [19].

Obviamente, en la configuración en la que se rota un péndulo plegado de este tipo 90° con respecto a la vertical en el sentido horario (o antihorario), no se podría, en principio, hablar de péndulo y péndulo invertido con respecto a los brazos de péndulo que soportan la masa central, dado que la aceleración de la gravedad actúa transversalmente a dichos brazos. En cualquier caso, estos brazos asumen de nuevo su función cuando está presente la aceleración externa aplicada, a_{est} .

La colocación estática del sensor y la introducción de una fuerza horizontal externa que actúa sobre la masa central de una manera atractora (generando la aceleración externa, a_{est}) se han conseguido mediante la aplicación de fuerzas magnéticas, como se ha descrito anteriormente.

Para evaluar la eficacia y la funcionalidad del modelo, se han llevado a cabo dos series de mediciones.

Para demostrar la viabilidad y la conformidad del procedimiento de calibración horizontal, se ha utilizado un prototipo de péndulo plegado horizontal en la versión de cuatro articulaciones en tracción y cuatro articulaciones en compresión [7] [8] (Figura 2). Obviamente, y sin ninguna pérdida de generalidad, se puede utilizar cualquier realización de péndulo plegado. Se ha aplicado a la masa central de este prototipo una fuerza magnética constante atractora entre la base del sensor y la masa central, generada por una configuración de dos imanes permanentes aplicados entre el soporte y la masa central (Figura 4).

En la Figura 6 se ofrecen los resultados que describen los efectos de la variación de la frecuencia de resonancia en función del valor de la aceleración externa aplicada, a_{est} , por introducción de un campo magnético constante, para el péndulo plegado horizontal en el aire. Tales resultados demuestran toda la funcionalidad de la invención para el objetivo de calibrar la frecuencia de resonancia de los péndulos plegados horizontales.

Para demostrar experimentalmente la viabilidad de un péndulo plegado vertical, se ha utilizado el prototipo de péndulo plegado horizontal en la versión con cuatro articulaciones en tracción y cuatro articulaciones en compresión [7] [8] (Figura 3).

Aplicando lo que se ha descrito en la sección precedente, y estableciendo de un modo adecuado la distancia entre el imán de la base del sensor y el situado en la masa central, que funciona en repulsión, se ha colocado estáticamente la masa central en posición centrada.

A continuación, se ha hecho variar la distancia entre el imán colocado en la masa central y el colocado lateralmente sobre el soporte externo del sensor, que, por el contrario, funciona en atracción, modificando así la frecuencia de resonancia natural del sensor, como se ha descrito y previsto mediante el modelo descrito en la sección precedente.

En la Figura 7 (frecuencia de resonancia en función de la distancia entre los imanes horizontales) y en la Figura 8 (factor de calidad en función de la frecuencia de resonancia) se ofrecen los resultados, de los que se derivan la

conformidad y funcionalidad perfectas de la invención descrita en la presente memoria.

