

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 628 241**

51 Int. Cl.:

F16F 15/03 (2006.01)

F16F 7/10 (2006.01)

F16F 15/02 (2006.01)

F16F 15/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **02.07.2014 PCT/GB2014/052002**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.01.2015 WO15004425**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.07.2014 E 14736930 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.05.2017 EP 3019768**

54 Título: **Mejoras en el control de vibraciones y relacionadas con este**

30 Prioridad:

12.07.2013 GB 201312497
12.07.2013 EP 13275162

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.08.2017

73 Titular/es:

BAE SYSTEMS PLC (100.0%)
6 Carlton Gardens
London SW1Y 5AD, GB

72 Inventor/es:

DALEY, STEPHEN;
ELLIOTT, STEPHEN, JOHN;
RUSTIGHI, EMILIANO y
ZILLETTI, MICHELLE

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 628 241 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

Mejoras en el control de vibraciones y relacionadas con este

Campo de la invención

5 Esta invención se refiere al campo del control de vibraciones. Más en particular, la invención se refiere a la supresión activa de vibraciones provocadas por maquinaria. Aún más en particular, aunque no exclusivamente, la invención se refiere a una supresión activa de vibraciones en vehículos, por ejemplo, embarcaciones náuticas.

Técnica anterior

10 Habitualmente, la maquinaria vibra mientras funciona. La vibración puede provocar problemas, por ejemplo, daño mecánico, menor eficiencia de funcionamiento, aumento del ruido e incomodidad para las personas en las proximidades de la máquina. Por ejemplo, en un vehículo náutico, tal como un barco, una vibración excesiva procedente de los motores del barco puede hacer el viaje en el barco incómodo.

15 Existe constancia de la utilización de soportes activos de aislamiento tipo plataforma flotante para la maquinaria con el fin de controlar las vibraciones que se generan a partir del funcionamiento de la maquinaria. No obstante, la maquinaria está acoplada habitualmente a su entorno de maneras adicionales al acoplamiento a través del soporte de la maquinaria, por ejemplo, mediante acoplamientos flexibles asociados con los sistemas de escape, refrigeración y de suministro de combustible y energía. Dichos acoplamientos y otras conexiones proporcionan caminos adicionales para la propagación de las vibraciones desde la maquinaria, incluso si no hubiera vibraciones acopladas a través de los soportes.

20 Wölfel Beratende Ingenieure GmbH + Co. KG produce un absorbedor activo (*ADD.Pipe*) para la reducción de vibraciones en tuberías en sistemas de tuberías de plantas químicas y centrales eléctricas. Las vibraciones en dichos sistemas están provocadas habitualmente por agua u otros arietes líquidos, pulsos de presión u otras excitaciones. El sistema *ADD.Pipe* es un collarín que se sujeta en el sistema de tuberías e incluye un sensor, que mide las vibraciones en la tubería, y unos actuadores lineales controlados de manera activa de modo que muevan masas de reacción para amortiguar las vibraciones en la tubería. No obstante, el sistema ofrece únicamente un control limitado, y potencialmente sufre un efecto conocido como de fijación, en el que se reduce la vibración en el punto de sujeción del collarín, pero empeora en cualquier otro punto del conducto.

30 El documento JPH0526291 describe un tubo de caucho que es una estructura que se soporta en una situación en forma de ménsula. Durante el amortiguamiento del tubo de caucho, se envía una señal de control a una válvula de control desde un dispositivo de generación de señales de activación de la válvula. Se libera una válvula y desde el extremo fijo del tubo de caucho entra una cantidad dada de un flujo de aire desde un tanque de aire comprimido. Por medio del flujo del flujo de aire a través del tubo de caucho, se ejerce una acción de amortiguamiento sobre el tubo de caucho mediante una fuerza de Coriolis y la amplitud de un extremo libre se hace disminuir gradualmente. La disminución de la amplitud de la vibración se detecta mediante un medidor del desplazamiento sin contacto, se introduce una señal de desplazamiento desde este a un generador de señales de activación de la válvula, y se cambia una señal de control. Por tanto, la apertura de la válvula se controla libremente de acuerdo con una magnitud de la amplitud del extremo libre del tubo de caucho, y cuando la magnitud de la amplitud está por debajo de un valor especificado, se detiene el flujo de aire. Esta disposición produce un efecto suave de amortiguamiento sin dañar el tubo de caucho.

40 El documento JPH04281870 describe un cuerpo de un recipiente de separación dispuesto de manera que cuelgue de un bastidor que tiene un detector sísmico y se dispone un alojamiento de rodamiento en un bloque de la chumacera del bastidor. Un eje giratorio se monta en ménsula, de manera que pueda rotar libremente, en este alojamiento de rodamiento, a través del bastidor, hasta un cuerpo de un recipiente de separación. Un recipiente de separación se articula en este eje giratorio y entre el bloque de la chumacera y el alojamiento de rodamiento se interponen un resorte amortiguador de vibraciones y el amortiguador de fluido magnético. El electroimán se conecta a este amortiguador de fluido magnético de manera directa o de manera indirecta al detector sísmico y se dispone así de modo que se energice en el momento de los sismos. En consecuencia, el electroimán se energiza y excita de acuerdo con la señal procedente del detector sísmico, mediante lo cual el fluido magnético del amortiguador de fluido magnético se energiza y la vibración se amortigua.

50 El documento JPS5950243 describe un brazo de soporte, en forma de un vástago alargado, que se monta en ménsula en un casco, sujeto de una manera flexible en su extremo en una posición predeterminada por medio de una abrazadera de soporte, y se instala un resorte entre esta y el casco para permitir que el brazo de soporte vibre. Un peso, que se monta en el brazo de soporte y que es capaz de cambiar su frecuencia natural k_2 en respuesta al cambio en la distancia desde el punto de soporte, se mueve mediante un motor mediante un mecanismo de rosca de tornillo. La frecuencia omega de la vibración procedente de un motor se detecta mediante un acelerómetro. En función de la frecuencia detectada por el acelerómetro, un dispositivo de control hace funcionar el motor para mover

el peso de modo que $k_2 = \omega$. Como resultado, se puede detener la vibración de la estructura que vibra.

5 El documento JPH07113438 describe un dispositivo dinámico de absorción de vibraciones, donde se monta un peso en un cuerpo que vibra mediante un medio elástico, de modo que absorba la vibración de un cuerpo que vibra, donde el medio consta de un eje de soporte proyectado en una forma de ménsula desde una estructura de montaje y el peso se monta en el eje de modo que se mueva en la dirección axial.

Sería ventajoso proporcionar un aparato, que incluya un supresor activo de vibraciones, en el que se eliminen o al menos se reduzcan una o más de las desventajas mencionadas anteriormente.

Exposición de la invención

10 La presente invención se define mediante el conjunto de reivindicaciones adjunto. Un primer aspecto de la invención proporciona un aparato que incluye una máquina, un vástago y una placa, donde la máquina está en un primer lado de la placa y al menos parte del vástago está en el segundo lado opuesto de la placa, y donde la placa es susceptible a las vibraciones que surgen del funcionamiento de la máquina, incluyendo el aparato un supresor activo de vibraciones, montado en el vástago, y un controlador configurado de modo que controle el supresor activo de vibraciones con el fin de reducir las vibraciones de la placa, caracterizado por que el vástago pasa a través de la
15 placa, desde el primer lado de la placa hasta el segundo lado de la placa.

Puede considerarse que las vibraciones de la placa se minimizan.

Puede considerarse que la máquina es una fuente de fuerza motriz, por ejemplo, un motor, por ejemplo, un motor de combustión interna, un motor eléctrico o una turbina.

20 Puede considerarse que el vástago está conectado, por ejemplo, conectado directamente, a la máquina. Puede considerarse que el vástago está impulsado por la máquina. Puede considerarse que el vástago es también susceptible a las vibraciones que surgen a partir del funcionamiento de la máquina.

25 Puede considerarse que el vástago es una tubería. Puede considerarse que el vástago es un cable o un manojo de cables. Puede considerarse que el vástago está conectado o asociado a la máquina, por ejemplo, puede considerarse una tubería que transporta un fluido a la máquina o desde esta (por ejemplo, combustible, refrigerante o gases de escape) o un conducto que transporta, por ejemplo, acoplamientos de energía eléctrica.

Puede considerarse que el vástago es flexible. Como alternativa, puede considerarse que el vástago es rígido.

Puede considerarse que la placa es una placa plana. Puede considerarse que la placa es una placa curva.

Puede considerarse que la placa es un casco o una pared o un mamparo.

30 Puede considerarse que la placa es una carcasa que contiene la máquina o parte de esta. La carcasa puede ser, por ejemplo, una carcasa en forma de cubo, o una carcasa en forma de bóveda, o tener otra forma o una más compleja. Puede considerarse que la placa forma parte de una pared de la carcasa: en ese caso, el primer lado de la placa será el interior de la carcasa y el segundo lado de la placa será el exterior de la carcasa.

Puede considerarse que la placa es parte de la propia máquina, o está conectada directamente a la máquina.

