

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 800 319**

51 Int. Cl.:

**G01M 13/04** (2009.01)

**G01R 31/34** (2010.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.12.2013** E 13196542 (8)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.04.2020** EP 2743669

54 Título: **Sistema de detección de fallos y método asociado**

30 Prioridad:

**17.12.2012 US 201213716969**

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

**29.12.2020**

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)  
1 River Road  
Schenectady, NY 12345, US**

72 Inventor/es:

**METO, PRABJALAR y  
ZHANG, PINJIA**

74 Agente/Representante:

**CONTRERAS PÉREZ, Yahel**

**ES 2 800 319 T3**

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

**DESCRIPCIÓN**

Sistema de detección de fallos y método asociado

5 La tecnología que se describe aquí se refiere, en general, a la detección de fallos de máquinas electromecánicas (MEMs). Más concretamente, se trata de la detección de fallos en diversos componentes de un tren de transmisión en una máquina electromecánica.

10 Las máquinas electromecánicas que tienen generadores eléctricos, motores y un tren de transmisión pueden generar vibraciones torsionales y radiales debido a la presencia de componentes defectuosos tales como cojinetes, engranajes, o similares. Convencionalmente, puede realizarse un análisis de vibraciones de máquinas electromecánicas para controlar las condiciones de funcionamiento de la máquina. Los fallos mecánicos en los sistemas electromecánicos que tienen un tren de transmisión pueden generar vibraciones a la frecuencia de rotación del rotor. Un análisis de la frecuencia de rotación del rotor facilita la detección de fallos mecánicos asociados al tren de transmisión. Pueden utilizarse señales de vibración para controlar de manera efectiva vibraciones radiales. Se ha encontrado, sin embargo, que las señales de vibración no pueden detectar todos los tipos de fallos asociados a los diversos componentes del tren de transmisión.

20 Además, no pueden capturarse vibraciones torsionales generadas por los componentes defectuosos del tren de transmisión que se encuentran presentes físicamente fuera de la máquina. Aunque hay disponibles ciertas técnicas convencionales para determinar fallos en engranajes del tren de transmisión, las técnicas convencionales no determinan de manera efectiva un fallo de un cojinete de la caja de engranajes.

25 Existe, por lo tanto, la necesidad de un método y un sistema mejorados para controlar un estado de fallo de un dispositivo mecánico en una MEM.

30 De acuerdo con una realización de ejemplo, se describe un método para detectar fallos en un dispositivo mecánico de un dispositivo electromecánico. El método incluye recibir una señal eléctrica medida desde un dispositivo eléctrico de un dispositivo electromecánico y recibir una señal de vibración medida desde un dispositivo mecánico del dispositivo electromecánico, conectado al dispositivo eléctrico. El método incluye, además, determinar una primera firma de señal en base a la señal eléctrica medida y determinar una segunda firma de señal en base a la señal de vibración medida. El método también incluye determinar un parámetro de diagnóstico en base a la primera firma de señal y la segunda firma de señal y determinar un fallo en el dispositivo mecánico en base al parámetro de diagnóstico.

35 De acuerdo con otra realización de ejemplo, se describe un sistema para detectar fallos en un dispositivo mecánico de una máquina electromecánica. El sistema incluye un dispositivo basado en un controlador configurado para recibir una señal eléctrica medida desde un dispositivo eléctrico de un dispositivo electromecánico y para recibir una señal de vibración medida desde un dispositivo mecánico del dispositivo electromecánico, conectado al dispositivo eléctrico. El dispositivo basado en un controlador está configurado, además, para determinar una primera firma de señal en base a la señal eléctrica medida y para determinar una segunda firma de señal en base a la señal de vibración medida. El dispositivo basado en un controlador también está configurado para determinar un parámetro de diagnóstico en base a la primera firma de señal y la segunda firma de señal y para determinar un fallo del tren de transmisión en base al parámetro de diagnóstico.