Bibliografía

- [1] "Prospects for Low-Frequency Seismometry", Report of the IRIS Broadband Seismometer Workshop, compilado por S. Ingate y J. Berger, Granlibakken, California (EE.UU.), 24-26 de marzo de (2004).
- 5 [2] A. Bertolini, N. Beverini, G. Cella, R. DeSalvo, F. Fidecaro, M. Francesconi, D. Simonetti, "Geometric anti-spring vertical accelerometers for seismic monitoring", Nuclear Instruments and Methods A 518, 233-235 (2004).
- [3] J. Havskov, G. Alguacil, "Instrumentation in earthquake seismology", versión preliminar, junio de 2002, 46-51 (2002).
- 10 [4] J. Liu, L. Ju, D.G. Blair, "Vibration isolation performance of an ultra-low frequency folded pendulum resonator", Physics Letters A 228, 243-349 (1997).
- [5] A. Bertolini, R. DeSalvo, F. Fidecaro, M. Francesconi, S. Marka, V. Sannibale, D. Simonetti, A. Takamori, H. Tariq, "Mechanical design of a single-axis monolithic accelerometer for advanced seismic attenuation systems", Nuclear Instruments and Methods 556, 616-623 (2006).
- 15 [6] F. Acernese, R. De Rosa, G. Giordano, R. Romano, F. Barone, "Mechanical monolithic horizontal sensor for low frequency seismic noise measurement", Review of Scientific Instruments 79, 074501-1, ISSN: 0034-6748, doi: 10.1063/1.2943415 (2008).
- [7] F. Barone, G. Giordano, "Folded pendulum a bassa frequenza con elevato fattore di qualità meccanico, e sensore sismico utilizzando tale folded pendulum", solicitud de patente italiana n.º RM2009000348, presentada el 07.07.2009 (2009).
- 20 [8] F. Acernese, R. De Rosa, G. Giordano, R. Romano, S. Vilasi, F. Barone, "New tunable mechanical monolithic horizontal seismometer for low frequency-seismic noise measurement", Proceedings of SPIE, vol. 7647, 76472X-1, doi: 10.1117/12.846356 (2010).
- [9] F. Acernese, R. De Rosa, G. Giordano, R. Romano, F. Barone, "Tunable mechanical monolithic sensor with interferometric readout for low frequency seismic noise measurement", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 617, 457, doi: 10.1016/j.nima.2009.10.112 (2010).
- 25 [10] F. Acernese, R. De Rosa, F. Garufi, G. Giordano, R. Romano, F. Barone, "Tunable mechanical monolithic horizontal sensor with high Q for low frequency seismic noise measurement", Journal of Physics: Conference Series 228, 012035, doi: 10.1088/1742-6596/228/1/012.035 (2010).
- [11] F. Acernese, R. De Rosa, G. Giordano, R. Romano, S. Vilasi, F. Barone, "Tunable mechanical monolithic horizontal accelerometer for low frequency seismic noise measurement", Proceedings of SPIE, vol. 7292, 72922J-1, doi: 10.1117/12.814106 (2009).
- 30 [12] F. Barone, F., "Low-noise, mechanical, monolithic seismic sensors", SPIE Newsroom, p.1-2, doi: 10.1117/2.1200907.1742 (2009).
- [13] F. Acernese, R. De Rosa, G. Giordano, R. Romano, F. Barone, "Tunable mechanical monolithic horizontal accelerometer for low frequency seismic noise measurement", Proceedings of SPIE, vol. 7478, 74782R-1, doi: 10.1117/12.830259 (2009).
- 35 [14] F. Acernese, G. Giordano, R. Romano, R. De Rosa y F. Barone, "Mechanical monolithic accelerometer for suspension inertial damping and low frequency seismic noise measurement", Journal of Physics, Conference Series (on line), vol. 122, 012012-1, ISSN: 1742-6596, doi: 10.1088/1742-6596/122/1/012012 (2008).
- 40 [15] F. Acernese, R. De Rosa, G. Giordano, R. Romano, F. Barone, "Tunable mechanical monolithic accelerometer for low frequency seismic noise measurement", Proceedings of SPIE, vol. 7110, 711011-1, doi: 10.1117/12.800429 (2008).
- [16] F. Acernese, R. De Rosa, G. Giordano, R. Romano, F. Barone, "Tunable mechanical monolithic sensor with interferometric readout for low frequency seismic noise measurement", Proceedings of SPIE, vol. 6932, 69320K-1, doi: 10.1117/12.772196 (2008).
- 45 [17] G. Giordano, "Development and test of tunable mechanical monolithic horizontal accelerometer for low frequency seismic noise measurement", Tesis de doctorado en "Riesgo Sísmico", Università degli Studi di Napoli "Federico II" (2008).
- [18] P.R. Saulson, "Thermal noise in mechanical experiments", Physical Review D - Particles and Fields 42, 2437-2445 (1990).
- 50

[19] T. Stuart, *et al.* (1997), "Elliptical flexure hinges", Review of Scientific Instruments, 68 (3).

[20] Y.M. Tseytlin, "Notch flexure hinges: an effective theory", Review of Scientific Instruments 73, 3363-3368 (2002).

En lo que antecede se han descrito realizaciones preferidas y aspectos de la invención y se han sugerido variaciones a la presente invención, pero se entenderá que los expertos en la técnica podrán modificar y aplicar cambios sin salir del alcance relevante, definido en las reivindicaciones adjuntas.

5

REIVINDICACIONES

1. Péndulo plegado con frecuencia de oscilación ajustable, que comprende:

- un soporte (F);
- una masa de prueba (PM);
- un péndulo simple (SP);
- un péndulo invertido (IP);

estando el péndulo simple y el péndulo invertido conectados por uno de sus extremos a la masa de prueba (PM) y por el otro extremo al soporte (F) a través de 4 sistemas (G) de articulación correspondientes, sin estar la masa de prueba conectada al soporte (F) y siendo, por lo tanto, libre para oscilar,

caracterizándose el péndulo plegado por:

- estar situados el péndulo simple (SP) y el péndulo invertido (IP), con referencia a la posición estática de equilibrio, esencialmente a lo largo de una dirección de disposición perpendicular a la tangente al movimiento de la masa de prueba (PM) en el punto de centrado geométrico con respecto al soporte (F);

- un primer medio para aplicar una primera fuerza externa constante en uno o más puntos del péndulo simple (SP) y/o del péndulo invertido (IP) y/o la masa de prueba (PM), en la dirección de la tangente al movimiento de la masa de prueba (PM) en el punto de centrado geométrico con respecto al soporte (F);

- un segundo medio para aplicar una segunda fuerza externa constante a lo largo de dicha dirección de disposición en uno o más puntos del péndulo simple (SP) y/o del péndulo invertido (IP) y/o la masa de prueba (PM), para generar un campo conservativo local de valor predefinido;

siendo la frecuencia de oscilación del péndulo plegado una función de dicha segunda fuerza externa.