Puede considerarse que el vástago o al menos parte del vástago es perpendicular a la placa.

35 Puede considerarse que al menos parte del vástago es paralelo a la placa.

Puede considerarse que el vástago está conectado de manera rígida a la placa.

Puede considerarse que el vástago está conectado de manera elástica a la placa.

40 Puede considerarse que el vástago está formado a partir de una primera parte en el primer lado de la placa y una segunda parte en el segundo lado de la placa, de modo que la primera y segunda parte se encuentren en la placa y se conecten entre sí y/o a la placa.

Puede considerarse que el supresor activo de vibraciones está montado en el vástago en el segundo lado de la placa, es decir, el lado opuesto al de la máquina.

45 Puede considerarse que el supresor activo de vibraciones incluye un collarín que está conectado al vástago y rodea al menos parcialmente su circunferencia. Puede considerarse que el collarín rodea completamente la circunferencia del vástago. Puede considerarse que el collarín está integrado con el vástago (es decir, ambos son monolíticos). Puede considerarse que el collarín se fija de manera permanente al vástago. Puede considerarse que el collarín se puede fijar de manera desmontable al vástago. Puede considerarse que el collarín se puede mover en el vástago.

Puede considerarse que el collarín está situado inmediatamente adyacente a la placa.

5 Puede considerarse que el supresor activo de vibraciones comprende una pluralidad de (por ejemplo 5) actuadores dispuestos de modo que actúen sobre el vástago. Puede considerarse que los actuadores actúan sobre el vástago de manera directa o puede considerarse que los actuadores actúan sobre el vástago de manera indirecta, por ejemplo, a través del collarín, si está presente. Puede considerarse que al menos uno de los actuadores está
 10 dispuesto de modo que actúe en una dirección paralela a la longitud del vástago. Puede considerarse que hay tres actuadores, dispuestos de modo que actúen sobre el vástago en tres direcciones ortogonales. Puede considerarse que dos o más de la pluralidad de los actuadores están dispuestos de modo que actúen sobre el vástago en la misma dirección, por ejemplo, en una dirección paralela a la longitud del vástago. Por ejemplo, puede haber tres o
 15 más actuadores dispuestos de modo que actúen en una dirección paralela a la longitud del vástago, actuando sobre una primera superficie de un collarín conectado al vástago y que lo rodea al menos parcialmente, donde la primera superficie es perpendicular al vástago, y puede haber dos o más actuadores adicionales dispuestos de modo que actúen en dos direcciones ortogonales a la longitud del vástago y entre sí, actuando sobre el collarín en una superficie perpendicular a la primera superficie. Puede considerarse que la pluralidad de actuadores incluye uno o
 20 más actuadores dispuestos de modo que apliquen un momento flector al vástago. Puede considerarse que la pluralidad de actuadores incluye dos o más actuadores dispuestos de modo que apliquen momentos flectores ortogonales al vástago. Puede considerarse que la pluralidad de actuadores incluye uno o más actuadores dispuestos de modo que apliquen fuerzas radiales para inducir una compresión en el vástago, de manera ventajosa, el vástago puede ser una tubería dispuesta de modo que transporte un flujo, y el controlador se puede configurar de modo que controle ese o esos actuadores para suprimir el ruido del flujo en la tubería.

Los actuadores pueden ser actuadores magnetoestrictivos. Los actuadores pueden ser activadores de bobina de voz. Los actuadores pueden ser dispositivos piezoeléctricos.

25 El aparato puede comprender además una pluralidad de sensores dispuestos para detectar vibraciones de la placa y para generar una señal indicativa de esas vibraciones. Los sensores pueden medir, por ejemplo, la velocidad de la placa en la ubicación del sensor. El controlador se puede configurar de modo que reciba la señal generada y la utilice para determinar una señal de control que se debe generar y aplicar a los actuadores con el fin de suprimir las vibraciones de la placa. El controlador se puede configurar de modo que suprima las vibraciones de la placa minimizando un parámetro derivado a partir de la señal procedente de los sensores, por ejemplo, minimizando la suma de las velocidades cuadráticas medias medidas por los sensores. El controlador se puede configurar de modo que controle tres grados de libertad de movimiento de la placa, por ejemplo, el movimiento en tres direcciones ortogonales, dos en el plano de la placa y la tercera perpendicular a la placa, o una perpendicular a la placa y los momentos en torno a dos ejes perpendiculares en el plano de la placa. El controlador se puede configurar de modo que controle cinco grados de libertad de movimiento de la placa, por ejemplo, el movimiento en tres direcciones ortogonales, dos en el plano de la placa y la tercera perpendicular a la placa, y los momentos en torno a dos ejes perpendiculares en el plano de la placa. Puede considerarse que hay el mismo número de actuadores que de grados de libertad de movimiento controlados por el controlador.
 35

40 Puede considerarse que el controlador se configura de modo que controle el supresor activo de vibraciones también para reducir las vibraciones de una parte adicional del aparato, por ejemplo, una parte del vástago u otro vástago incluido en el aparato. En ese caso, el aparato puede comprender además una pluralidad de sensores dispuestos de modo que detecten las vibraciones de una parte adicional del aparato y generen una señal indicativa de esas vibraciones. Los sensores pueden medir, por ejemplo, la velocidad de la parte adicional en la ubicación del sensor. El controlador se puede configurar de modo que reciba la señal generada y la utilice para determinar una señal de control que se debe generar y aplicar a los actuadores con el fin de suprimir las vibraciones de la parte adicional. El controlador se puede configurar de modo que suprima las vibraciones de la parte adicional minimizando un parámetro derivado de la señal procedente de los sensores, por ejemplo, minimizando la suma de las velocidades cuadráticas medias medidas por los sensores. El controlador se puede configurar de modo que controle tres grados de libertad de movimiento de la parte adicional, por ejemplo, el movimiento en tres direcciones ortogonales. El controlador se puede configurar de modo que controle cinco grados de libertad de movimiento de la parte adicional, por ejemplo, el movimiento en tres direcciones ortogonales y los momentos en torno a dos ejes perpendiculares.
 45
 50 Puede considerarse que hay el mismo número de actuadores que de grados de libertad de movimiento controlados por el controlador.

55 Un segundo aspecto de la invención proporciona un método de supresión de las vibraciones que surgen a partir del funcionamiento de una máquina, donde la máquina es parte de un aparato que también incluye un vástago y una placa, estando la máquina en un primer lado de la placa y estando al menos parte del vástago en el segundo lado opuesto de la placa, donde la placa es susceptible a las vibraciones que surgen a partir del funcionamiento de la máquina, comprendiendo el método aplicar una fuerza controlada de manera activa sobre el vástago para reducir las vibraciones de la placa, caracterizada por que el vástago pasa a través de la placa, desde el primer lado de la placa hasta el segundo lado de la placa.

Por supuesto se apreciará que las características descritas en relación con un aspecto de la presente invención se

pueden incorporar en otros aspectos de la presente invención. Por ejemplo, el método de la invención puede incorporar cualquiera de las características descritas al hacer referencia al aparato de la invención y viceversa.

Descripción breve de los dibujos

5 A continuación, se describirán realizaciones ejemplares de la invención únicamente a modo de ejemplo y haciendo referencia a los dibujos anexos, en los cuales:

la figura 1 es un aparato que es una realización ejemplar de la invención, mostrada en (a) alzado frontal y (b) alzado lateral;

la figura 2 es un alzado frontal de un collarín del aparato de la figura 1;

10 la figura 3 es una gráfica, frente a la frecuencia en hercios, de la potencia en vatios, que se introduce en la placa del aparato de la figura 1 en una simulación, sin control (línea continua), cuando se minimiza la entrada de potencia en la placa (línea a trazos) y también cuando se minimiza la suma de los cuadrados de las velocidades, medidas utilizando tres fuerzas de control verticales (es decir, en el eje z, paralelas a la viga) (línea a trazos) y utilizando tres fuerzas de control horizontales (es decir, paralelas a la placa) (línea de puntos), actuando todas sobre la placa;

15 la figura 4 es una gráfica, frente a la frecuencia en hercios, de la potencia en vatios que se introduce en la placa del aparato de la figura 1 en una simulación, sin control (línea continua), cuando se minimiza la entrada de potencia en la placa (línea a trazos) y también cuando se minimiza la suma de los cuadrados de las velocidades, medidas utilizando 3 sensores ubicados en la placa (línea de puntos), donde el controlador consta de tres fuerzas que actúan sobre la viga a 3 cm de la placa;

20 la figura 5 es una gráfica, frente a la frecuencia en hercios, de la potencia en vatios que se introduce en la placa del aparato de la figura 1 en una simulación, sin control (línea continua), cuando se minimiza la entrada de potencia en la placa (línea a trazos) y también cuando se minimiza la suma de los cuadrados de las velocidades, medidas utilizando 3 sensores ubicados en la placa (línea de puntos), donde el controlador consta de tres fuerzas que actúan sobre la viga a 3 cm de la placa;