45 De acuerdo con otra realización de ejemplo, se describe un medio legible por ordenador no transitorio codificado con un programa para enviar instrucciones a un dispositivo basado en un controlador. El programa envía instrucciones al dispositivo basado en un controlador para recibir una señal eléctrica medida desde un dispositivo eléctrico de un dispositivo electromecánico y para recibir una señal de vibración medida desde un dispositivo mecánico del dispositivo electromecánico, conectado al dispositivo eléctrico. El programa envía instrucciones, además, al dispositivo basado en un controlador para determinar una primera firma de señal en base a la señal eléctrica medida y para determinar una segunda firma de señal en base a la señal de vibración medida. El programa también envía instrucciones al dispositivo basado en un controlador para determinar un parámetro de diagnóstico en base a la primera firma de señal y la segunda firma de señal y para determinar un fallo del dispositivo mecánico en base al parámetro de diagnóstico.

50 Diversas características y aspectos de realizaciones de la presente tecnología se entenderán mejor al leer la siguiente descripción detallada con referencia a los dibujos adjuntos en los que las referencias similares representan elementos similares en todos los dibujos, en los cuales:

60 La figura 1 es una ilustración esquemática de un sistema que tiene un sistema de detección de fallos de acuerdo con una realización de ejemplo;

La figura 2 es un diagrama de bloques de un sistema de detección de fallos de acuerdo con una realización de ejemplo;

5 La figura 3 es un diagrama de flujo que ilustra etapas de ejemplo implicadas en la detección de fallos del tren de transmisión de acuerdo con una realización de ejemplo;

La figura 4A es una gráfica de la señal eléctrica en dominio temporal y la figura 4B es una gráfica del espectro de frecuencias correspondiente de acuerdo con una realización de ejemplo; y

10 La figura 5 es una representación gráfica de una corriente de estator en dominio de frecuencia de una caja de engranajes dañada que tiene un anillo exterior del cojinete defectuoso de acuerdo con una realización de ejemplo.

15 Diversas realizaciones de la presente tecnología se refieren a un sistema y aun método para detectar fallos en un dispositivo mecánico de una MEM. Desde un dispositivo eléctrico de una MEM se recibe una señal eléctrica medida. Además, desde el dispositivo mecánico de la MEM, conectado al dispositivo eléctrico, se recibe una señal de vibración medida. Se determina una primera firma de señal en función de la señal eléctrica medida y se determina una segunda firma de señal en función de la señal de vibración medida. Se determina uno o más parámetros de diagnóstico en función de la primera firma de señal y la segunda firma de señal. Se determina uno o más fallos del dispositivo mecánico en función del uno o más parámetros de diagnóstico determinados.

20 La figura 1 es una ilustración esquemática de un sistema 100 de acuerdo con una realización de ejemplo de la presente invención. El sistema 100 incluye una MEM 160 que tiene por lo menos un dispositivo eléctrico 150 y un dispositivo mecánico 140. El sistema 100 incluye, además, dos sensores eléctricos 170, por lo menos un sensor de vibración 180 para medir señales eléctricas y señales de vibración de la MEM 160. El número de sensores eléctricos y sensores de vibración puede variar según la aplicación. En una realización, sólo puede medirse una señal eléctrica y una señal de vibración. El sistema 100 incluye, además, un dispositivo basado en un controlador 190 para recibir señales eléctricas y señales de vibración medidas por los sensores eléctricos 170, 171 y el sensor de vibración 180. La MEM 160 también incluye un conjunto de rotor 110, un cojinete principal 120, y un eje principal 130. En la realización ilustrada, el dispositivo eléctrico 150 es un generador para generar potencia de salida 208, y el dispositivo mecánico 140 es un tren de transmisión. Debe observarse aquí que el dispositivo eléctrico 150 puede denominarse motor y el dispositivo mecánico 140 puede denominarse caja de engranajes/tren de transmisión de manera intercambiable. En otras realizaciones, se prevén otros tipos de dispositivos eléctricos y mecánicos.