2. Péndulo plegado según la reivindicación 1, caracterizado por que, en condiciones de gravedad y con el péndulo plegado rotado un ángulo α con respecto a la fuerza gravitatoria g , dicha primera fuerza externa constante es paralela a la componente g_{β} de la fuerza gravitatoria paralela al movimiento de la masa central y es tal que compensa al menos parcialmente dicha componente g_{β} , mientras que dicha segunda fuerza externa constante es paralela a la componente g_{α} de la fuerza gravitatoria que es perpendicular a la componente g_{β} .

3. Péndulo plegado según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que los sistemas de unión relevantes para el péndulo simple (SP) comprenden cada uno una o varias articulaciones en tensión con respecto a dicha segunda fuerza externa constante, y los sistemas de unión relevantes para el péndulo invertido (IP) comprenden cada uno una o varias articulaciones en compresión con respecto a dicha segunda fuerza externa constante.

4. Péndulo plegado según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que dicha primera fuerza externa constante se obtiene mecánicamente mediante flexión previa de las articulaciones, por rotación de las mismas, durante la fase de producción

5. Péndulo plegado según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que dicha primera fuerza externa constante es una fuerza magnética (PM1, MG1, MG2, F2) que actúa sobre la masa de prueba (PM).

6. Péndulo plegado según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que dicha segunda fuerza externa constante es una fuerza magnética (PM2, MC1, MC2, F3) que actúa sobre la masa de prueba (PM).

7. Péndulo plegado con frecuencia de oscilación ajustable, que comprende:

- un soporte (F);
- una masa de prueba (PM);
- un péndulo simple (SP);
- un péndulo invertido (IP);

estando el péndulo simple y el péndulo invertido conectados por uno de sus extremos a la masa de prueba (PM) y por el otro extremo al soporte (F) a través de cuatro sistemas (G) de articulación correspondientes, sin estar la masa de prueba conectada al soporte (F) y siendo, por lo tanto, libre para oscilar, comprendiendo los sistemas (G) de articulación relevantes para el péndulo simple (PS) una o varias articulaciones en tensión, comprendiendo los

sistemas (G) de articulación relevantes para el péndulo invertido (IP) una o varias articulaciones en compresión, caracterizándose el péndulo plegado por:

- 5 - un medio para aplicar una fuerza externa constante en uno o más puntos del péndulo simple (SP) y/o del péndulo invertido (IP) y/o la masa de prueba (PM), en la dirección perpendicular al movimiento de la masa de prueba (PM) en el punto de centrado geométrico con respecto al soporte (F);
siendo la frecuencia de oscilación del péndulo plegado una función de dicha fuerza externa.
- 10 8. Péndulo plegado según la reivindicación 7, caracterizado por que dicha fuerza externa constante es una fuerza magnética (PM3, MT1, MT2, F4) que actúa sobre la masa de prueba (PM).
9. Péndulo plegado según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que se forma a partir de un bloque monolítico de material, adecuadamente mecanizado.
10. Péndulo plegado según la reivindicación 9, caracterizado por que el bloque monolítico se mecaniza por corte mediante electroerosión.
- 15 11. Péndulo plegado según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizado por que cada uno de dichos sistemas (G) de articulación comprende dos articulaciones.
12. Péndulo plegado según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, caracterizado por que dichas una o varias articulaciones son articulaciones elípticas.
- 20 13. Péndulo plegado según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, caracterizado por que dichos sistemas (G) de articulación comprenden dos articulaciones trazadas por eliminación de dos elipses con excentricidad $\varepsilon > 3,2$ y que tienen una separación mutua $d > 10$ micrómetros.
14. Péndulo plegado según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, caracterizado por que la masa de prueba (PM) tiene una forma que es esencialmente paralelepípedica con una abertura central, efectuada para reducir su masa.
- 25 15. Péndulo plegado según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14, caracterizado por que la distancia entre las caras enfrentadas de la masa de prueba (PM) o del soporte (F), y en cada caso del péndulo simple (SP) o del péndulo invertido (IP), es de al menos 250 μm .
16. Sensor de oscilaciones, en particular sensor sísmico, que comprende:
30 - un péndulo plegado que comprende una masa de prueba (PM) y un soporte (F), un péndulo simple (SP) y un péndulo invertido(IP);
- un sistema para detectar el desplazamiento aparente de la masa de prueba (PM) con respecto al soporte (F),
35 y está caracterizado por que el péndulo plegado es el péndulo plegado según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15.
17. Sensor según la reivindicación 16, caracterizado por que dicho sistema para detectar el desplazamiento aparente de la masa de prueba (PM) es un sistema óptico y comprende:
40 - una fuente luminosa que envía un haz de luz sobre dicha masa de prueba (PM), y precisamente sobre
- un espejo que está integrado con dicha masa de prueba (PM),
- un dispositivo para detectar la luz reflejada por dicho espejo;
45 - un dispositivo de tratamiento electrónico para calcular dicho desplazamiento aparente.