25 la figura 5 es una gráfica, frente a la frecuencia en hercios, de la potencia en vatios que se introduce en la placa del aparato de la figura 1 en una simulación, sin control (línea continua), cuando se minimiza la entrada de potencia en la placa (línea a trazos) y también cuando se minimiza la suma de los cuadrados de las velocidades, medidas utilizando 3 sensores ubicados en la placa (línea de puntos), donde el controlador consta de una fuerza vertical y dos momentos que actúan sobre la viga a 3 cm de la placa;

30 la figura 6 es una gráfica, frente a la frecuencia en hercios, de la suma del valor cuadrático medio de las velocidades a lo largo del eje z medidas mediante cinco sensores de monitorización en una simulación, sin control (línea continua), cuando la entrada de potencia en la placa se minimiza (línea a trazos) y cuando se minimiza la suma del valor cuadrático medio de las velocidades medidas mediante tres sensores de error (línea de puntos), para las mismas condiciones que las utilizadas para generar la figura 5;

35 la figura 7 es una gráfica, frente a la frecuencia en hercios, de la suma del valor cuadrático medio de las velocidades en la dirección z medidas mediante (a) los sensores de monitorización y (b) los sensores de error, antes del control (línea sólida) y después del control (línea a trazos), en una simulación que emplea funciones de transferencia medidas en el aparato de las figuras 1 y 2, y en el que tres actuadores aplican una fuerza vertical común y dos actuadores adicionales aplican fuerzas horizontales;

40 la figura 8 es una gráfica, frente a la frecuencia en hercios, de la suma de las velocidades cuadráticas medias en la dirección z medidas mediante (a) los sensores de monitorización y (b) los sensores de error, antes del control (línea sólida) y después del control (línea a trazos), en una simulación idéntica a aquella utilizada para generar la figura 7, pero en la que tres actuadores aplican tres fuerzas verticales independientes y dos actuadores adicionales aplican fuerzas horizontales; y

45 la figura 9 es una gráfica de la densidad espectral de la potencia (DEP) de la suma de las aceleraciones medidas mediante tres sensores de error sin control (línea predominantemente superior) y con control (línea predominantemente inferior), a lo largo del (a) eje x, (b) eje y, (c) eje z, obtenidas mediante experimentación con el aparato de las figuras 1 y 2 accionado a 447 Hz.

Descripción detallada

50 Se creó una realización ejemplar de la invención como aparato de ensayo experimental 10 (figura 1 (a) y (b)). El aparato de ensayo 10 incluye una placa en ménsula 20 sujeta en una chapa base 25. La chapa base 25 está montada en una pluralidad de soportes de aislamiento 40, los cuales actúan de modo que aislen la placa 20 de las vibraciones exteriores, para mejorar la precisión de los ensayos. La placa en ménsula 20 está acoplada con una tubería 50 que tiene su eje perpendicular a la placa 20. La tubería 50 está libre en ambos de sus extremos 55a, 55b.

ES 2 628 241 T3

La tubería 50 pasa a través de un agujero en la placa 20, estando el agujero descentrado, desplazado hacia la parte superior y un lado de la placa 20.

5 Un supresor activo de vibraciones que incluye un collarín móvil 60 que está montado en la tubería 50, en el lado de la placa 20 hacia el extremo izquierdo 55b de la tubería 50, tal como se muestra en la figura 1(b). En este experimento, el collarín 60 se montó de modo que estuviera en contacto con la placa 20. El collarín 60 portaba una pluralidad de actuadores 70.

10 Las vibraciones se excitaron en la placa 20 y la tubería 50 utilizando un actuador principal (agitador) 30, montado en la tubería 50, en el lado opuesto de la placa 20, cerca del extremo opuesto 55a de la tubería 50. Este agitador 30 se utilizó para excitar vibraciones que representan las vibraciones excitadas por una máquina 30' conectada al extremo 55a de la tubería 50.

15 El collarín 60 y los actuadores 70 se muestran con más detalle en la figura 2. El collarín 60 es un anillo de acero 80, de aproximadamente 20 cm de diámetro con un agujero central circular de 9 cm de diámetro. El anillo 80 tiene una sección transversal rectangular, con unas superficies frontal y posterior planas y unas paredes interior y exterior planas. Se montan cinco actuadores 70a-e en el anillo 80: tres se montan en la superficie frontal y dos en la pared exterior. Los tres actuadores 70a-c montados en la superficie frontal del anillo 80 están separados de manera equidistante alrededor del anillo, es decir, separados 120 grados. Estos tres actuadores 70a-c actúan en una dirección perpendicular al plano del anillo 80, es decir, paralela al eje de la tubería 50 cuando se utiliza el collarín. Los otros dos actuadores 70d, e, montados en la pared exterior del anillo, actúan en direcciones perpendiculares al plano del anillo 80 y perpendiculares entre sí. Por tanto, los tres actuadores 70a-c en la superficie frontal, por un lado, y los dos actuadores 70d, e, en la pared exterior, por otro, proporcionan conjuntamente una actuación en tres direcciones ortogonales.

20 Se utilizó un modelo informático de una viga para representar la placa 20 y la tubería 50, donde la viga tiene la misma longitud y el mismo segundo momento de inercia que la tubería 50. Los parámetros geométricos y físicos del sistema se resumen en la Tabla 1.

25

Tabla 1

Parámetro	Valor
TUBERIA	
Diámetro de la sección transversal de la tubería	$D=89.9 \times 10^{-3} \text{ m}$
Grosor de la tubería	$s=5 \times 10^{-3} \text{ m}$
Longitud de la tubería	$l=1 \text{ m}$
Masa de la tubería	$M_{tubería}=5.3 \text{ Kg}$
PLACA	
Bordes de la placa	$(l_x, l_y) = (1, 1) \text{ m}$
Grosor	$h=20 \times 10^{-3} \text{ m}$
Intersección entre la placa y la viga	$(b_x, b_y) = (375 \times 10^{-3}, 1.125 \times 10^{-3})$
Masa de la placa	$M_p=155 \text{ Kg}$
MATERIAL ACERO	
Densidad	$\rho=7750 \text{ Kg/m}^3$
Módulo de Young	$E=200 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	$\nu=0.33$

30 Cuando el modelo del sistema se excita en el extremo de la viga, correspondiente al extremo 55a de la tubería 50, mediante tres fuerzas en fase a lo largo de cada una de las tres direcciones principales, las resonancias son claramente evidentes, tanto en la viga como en la placa.

En las simulaciones, se incluyeron 285 modos de vibración de flexión de la placa y 15 modos de vibración en el plano de la placa, la vibración de flexión de la viga y la vibración axial de la viga. Con el fin de obtener una mejor

comprensión de la dinámica del sistema, se calcularon las velocidades en la dirección z en 1156 puntos repartidos en la placa cuando el sistema se excitó a frecuencias que coincidían con las primeras resonancias del sistema.

Se llevaron a cabo simulaciones tanto para el caso en el que supresor activo de vibraciones se colocó en la placa 20 como para el caso en el que se colocó en la tubería 50.

5 En la primera simulación, se seleccionó una estrategia de control de prealimentación (*feed-forward*) para minimizar la entrada de potencia en la placa utilizando múltiples actuadores ubicados en la placa, adyacentes a la viga y rodeándola. Se proporcionaron tres fuerzas de control en la dirección z (paralela a la tubería) y dos fuerzas de control a lo largo de las direcciones x e y. La figura 3 muestra la entrada de potencia en la placa sin control (línea continua), cuando el controlador se optimiza para minimizar la entrada de potencia en la placa a cada frecuencia cuando únicamente se utilizan tres fuerzas verticales (línea a trazos), y cuando se utilizan cinco fuerzas de control (tres verticales y dos horizontales) (línea de puntos). La máxima reducción de la entrada de potencia en la placa se obtiene a baja frecuencia cuando la longitud de onda es mucho mayor que la distancia entre las fuentes secundarias y el punto de intersección entre la placa y la viga. La gráfica muestra que la utilización de dos fuerzas de control suplementarias en las direcciones x e y permite al sistema lograr cierto control incluso a la frecuencia de resonancia en el plano de 1800 Hz.

Para la simulación de la disposición en la que las fuentes de control se colocan en la tubería 50, los actuadores se ubicaron en el modelo en la viga a 3 cm de la placa, en el lado no excitado de la viga.

Desde un punto de vista práctico, la medición de la entrada de potencia en la placa 20 sería difícil de implementar. Una estrategia de control alternativa y más práctica es medir las velocidades en un número de puntos de la placa 20 y, por tanto, minimizar la suma de las velocidades cuadráticas medias.

Se simularon tres configuraciones diferentes del sistema de control. En la primera configuración, se utilizaron como fuentes secundarias una fuerza que actuaba a lo largo del eje de la viga y dos fuerzas a lo largo de los ejes x e y. En la segunda configuración, se utilizaron como fuentes secundarias una fuerza que actuaba a lo largo del eje de la viga y dos momentos alrededor de los ejes x e y. En el último caso, se utilizaron como fuentes secundarias tres fuerzas y dos momentos que actuaban sobre la viga.