35 En la realización ilustrada, el sensor eléctrico 170 es un sensor de corriente para detectar corriente y el otro sensor eléctrico 171 es un sensor de tensión para detectar tensión del generador 150. Los sensores eléctricos 170, 171 pueden denominarse sensor de corriente y sensor de tensión indistintamente. En una realización, el sensor de corriente 170 mide la corriente que pasa a través de una o más fases del generador 150. De manera similar, el sensor de tensión 171 puede medir la tensión a través de una o más fases del generador 150. Si bien pueden describirse ciertas realizaciones de la presente tecnología respecto a un generador multifásico, debe observarse aquí que en otras realizaciones de la presente tecnología pueden preverse otros tipos de MEM multifase. El sensor de vibración 180 se utiliza para detectar vibraciones de por lo menos uno del generador 150, el tren de transmisión 140 y otros dispositivos del dispositivo electromecánico 160. Las vibraciones pueden incluir por lo menos una de vibraciones del estator, vibraciones del rotor, y vibraciones de cojinetes. El sensor de vibración 180 puede ser un acelerómetro, un transductor de desplazamiento o un transductor de velocidad. También pueden preverse otros tipos de sensores de vibración y/o sensores eléctricos dentro del alcance de la tecnología actual. El dispositivo basado en un controlador 190 recibe señales del sensor de vibración 180 y los sensores eléctricos 170, 171. El dispositivo basado en un controlador 190 puede ser un ordenador de uso general, o un procesador de señal digital (DSP), o un controlador. El dispositivo basado en un controlador 190 puede incluir un dispositivo de entrada (no mostrado) tal como un teclado, un ratón, y un controlador para recibir información adicional de un usuario para configurar el dispositivo basado en un controlador 190 para realizar diversas operaciones de cálculo asociadas a la presente invención. El dispositivo basado en un controlador 190 puede incluir una memoria 200 que puede ser una memoria de acceso aleatorio (RAM), una memoria de sólo lectura (ROM) o cualquier otra forma de memoria legible por ordenador accesible por el dispositivo basado en un controlador 190. La memoria 200 puede codificarse con un programa para enviar instrucciones al dispositivo basado en un controlador 190 para permitir una secuencia de etapas para determinar un fallo del tren de transmisión 140. El dispositivo basado en un controlador 190 también puede configurarse adecuadamente para controlar y detectar estados de fallo de varios componentes, por ejemplo, fallos del cojinete del tren de transmisión 140, dentro de la MEM 160.

60 La figura 2 es un sistema de diagrama de bloques 100 de acuerdo con una realización de ejemplo. Tal como se ha descrito con referencia a la figura 1, el conjunto de rotor 110 está acoplado al generador 150 a través del tren de accionamiento 140. El dispositivo basado en un controlador 190 recibe señales eléctricas 204, 206 medidas por los sensores eléctricos 170, 171, y señales de vibración 202 medidas por los sensores de vibración 180 para generar

una firma de señal de vibración 210 y una firma de señal eléctrica 212. La firma de señal de vibración 210 y la firma de señal eléctrica 212 se utilizan para determinar una señal de detección de fallo 216. La señal de detección de fallo 216 puede ser representativa de uno o más parámetros de diagnóstico. Cabe señalar aquí que los términos "señal de detección de fallo" y "parámetro de diagnóstico" pueden utilizarse indistintamente. En la realización ilustrada, la señal de detección de fallos 216 puede ser representativa de varios fallos asociados al tren de transmisión 140 incluyendo, entre otros, fallos de cojinetes y fallos de engranajes del tren de transmisión 140. En ciertas realizaciones, los fallos del tren de transmisión 140 pueden incluir, entre otros, fallos de engranajes del eje de alta velocidad (HS), fallos de engranajes intermedios del HS, fallos de engranajes planetarios, fallos de coronas dentadas, fallos de engranajes centrales, o similares, pero sin limitarse a ellos. En algunas realizaciones, adicionalmente, la señal 216 puede ser indicativa de un fallo de un cojinete del tren de transmisión 140 tal como un fallo de un cojinete del eje HS, un fallo del eje intermedio de alta velocidad (HSIS), un fallo del eje intermedio de baja velocidad (LSIS), un fallo del cojinete planetario, o similares.