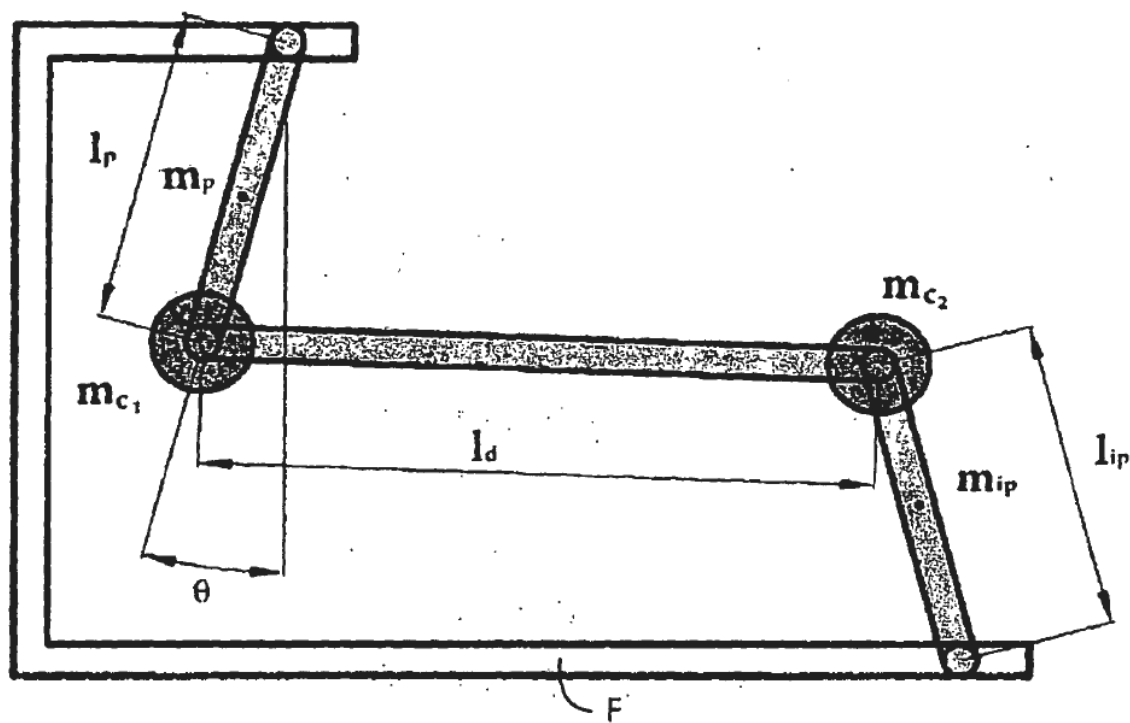


Fig. 1