El modelo incluyó tres sensores de error colocados en la placa 20, alrededor de la tubería 50. La distancia entre el eje de la tubería 20 y el sensor de error fue de 20 cm. Había también cinco sensores de monitorización situados en la placa 20, los cuales podían medir la velocidad únicamente a lo largo del eje z (esta restricción se utilizó para representar el equipo experimental). El objetivo de los sensores de monitorización fue obtener una indicación de la respuesta global de la placa 20 cuando se aplica el control.

Para la primera configuración, la figura 4 muestra la entrada de potencia modelada en la placa, sin control (línea continua), cuando se implementa el controlador óptimo que minimiza la entrada de potencia en la placa (línea a trazos) y cuando se minimiza la suma de los cuadrados de las velocidades medidas por los tres sensores de error (línea de puntos). Los tres sensores de error son capaces de medir la velocidad a lo largo de los tres ejes principales x, y, z. La figura 4 muestra que minimizar la suma de las velocidades cuadráticas medias medidas por los tres sensores de error se corresponde con una buena aproximación a la minimización de la entrada de potencia de la placa a baja frecuencia, aunque en este ejemplo a frecuencias más altas se obtiene una reducción menor de la entrada de potencia en la placa, cuando se minimiza la suma de las velocidades cuadráticas medias.

La segunda configuración simula una fuerza vertical a lo largo del eje z (es decir, a lo largo de la tubería 50) y dos momentos alrededor de los ejes x e y que actúan sobre la tubería 50. La figura 5 muestra la entrada de potencia modelada en la placa, sin control (línea continua), cuando se implementa el controlador óptimo que minimiza la entrada de potencia en la placa (línea a trazos) y cuando se minimiza la suma de los cuadrados de las velocidades medidas mediante tres sensores de error (línea de puntos). La gráfica muestra que en este caso las dos estrategias de control ofrecen una reducción muy similar de la entrada de potencia en la placa. Además, para este caso, se logró una reducción muy superior en comparación con el caso anterior de tres fuerzas secundarias. Los dos picos que aparecen alrededor de 1.2 y 1.8 kHz se deben a la vibración de flexión de la viga.

La figura 6 muestra la suma de las velocidades cuadráticas medias medidas por los cinco sensores de monitorización, sin control (línea continua), cuando se minimiza la entrada de potencia en la placa (línea a trazos) y cuando se minimiza la velocidad cuadrática media medida por los tres sensores de error (línea de puntos). La gráfica muestra que se puede lograr una excelente reducción general en la vibración de la placa hasta aproximadamente 1.8 kHz utilizando ambas estrategias de control.

Resultados de simulaciones adicionales han mostrado que en la tercera configuración (es decir, con tres fuerzas secundarias actuando a lo largo de los ejes x, y, z, y dos momentos alrededor de los ejes x e y) en teoría, tanto la potencia que se introduce en la placa como la suma de las velocidades cuadráticas medias se controlan perfectamente; estos no se reproducen en este documento ya que los resultados tienden a cero.

Se vuelve ahora al aparato experimental 10 de la figura 1. Cada uno de los cinco actuadores 70a-e en el collarín 60 son actuadores electromagnéticos inerciales. Tal como se analiza anteriormente, los actuadores 70a-c generan una fuerza perpendicular a la placa 20 mientras que los actuadores 70d y 70e generan fuerzas a lo largo de las otras dos direcciones principales. El collarín 60 puede rotar y moverse a lo largo de la tubería 50; no obstante, en los resultados experimentales que se presentan a continuación, el collarín 60 está situado tan cerca como sea posible de la placa 20. Como en las simulaciones, se utilizan tres acelerómetros (no se muestran) como sensores de error a efectos de control; estos son capaces de medir la aceleración a lo largo de los tres ejes principales. También se colocaron cuatro acelerómetros de un eje (no se muestran) en la placa 20 con el fin de monitorizar la respuesta global. La excitación de la perturbación principal se proporcionó utilizando un actuador inercial 30 Data Physics IV 40 (agitador) ubicado cerca del extremo 55a de la tubería 50. Ese agitador principal 30 también se monta en un collarín, lo que permite efectuar diversas perturbaciones montando el agitador 30 con orientaciones diferentes.

Antes de intentar un control en tiempo real, se evaluó el nivel de rendimiento que se puede lograr con esta disposición. Con este objetivo, se midieron las funciones de transferencia de, por un lado, la fuente principal 30 (agitador principal) y los actuadores 70 a, por otro, todos los sensores montados en la placa 20. Esas funciones de transferencia medidas se utilizaron a continuación en simulaciones adicionales para predecir el comportamiento del sistema cuando se implementaron diferentes estrategias de control de armónicos. Las funciones de transferencia medidas también se utilizaron para la identificación del sistema requerido para implementar el control en tiempo real. Todas las funciones de transferencia entre el actuador principal 30 y los actuadores secundarios 70 y los sensores de error y monitorización se midieron utilizando un analizador de veinte canales (Data Physics Mobilyzer II). Aunque las funciones de transferencia entre el agitador principal 30 y los sensores se han medido para 4 orientaciones diferentes del actuador principal, únicamente se presentan en este documento los resultados cuando la fuerza principal forma un ángulo de aproximadamente 45 grados con cada uno de los ejes principales.

La figura 7 muestra la suma modelada de las velocidades cuadráticas medias monitorizadas (gráfica (a)) y las velocidades de error (gráfica (b)), sin control (línea continua) y cuando se implementa el control simulado óptimo (línea a trazos). En este ejemplo, los actuadores 70a-c se accionaron con la misma señal para minimizar la suma de las tres velocidades cuadráticas medias medidas por los tres sensores de error a lo largo del eje z. Los actuadores 70d, e, se accionaron con dos señales diferentes para minimizar la suma de las velocidades cuadráticas medias en los ejes x e y respectivamente. En esta configuración, el controlador 75 aplica tres fuerzas ortogonales alineadas con los ejes principales cerca del punto de intersección de la tubería 50 y la placa 20 y de ese modo no es capaz de producir momentos para controlar la vibración que surge de este modo de excitación. A pesar de esto, las gráficas muestran que se puede lograr una reducción significativa de más de 40 dB a través de un intervalo amplio de frecuencias al implementar este tipo de control. La resonancia del agitador principal es aproximadamente 30 Hz, por lo tanto, a frecuencias más bajas la estructura no se puede excitar de manera eficaz. La resonancia de los actuadores secundarios 70 es aproximadamente 55 Hz, por lo tanto, el control no será eficaz a frecuencias significativamente por debajo de esta.

Se puede lograr una reducción de banda ancha mucho mejor cuando los cinco actuadores secundarios 70a-e se accionan de manera independiente para minimizar la suma de las velocidades cuadráticas medias medidas por los tres sensores de error. Para este caso, el controlador 75 es capaz de generar tres fuerzas ortogonales y dos momentos. La figura 8 muestra la suma modelada de las velocidades cuadráticas medias monitorizadas (gráfica (a)) y las velocidades de error (gráfica (b)), sin control (línea continua) y cuando se implementa el control simulado óptimo (línea a trazos).

Una comparación entre la figura 7 y la figura 8 muestra claramente que la estrategia de control más eficaz es la que se utiliza para generar la última gráfica, es decir, una capaz de generar momentos y fuerzas tal como los ya predichos por los resultados de la simulación a partir del modelo de viga y placa. Cabe destacar, que los resultados indican que se puede lograr una reducción media del orden de 50 dB a través de una banda muy amplia de frecuencias. No obstante, para algunas frecuencias específicas, especialmente alrededor de 390 Hz, la reducción no es tan grande. No obstante, esto no es significativo ya que esa frecuencia se corresponde con un modo estructural que no está excitado de manera intensa por la excitación de la tubería y se podría solucionar con una distribución diferente de los sensores de error.

Por último, se presentan algunos resultados experimentales preliminares que demuestran el rendimiento y potencial del sistema de control. En este trabajo experimental, se utilizó un controlador 75 con solo tres grados de libertad, es decir, donde cada uno de los tres actuadores secundarios 70a-c en la cara frontal del anillo 80 se accionaron utilizando la misma señal que para minimizar la suma de las aceleraciones cuadráticas medias, medidas por los tres sensores de error correspondientes en la dirección z, y los actuadores 70d, e, en el lado del anillo 80 se accionaron con dos señales diferentes para minimizar la suma de las aceleraciones cuadráticas medias a lo largo de los ejes x e y respectivamente. Esta estructura limitada se utilizó debido a restricciones en el tiempo de programación y a la disponibilidad inmediata de un software de control adecuado. El controlador de armónicos 75 se implementó en modo de realimentación y se asume, por lo tanto, que se desconoce la trayectoria de perturbación. El agitador principal de perturbación 30 se accionó con una señal sinusoidal de 447 Hz y orientada de modo que formara un

ángulo de 45 grados con los tres ejes principales.