Los fallos del tren de transmisión 140 generan dos tipos de vibraciones, a saber, vibraciones torsionales y radiales. Los sensores de vibración 180 detectan de manera efectiva vibraciones radiales en comparación con vibraciones torsionales. El análisis de vibraciones es una técnica no intrusiva para controlar el estado de los componentes mecánicos en máquinas rotativas. Por ejemplo, el estado de un componente particular puede determinarse considerando la frecuencia y la magnitud de las señales de vibración 202 generadas por el componente particular. En general, los componentes en buen estado, por ejemplo, engranajes con juegos de dientes completos, generan vibraciones de una amplitud más pequeña que los componentes en mal estado, por ejemplo, engranajes con dientes astillados o que faltan. Las frecuencias de las vibraciones generadas por los engranajes son exclusivas del diseño del engranaje y la velocidad de rotación del eje. Una técnica de análisis de vibración implica analizar las componentes de frecuencia de la señal de vibración 202 medida desde el tren de accionamiento 140 y medir la amplitud de las componentes de frecuencia armónica de la banda lateral de la señal de vibración 202, y compararlas con las amplitudes de frecuencias armónicas adyacentes.

El dispositivo basado en un controlador 190 emplea un sistema de control condicional (CMS) para determinar fallos del tren de transmisión en base a las señales de vibración. Por ejemplo, puede disponerse una pluralidad de sensores de vibración 180 en posiciones predeterminadas en una carcasa de la caja de engranajes. El dispositivo basado en un controlador 190 recibe las señales 202 representativas de las vibraciones detectadas desde los sensores 180. En una realización, el dispositivo basado en un controlador 190 realiza una transformada de Fourier rápida de las señales 202 representativas de vibraciones detectadas de engranajes y cojinetes y calcula la pluralidad de parámetros de diagnóstico para determinar el fallo.

Los sensores eléctricos 170, 171 son efectivos en el control de señales eléctricas de la máquina eléctrica que tiene fallos en el tren de transmisión debido a vibraciones torsionales. Mediante los sensores eléctricos 170, 171 se miden señales eléctricas 204, 206 y se transmiten al dispositivo basado en un controlador 190. Tal como se describe aquí, la señal eléctrica 204 es señal de tensión y la señal eléctrica 206 es señal de corriente. El dispositivo basado en un controlador 190 realiza un análisis de firma eléctrica (ESA) de las señales eléctricas 204, 206 para generar uno o más parámetros de diagnóstico. De acuerdo con los parámetros de diagnóstico, se determinan los fallos correspondientes del tren de transmisión. En una realización de la presente invención, el dispositivo basado en un controlador 190 realiza un análisis de firma de corriente (CSA) para determinar los fallos del tren de transmisión.

La figura 3 es un diagrama de flujo 300 que describe una técnica de ejemplo de detección de fallos en el dispositivo mecánico (por ejemplo, tren de transmisión) de acuerdo con una realización de ejemplo. El dispositivo basado en un controlador recibe una señal de vibración 302 y las señales eléctricas 304 y genera una firma de señal de vibración 306 y una firma de señal eléctrica 308. La señal de vibración es representativa de por lo menos una de vibraciones de estator, cojinete, engranaje, eje del tren de transmisión del dispositivo electromecánico. Las señales eléctricas pueden ser representativas de por lo menos una de una tensión medida y una corriente medida del dispositivo eléctrico, respectivamente. La firma de la señal de vibración se determina determinando un espectro de la señal de vibración. De manera similar, la firma de la señal eléctrica se determina determinando un espectro de por lo menos una de las señales eléctricas. La firma de la señal eléctrica y la firma de la señal de vibración son representativas de los espectros de frecuencia de las señales eléctricas y la señal de vibración, respectivamente. En algunas realizaciones, el espectro de frecuencias puede ser una transformada de Fourier, una transformada de Fourier discreta, una transformada wavelet o cualquier otra transformación que sea representativa de las componentes de frecuencia de las firmas de señal.

La figura 4A es una gráfica 350 que ilustra una curva 352 representativa de una señal de dominio temporal, representando el eje x 354 el tiempo y representando el eje y 356 la amplitud de la curva de la señal 352. La señal de dominio temporal puede ser una señal de vibración o una señal eléctrica.

La figura 4B ilustra una gráfica 358 que ilustra una curva 360 representativa de un espectro de la señal 352 (mostrada en la figura 4A). La curva 360 es una transformada de Fourier de la señal 352, representando el eje x 362 la frecuencia y representando el eje y 364 la magnitud del espectro.