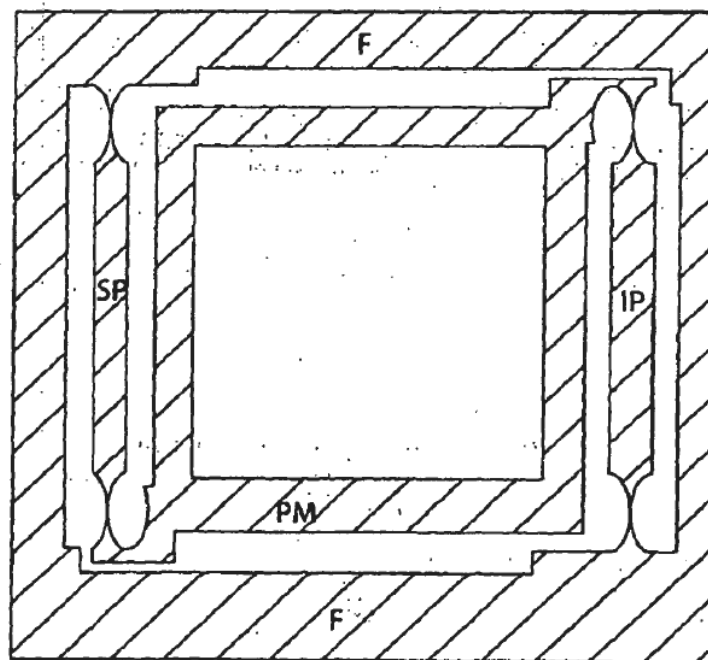


Fig. 2

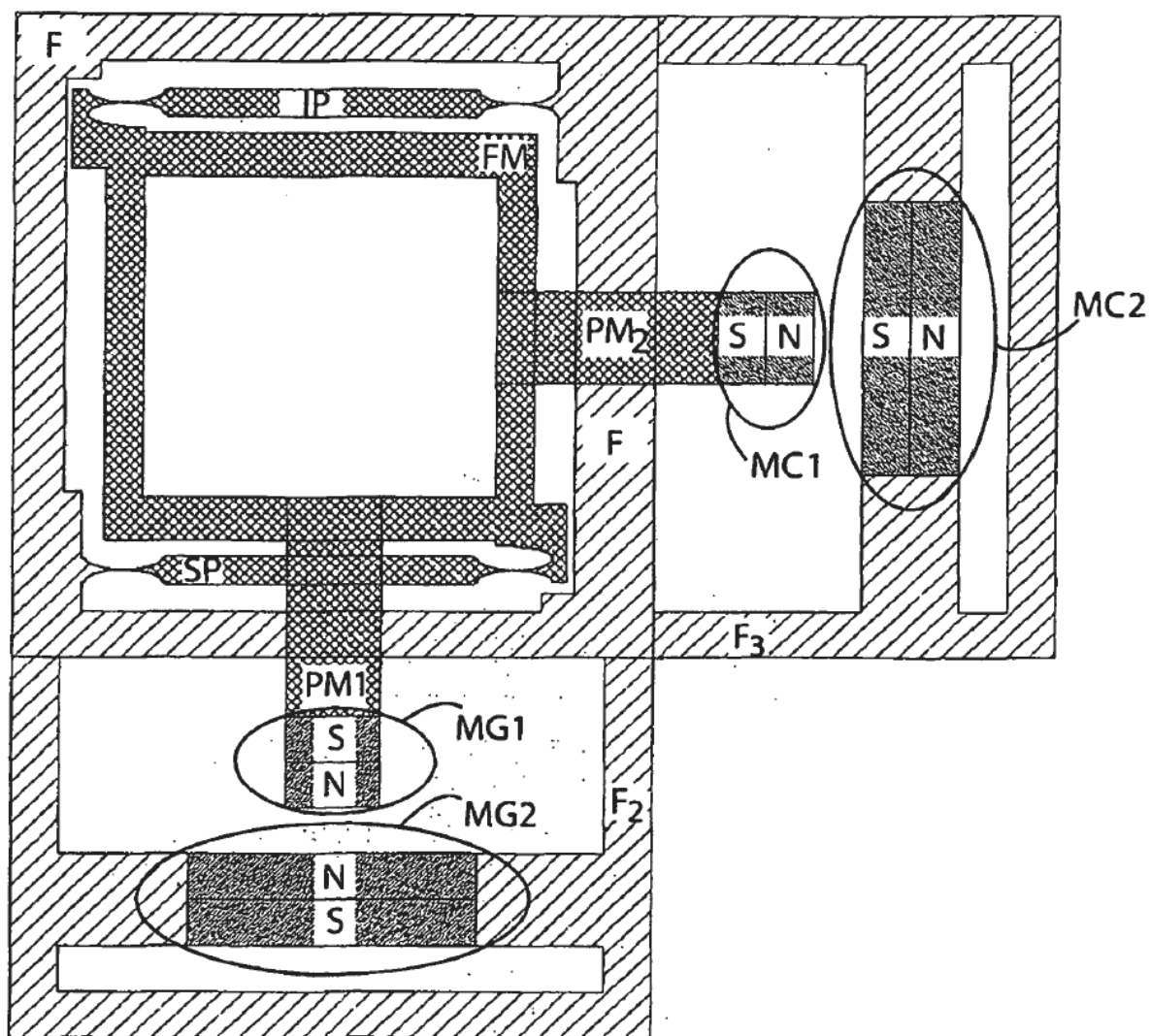