Las figuras 9 (a)-(c) muestran la DEP de la suma de las aceleraciones medidas por los tres sensores de error a lo largo de los ejes x, y, z, respectivamente, sin control (línea azul) y con control (línea roja). Se utilizó un algoritmo iterativo en el dominio de la frecuencia para la estrategia de control; no obstante, en el tiempo disponible no fue posible una búsqueda rigurosa de los parámetros óptimos y por consiguiente, estos resultados no representan el rendimiento óptimo verdadero para esta configuración. A pesar de esto, y a pesar de una facultad de control limitada, las gráficas muestran que las señales de error a la frecuencia de excitación de 447 Hz se reducen en 17.3, 17.2 y 32.5 dB respectivamente. Eso demuestra claramente la validez de los resultados teóricos anteriores y evidencia el enorme potencial del planteamiento.

Por tanto, se ha mostrado que se puede utilizar un planteamiento activo para reducir los niveles de vibración de una placa, provocada por la penetración sólida de una tubería que vibra, en varios órdenes de magnitud. El mejor rendimiento que se puede lograr de aquellos que se han examinado en este documento se mostró que se obtuvo aplicando fuerzas y momentos controlados a la tubería utilizando un sistema de actuación con cinco grados de libertad. En trabajos de simulación basados en un análisis riguroso de movilidad, se mostró que se podía lograr teóricamente una supresión media del orden de 50 dB para un sistema de placa y tubería que interactúa de manera genérica. Se desarrolló un collarín actuado para la tubería que tenía los cinco grados de libertad necesarios y se construyó un prototipo del sistema y se realizaron pruebas utilizando un equipo de ensayo a escala de laboratorio construido a tal efecto. Este sistema se ensayó sometido a un funcionamiento constreñido, aunque a pesar de ello, este logró reducciones en un modo estructural radiante acústicamente de más de 30 dB. La utilización de un collarín que porta los actuadores tiene el beneficio particular de que se puede lograr potencialmente un nivel alto de supresión de vibraciones para todas las trayectorias de transmisión que se propagan desde un sistema aislado dado (p. ej., a través de los acoplamientos flexibles asociados con los sistemas de escape, refrigeración y de suministro de combustible y energía), y no únicamente aquellos que se propagan a través del soporte del sistema.

Aunque la presente invención se ha descrito e ilustrado haciendo referencia a realizaciones particulares, aquellos que son expertos en la técnica apreciarán que la propia invención se presta a múltiples variaciones diferentes que no se ilustran específicamente en la presente.

Donde en la descripción anterior, se mencionan números enteros o elementos que tienen equivalentes obvios o previsibles, en este caso los equivalentes se incorporan en la presente tal como si se expusieran individualmente. Para determinar el verdadero alcance de la presente invención se debería hacer referencia a las reivindicaciones, las cuales se deberían interpretar como que engloban a cualesquiera de dichos equivalentes. El lector también apreciará que los números enteros o características de la invención que se describen como preferibles, ventajosos, convenientes o similares, son opcionales y no limitan el alcance de las reivindicaciones independientes. Además, se debe sobreentender que dichos números enteros o características opcionales, aunque de posible beneficio en algunas realizaciones de la invención, pueden no estar presentes en otras realizaciones.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un aparato que incluye una máquina (30'), un vástago (50) y una placa (20), donde la placa (20) está acoplada con el vástago (50), donde la máquina (30') está en un primer lado de la placa (20), y donde la placa (20) y el vástago (50) son susceptibles a las vibraciones que surgen del funcionamiento de la máquina (30'), incluyendo el aparato un supresor activo de vibraciones montado en el vástago, y un controlador (75) configurado de modo que controle el supresor activo de vibraciones con el fin de reducir las vibraciones de la placa (20), **caracterizado por que**
- el vástago (50) pasa a través de un agujero en la placa (20), desde el primer lado de la placa hasta el segundo lado opuesto de la placa.
- 10 2. Un aparato según se reivindica en la reivindicación 1, donde el vástago (20) está conectado a la máquina (30').
3. Un aparato según se reivindica en cualquier reivindicación anterior, donde el vástago (50) es una tubería.
4. Un aparato según se reivindica en cualquier reivindicación anterior, donde la placa (20) es una carcasa que contiene la máquina o es parte de esta.
- 15 5. Un aparato según se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, donde la placa (20) es parte de la propia máquina (30'), o está conectada directamente a la máquina (30').
6. Un aparato según se reivindica en cualquier reivindicación anterior, donde el supresor activo de vibraciones está montado en el vástago (50) en el segundo lado de la placa (20).
7. Un aparato según se reivindica en cualquier reivindicación anterior, donde el supresor activo de vibraciones comprende una pluralidad de actuadores (70) dispuestos de modo que actúen sobre el vástago (50).
- 20 8. Un aparato según se reivindica en cualquier reivindicación anterior, donde el supresor activo de vibraciones incluye un collarín (60) que está conectado al vástago (50) y rodea al menos parcialmente su circunferencia.
- 25 9. Un aparato según se reivindica en la reivindicación 8, donde se disponen tres o más actuadores (70a-c) de modo que actúen en una dirección paralela a la longitud del vástago (50) al actuar sobre una primera superficie del collarín (60), siendo la primera superficie perpendicular al vástago (50), y se disponen dos o más actuadores adicionales (70d, e) de modo que actúen en dos direcciones ortogonales a la longitud del vástago (50) y entre sí, al actuar sobre el collarín (60) en una superficie perpendicular a la primera superficie.
10. Un aparato según se reivindica en cualquier reivindicación anterior, que comprende además una pluralidad de sensores dispuestos de modo que detecten las vibraciones de la placa y generen una señal indicativa de esas vibraciones.
- 30 11. Un aparato según se reivindica en la reivindicación 10, donde el controlador (75) se configura de modo que suprima las vibraciones de la placa (20) minimizando un parámetro derivado de la señal procedente de los sensores.
12. Un aparato según se reivindica en la reivindicación 11, donde el parámetro es la suma de las velocidades cuadráticas medias medidas por los sensores.
- 35 13. Un método de supresión de las vibraciones que surgen del funcionamiento de una máquina (30'), donde la máquina (30') es parte de un aparato que también incluye un vástago (50) y una placa (20), estando la placa (20) acoplada al vástago (50), estando la máquina (30') en un primer lado de la placa (20), siendo la placa (20) y el vástago (50) susceptibles a las vibraciones que surgen del funcionamiento de la máquina (30'), donde el método comprende aplicar una fuerza controlada de manera activa sobre el vástago (50) para reducir las vibraciones de la placa (20), **caracterizado por que** el vástago (50) pasa a través de un agujero en la placa (20), desde el primer lado
- 40 de la placa hasta el segundo lado opuesto de la placa.

Fig. 1(a)

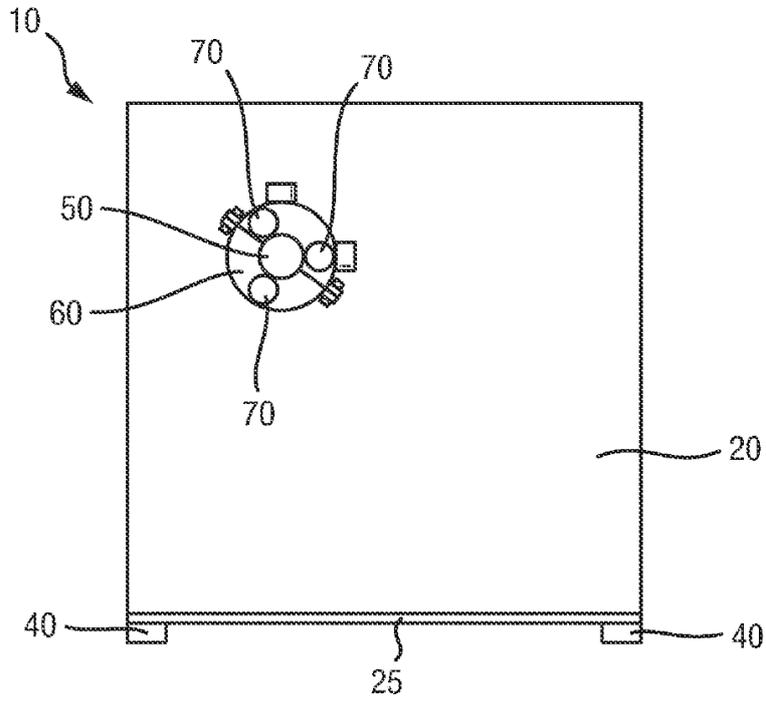


Fig. 1(b)