5 Nuevamente, volviendo a la figura 3, debe observarse aquí que la firma de señal eléctrica y la firma de señal de vibración también pueden denominarse "primera firma de señal" y "segunda firma de señal" respectivamente de manera intercambiable. El método incluye, además, obtener una tercera firma de señal en base a la firma de señal eléctrica y la firma de señal de vibración 310. En una realización, una tercera firma de señal puede ser una combinación de la primera y la segunda firma de señal. En un ejemplo, la primera y la segunda firma de señal  
10 pueden añadirse para generar la tercera firma de señal. En una realización específica, la frecuencia de por lo menos una de la primera firma de señal y la segunda firma de señal puede modularse para generar la tercera firma de señal.

Se determina un parámetro de diagnóstico en base a por lo menos una de la primera, la segunda, y la tercera firma de señal 312. El parámetro de diagnóstico es representativo de una propiedad estadística de la firma de señal derivada de por lo menos una de: la firma de señal eléctrica, la firma de señal de vibración, y la firma de señal combinada (también denominada "tercera firma de señal"). Por ejemplo, el parámetro de diagnóstico puede ser un valor promedio, o un valor máximo, o un valor medio, o un valor de media cuadrática (RMS) de la firma de señal eléctrica, la firma de señal de vibración, y la firma de señal combinada. Puede utilizarse un número adecuado de  
15 muestras de cualquiera de las firmas de señal para determinar el parámetro de diagnóstico. El parámetro de diagnóstico también puede determinarse como una propiedad estadística dentro de un rango de frecuencias particular correspondiente a cualquiera de las firmas de señal. Por ejemplo, una firma de señal en una banda de frecuencia particular se representa como,

$$25 \quad \underline{s}(n) = [s(n) \quad s(n-1) \quad \cdots \quad s(n-k)], \quad (1)$$

donde,  $\underline{s}(n)$  es la señal,  $s(n)$ ,  $s(n-1) \dots s(n-k)$  son  $k+1$  valores de muestra de la firma de la señal. El valor promedio como valor de diagnóstico de la firma de la señal  $\underline{s}(n)$  se define como:

$$30 \quad Avg(\underline{s}(n)) = \frac{(s(n) + s(n-1) + \cdots + s(n-k))}{k+1}. \quad (2)$$

De manera similar, como otro ejemplo, el valor máximo como valor de diagnóstico de la firma de señal  $\underline{s}(n)$  se define como:

$$35 \quad Peak(\underline{s}(n)) = Max[s(n), s(n-1), \cdots s(n-k)]. \quad (3)$$

En todavía otro ejemplo, el valor de media cuadrática (RMS) como parámetro de diagnóstico de la firma de la señal eléctrica  $\underline{s}(n)$  se define como:

$$40 \quad RMS(\underline{s}(n)) = \frac{(s^2(n) + s^2(n-1) + \cdots + s^2(n-k))}{k+1}. \quad (4)$$

En ciertas realizaciones, se genera una pluralidad de parámetros de diagnóstico para determinar los tipos de fallo relacionados con el tren de transmisión. Ciertos parámetros de diagnóstico pueden determinarse en función de la firma de la señal eléctrica. Ciertos otros parámetros de diagnóstico pueden determinarse en función de la firma de la señal de vibración. Además, ciertos otros parámetros de diagnóstico pueden determinarse en función de la tercera firma de señal. Los parámetros de diagnóstico pueden determinarse en función de las firmas de señal, para las  
45 bandas de frecuencia correspondientes a varios fallos del tren de transmisión considerados. Las bandas de frecuencia correspondientes a fallos del tren de transmisión detectados utilizando sensores de vibración se derivan de la firma de señal de vibración 320. Del mismo modo, las bandas de frecuencia correspondientes a fallos del tren de transmisión detectados por sensores eléctricos se derivan de la firma de señal eléctrica 322. Las bandas de frecuencia correspondientes a varios fallos del tren de transmisión no se superponen. Cabe señalar aquí que la banda de frecuencia correspondiente a un fallo en un componente del tren de transmisión depende de las dimensiones geométricas del componente y de los parámetros de funcionamiento del tren de transmisión. Los parámetros operativos del tren de transmisión pueden incluir, entre otros, la velocidad del rotor, la frecuencia de excitación del rotor, la frecuencia de salida del estator, la carga y la velocidad del eje del dispositivo electromecánico. El rango de frecuencia correspondiente al fallo también depende del modelo de señal vibratoria o del modelo de  
50 señal eléctrica adoptado para determinar el fallo.