Fig. 3

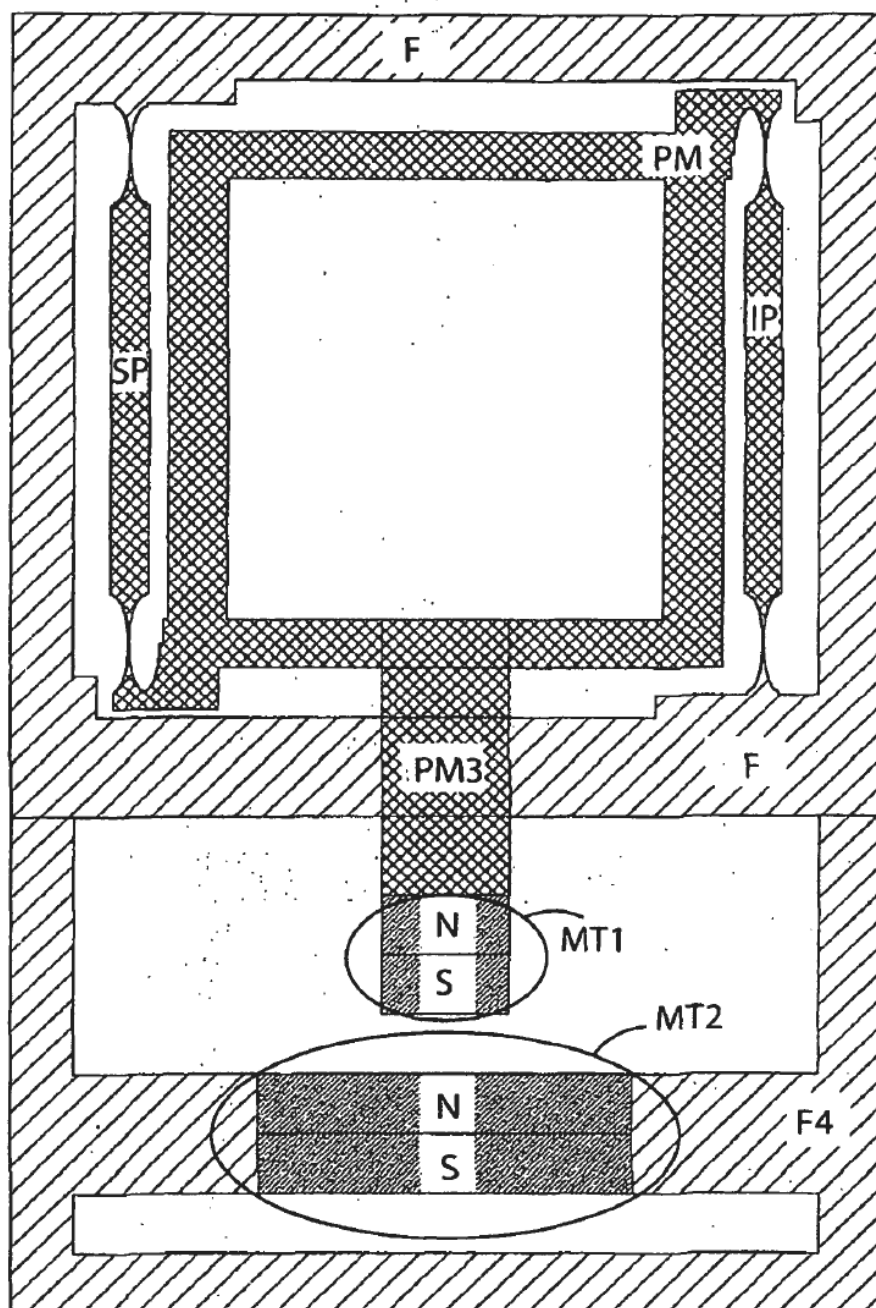


Fig. 5