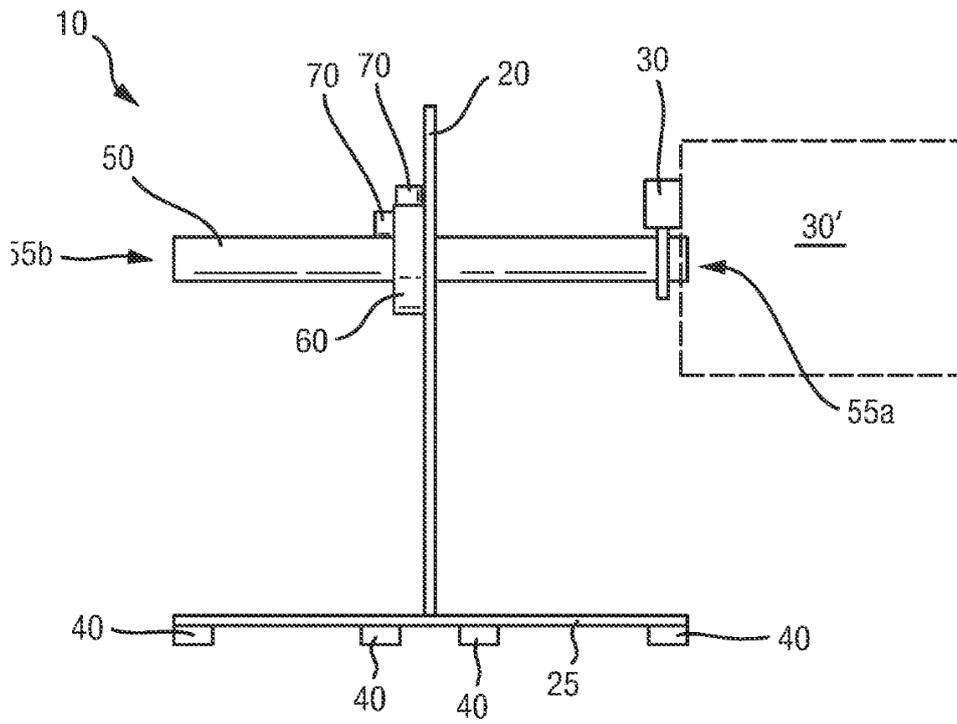


Fig. 2

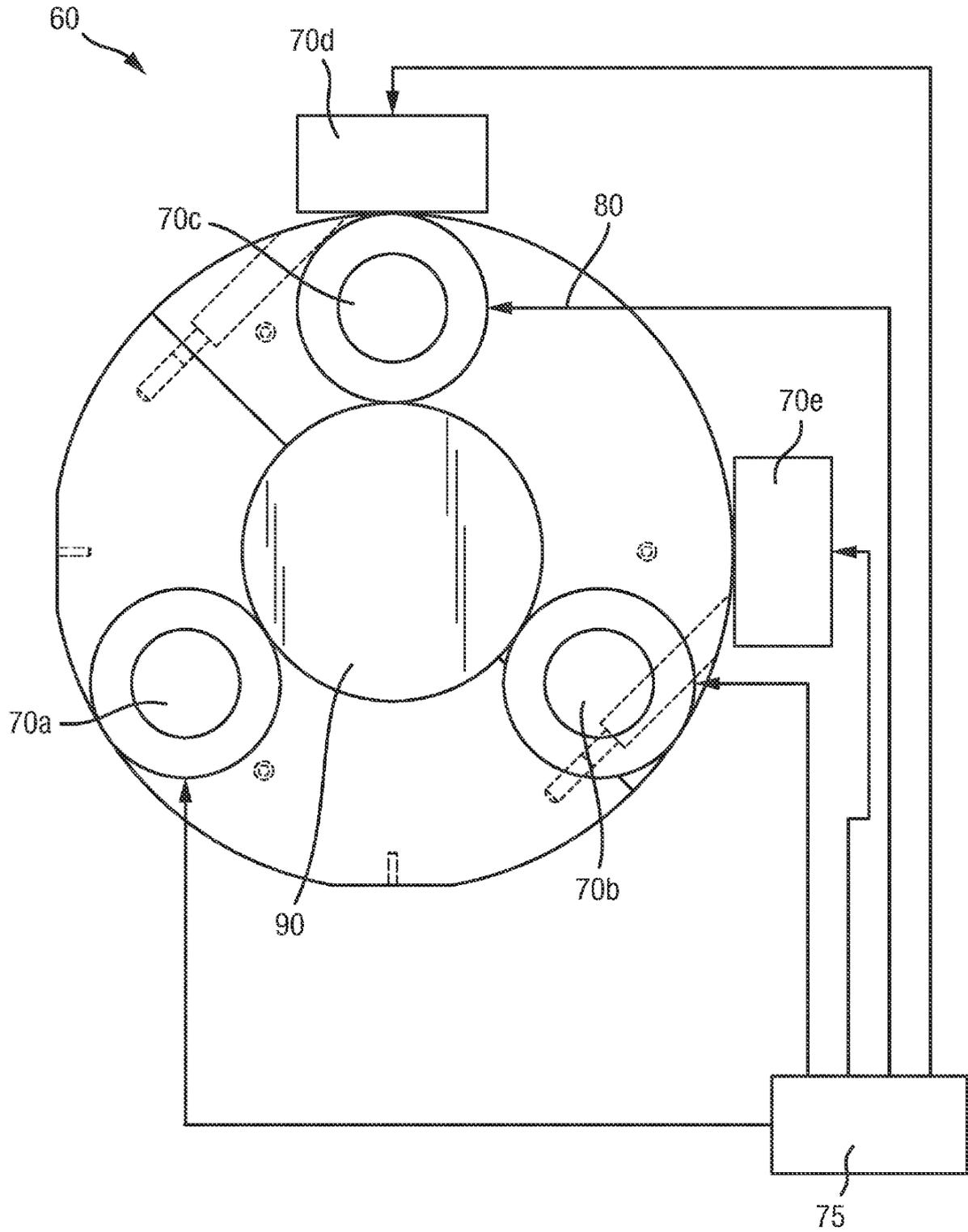


Fig. 3

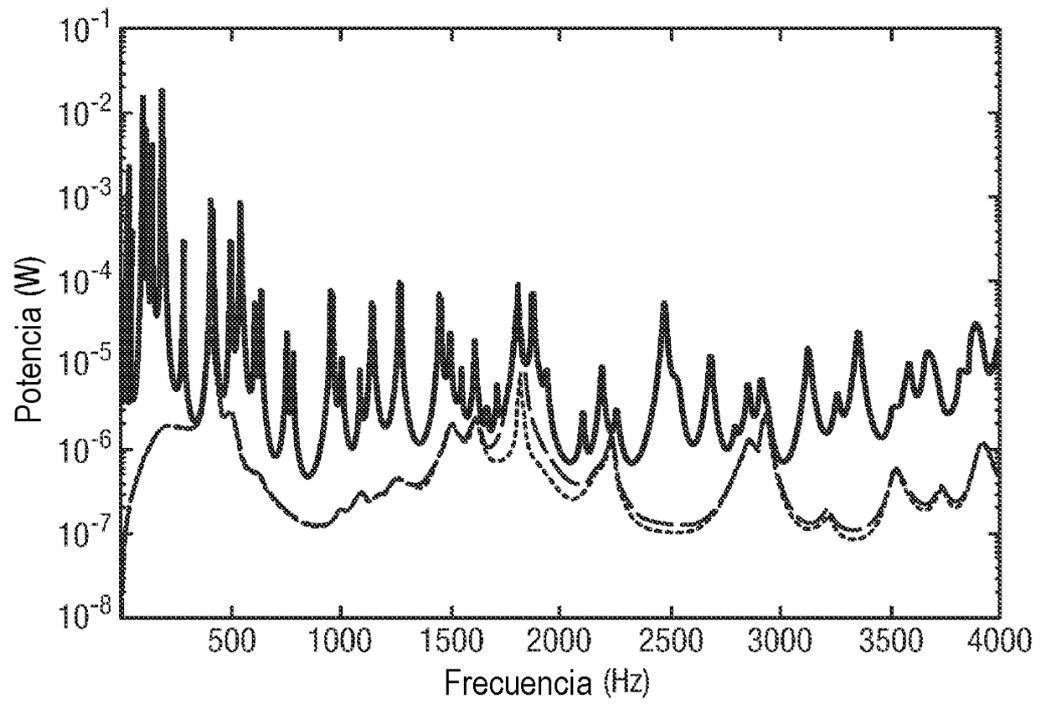


Fig. 4

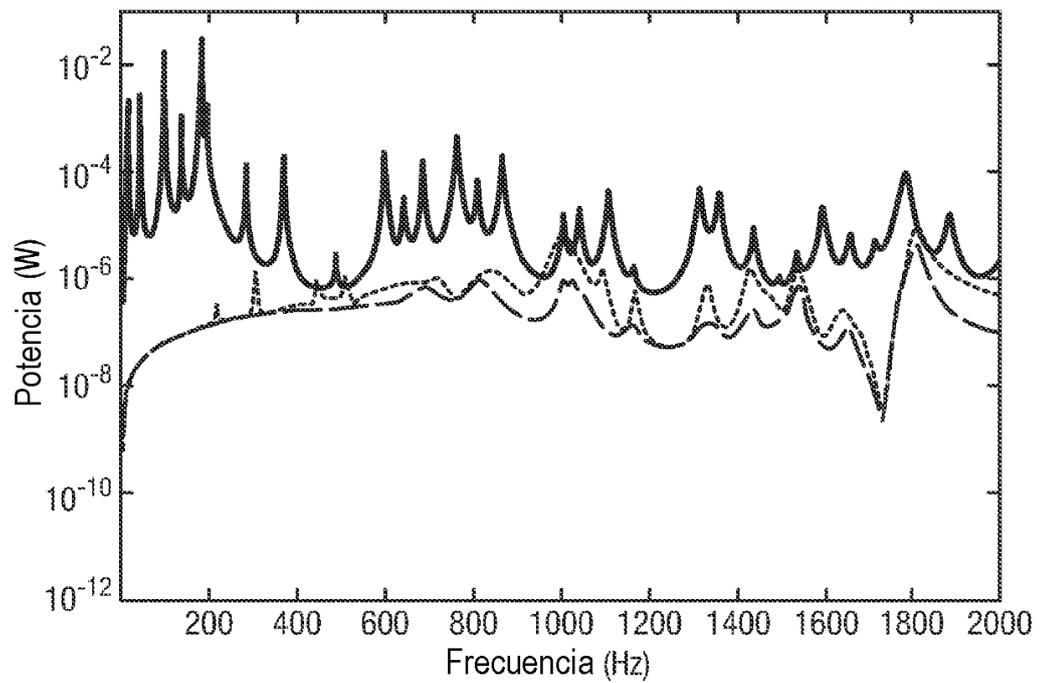


Fig. 5