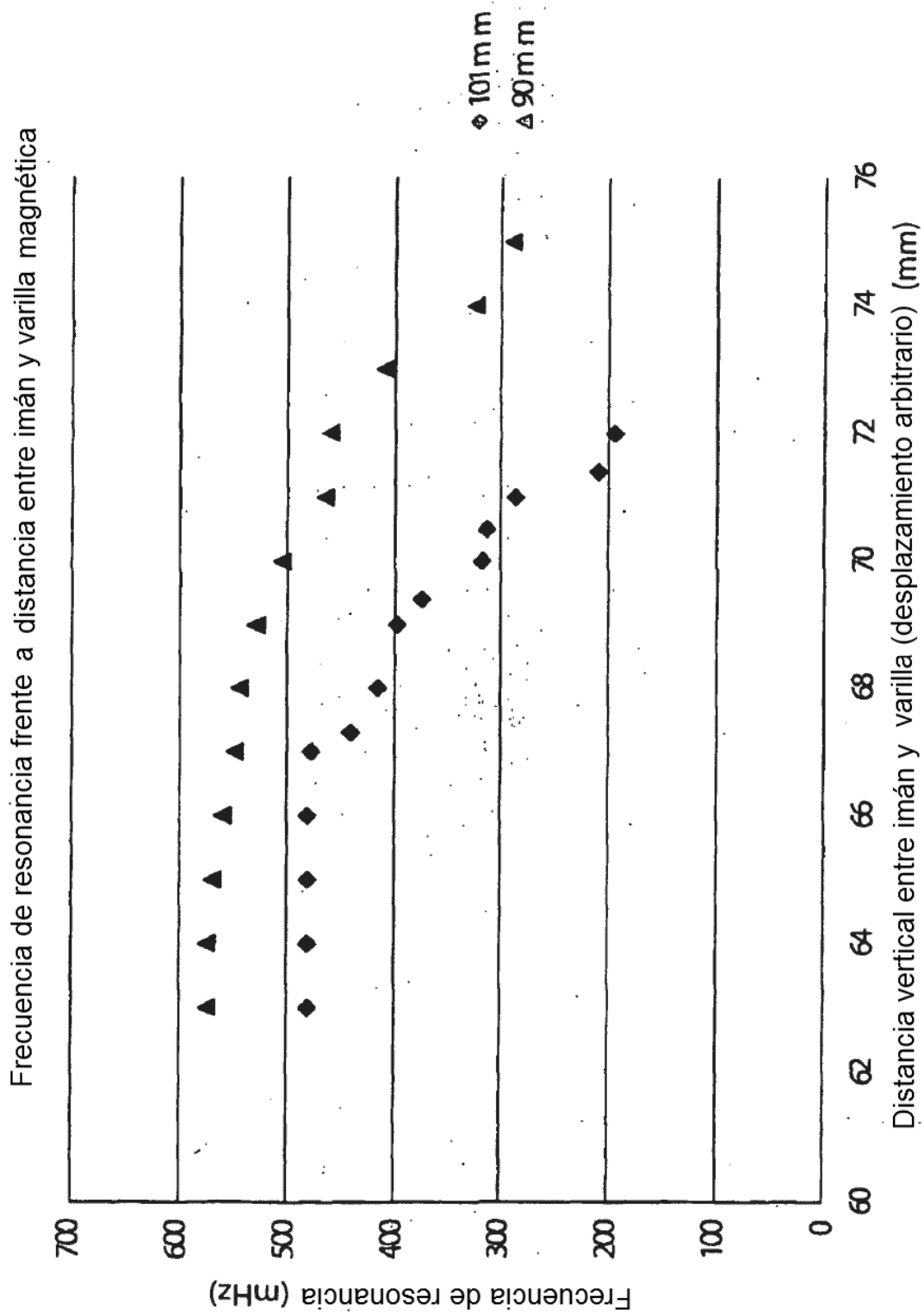


Fig. 6

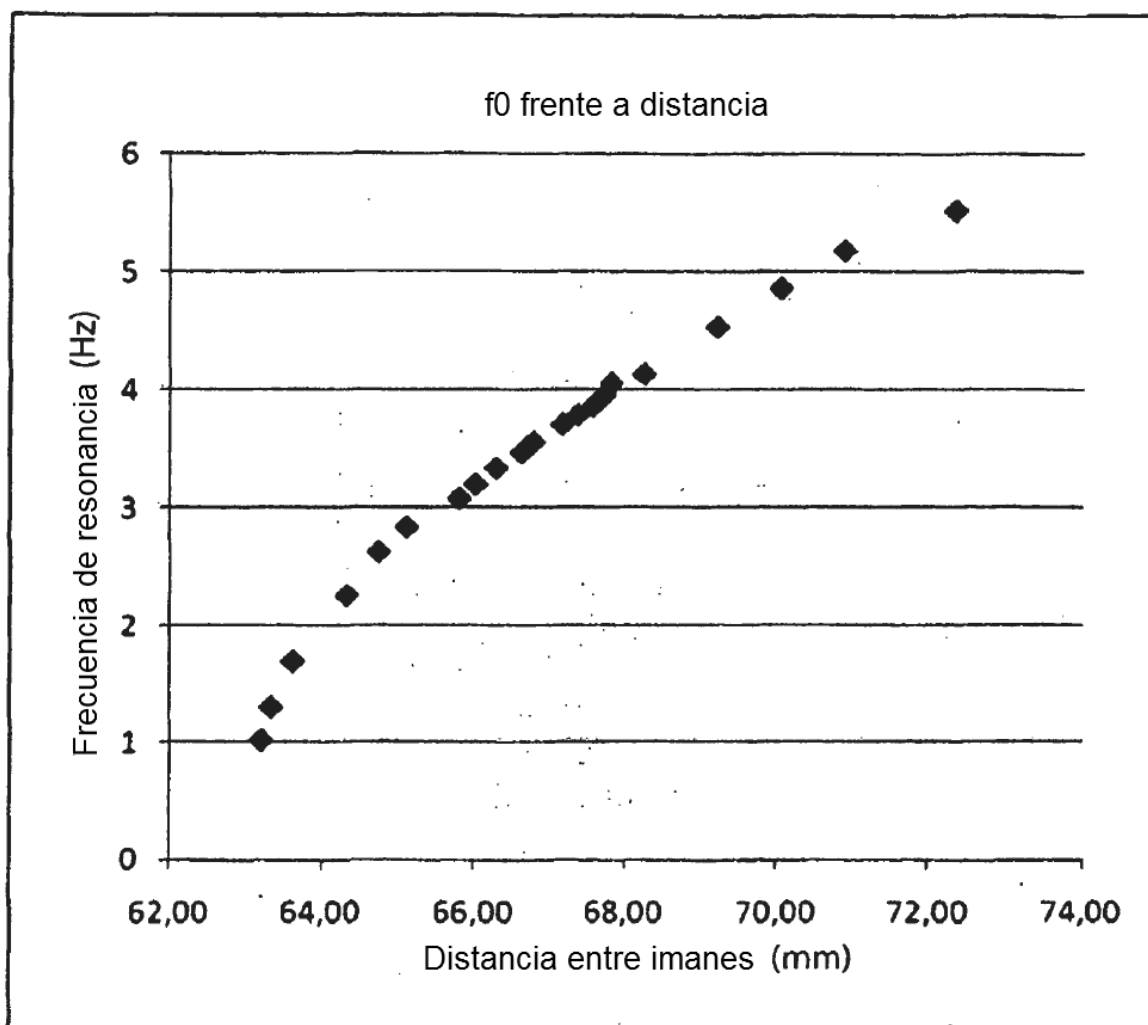