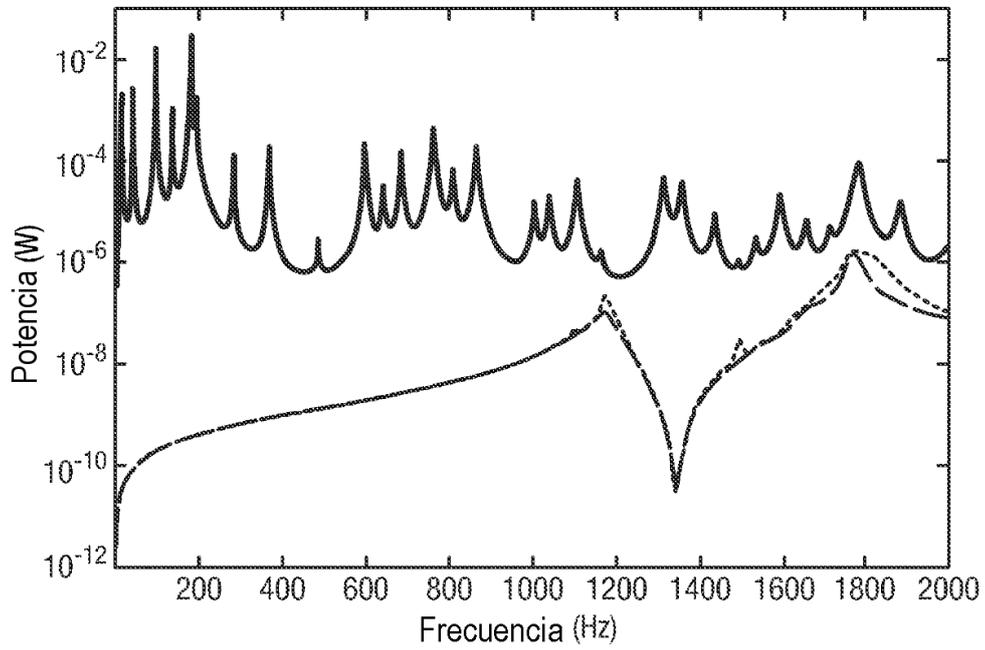


Fig. 6

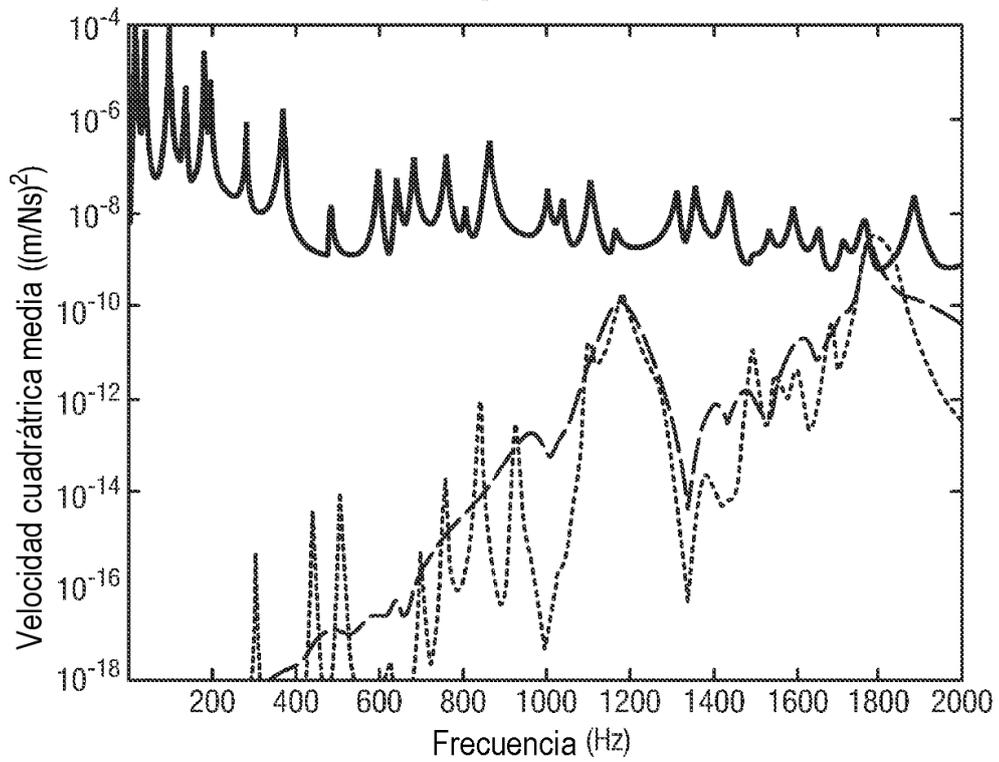


Fig. 7(a)

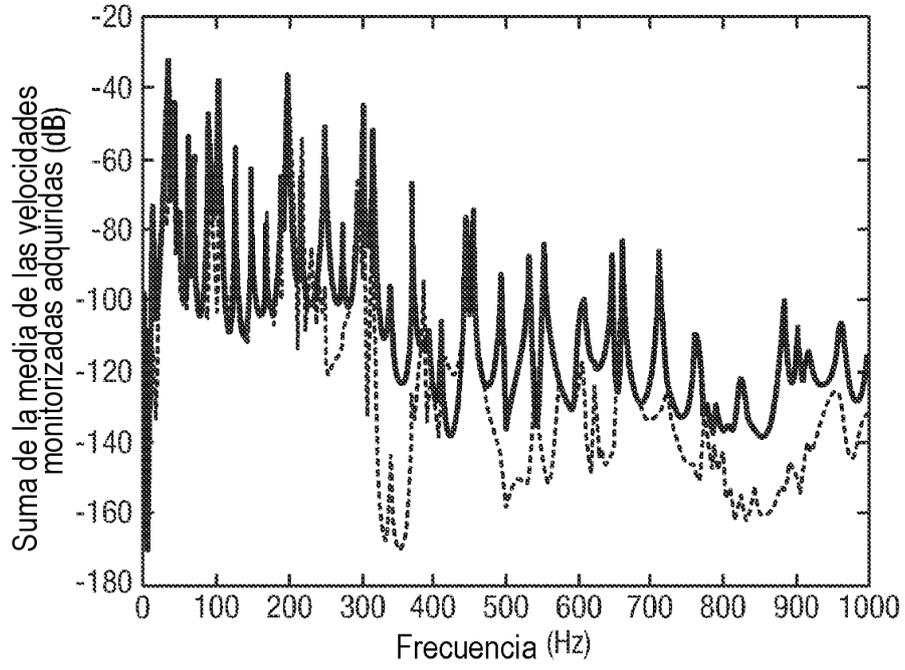


Fig. 7(b)

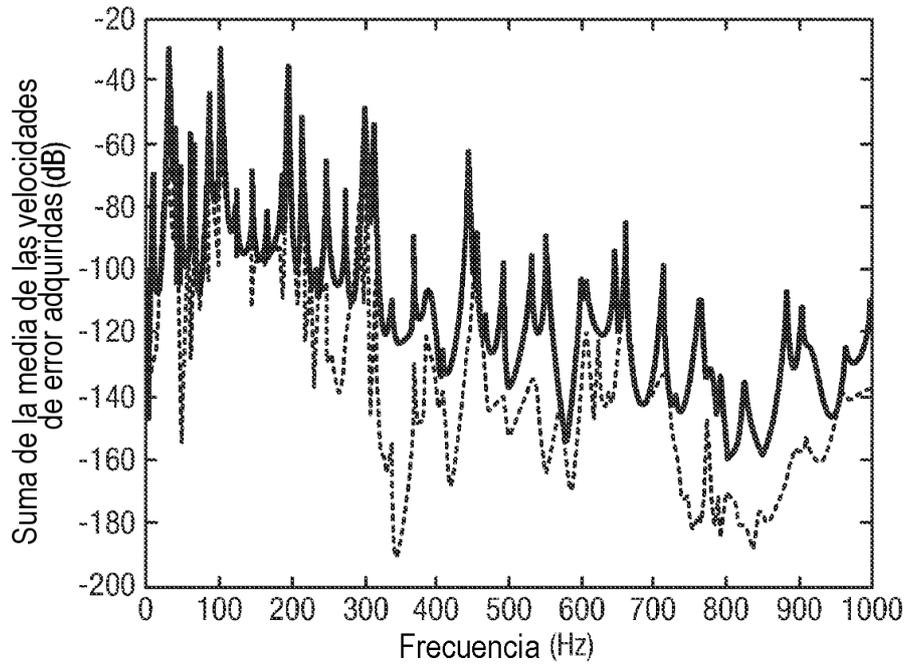


Fig. 8(a)

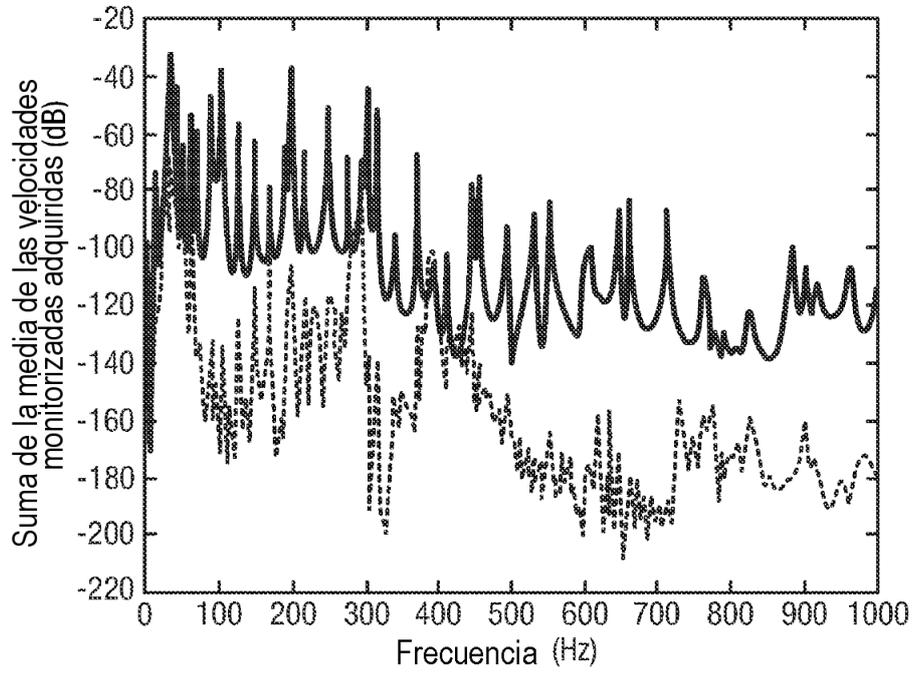


Fig. 8(b)

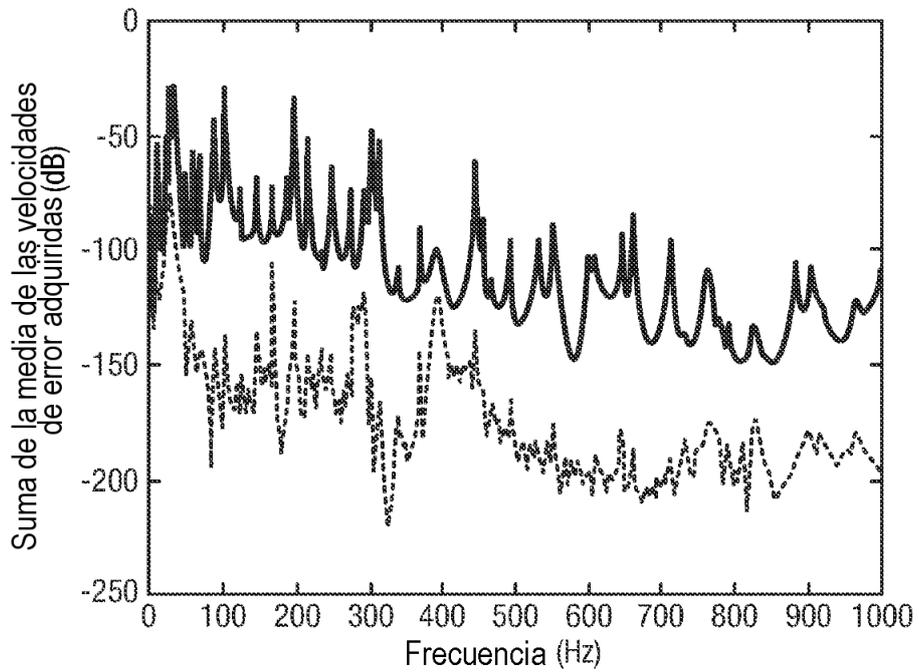


Fig. 9(a)

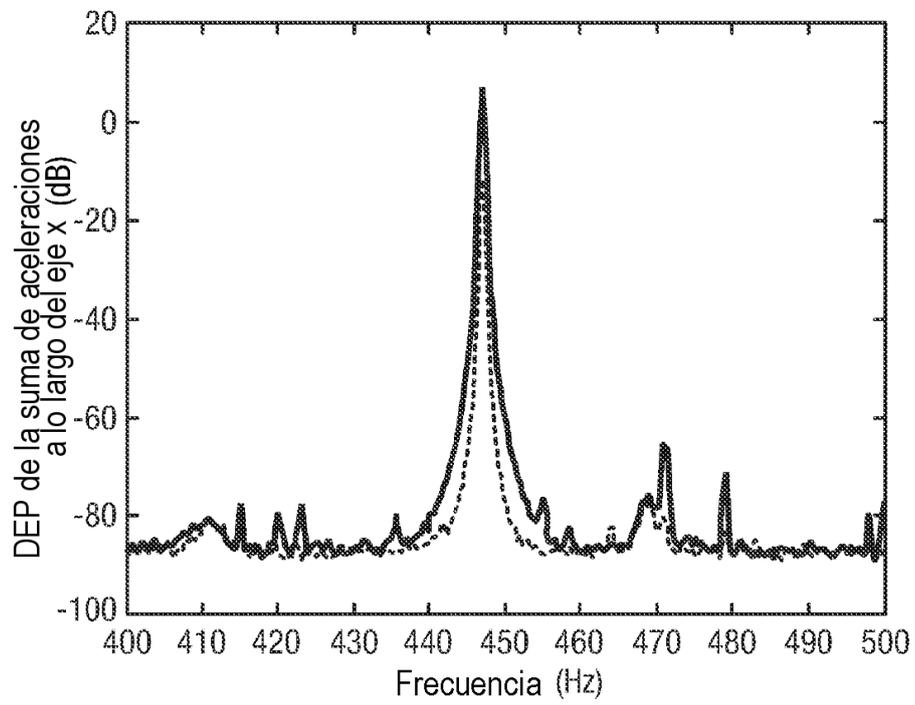


Fig. 9(b)

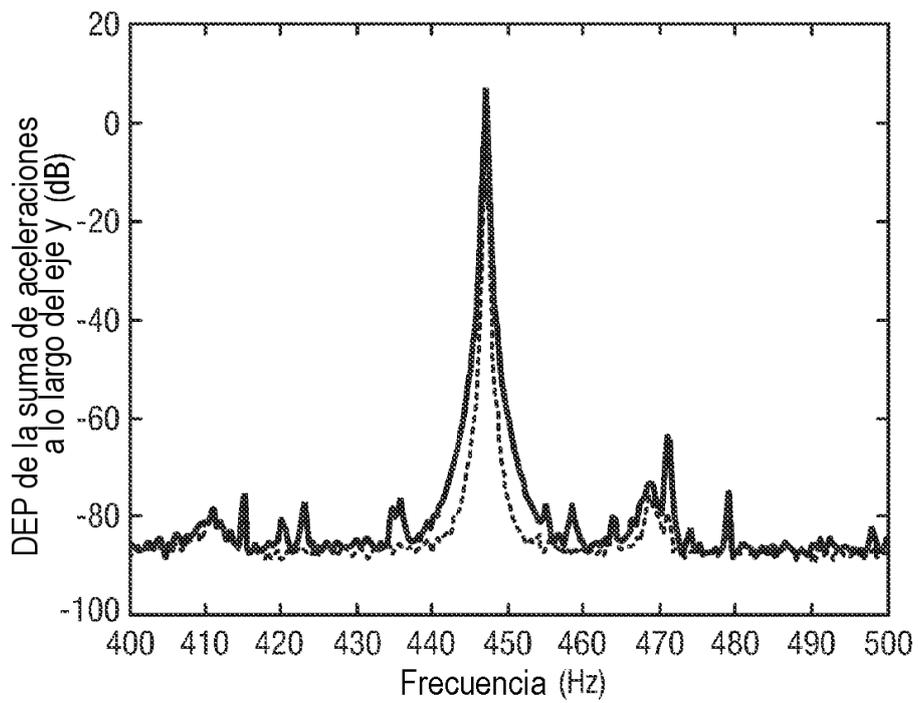


Fig. 9(c)