Fig. 7

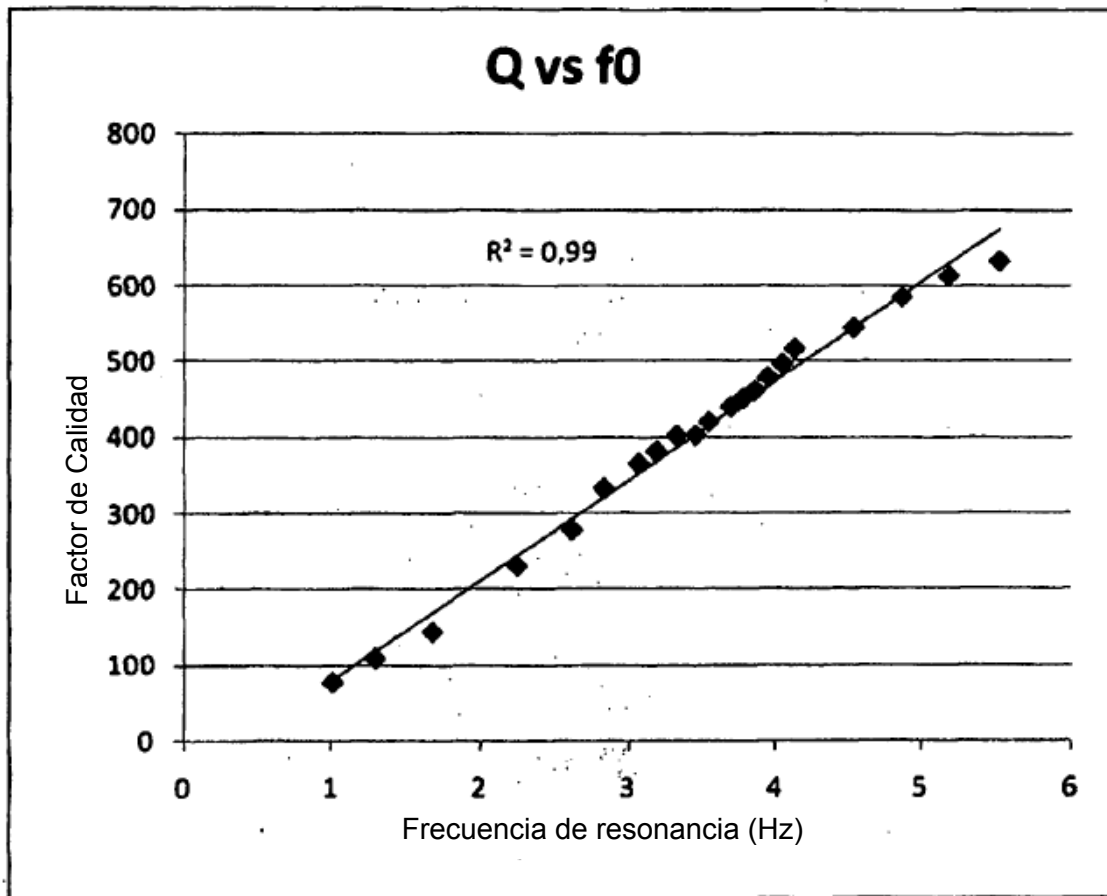


Fig. 8