En una realización, solamente se determinan los fallos del tren de transmisión que pueden no determinarse en función de la firma de la señal eléctrica en función de la firma de la señal de vibración. Tal realización facilita la

reducción del número de sensores de vibración requeridos para determinar fallos. En otra realización, ciertos fallos se determinan utilizando la firma de la señal eléctrica y la firma de la señal de vibración de manera independiente. La confiabilidad de la detección de fallos puede mejorarse combinando las decisiones derivadas basadas en dos métodos de manera independiente.

5 En una realización, se determina una señal de transformación de frecuencia  $A(f)$  como la segunda firma de señal 308 en base a la señal de vibración medida. En base a la firma de la señal  $A(f)$  se determinan cuatro parámetros de diagnóstico como:

$$D_{v1} = \frac{1}{P} \sum_{i=Low1}^{High1} A^2(f_i) \quad (5)$$

$$D_{v2} = \frac{1}{P} \sum_{i=Low2}^{High2} A^2(f_i) \quad (6)$$

$$D_{v3} = \frac{1}{P} \sum_{i=Low3}^{High3} A^2(f_i) \quad (7),$$

$$D_{v4} = \frac{1}{P} \sum_{i=Low4}^{High4} A^2(f_i) \quad (8)$$

10 dónde  $D_{v1}$ ,  $D_{v2}$ ,  $D_{v3}$ , y  $D_{v4}$  son parámetros de diagnóstico correspondientes a un engranaje planetario, un engranaje intermedio, un engranaje de alta velocidad y cojinetes, respectivamente.  $A(f_i)$  es la amplitud de la firma de la señal de vibración a una frecuencia " $f$ ", " $P$ " es una constante de normalización correspondiente a la energía de la firma de la señal de vibración. Los rangos de frecuencia utilizados para determinar los cuatro parámetros de diagnóstico  $D_{v1}$ ,  $D_{v2}$ ,  $D_{v3}$ , y  $D_{v4}$  se indican por  $[Low_1, High_1]$ ,  $[Low_2, High_2]$ ,  $[Low_3, High_3]$ , y  $[Low_4, High_4]$  respectivamente. En una realización, por ejemplo,  $Low_1$  corresponde a una frecuencia de 20 Hz y  $High_1$  corresponde a una frecuencia de 130 Hz,  $Low_2$  corresponde a una frecuencia de 140 Hz y  $High_2$  corresponde a una frecuencia de 550 Hz,  $Low_3$  corresponde a una frecuencia de 560 Hz y  $High_3$  corresponde a una frecuencia de 3 KHz, y finalmente,  $Low_4$  corresponde a una frecuencia de 4kHz y  $High_4$  corresponde a la frecuencia más alta de la firma de la señal de vibración.

15 Para determinar un fallo en el engranaje de alta velocidad, se compara la amplitud de la señal de vibración  $A(f)$  en el rango de frecuencias de 560Hz a 3000Hz con un umbral predefinido. Si el valor de la amplitud de la señal de vibración es mayor que el valor umbral, se detecta un fallo en el engranaje de alta velocidad. Si el valor de la amplitud de la señal de vibración es menor o igual al valor umbral, esto indica que el engranaje de alta velocidad se encuentra en "buen estado". El método para establecer el valor del umbral predefinido se analiza en un párrafo siguiente.

20 En otra realización, se determina una representación de una transformada de Fourier de la señal eléctrica medida. La frecuencia de la firma de la señal eléctrica correspondiente al fallo del cojinete del tren de transmisión  $f_{bearing}$  se determina de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & Outerraceway...f_{orw} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta\right) \\
 f_{bearing} : & \quad Innerraceway...f_{irw} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta\right) \quad (9) \\
 & Ball...f_{ball} = \frac{D_c}{D_b} f_r \left(1 - \frac{D_b^2}{D_c^2} \cos^2 \beta\right)
 \end{aligned}$$

35 dónde  $f_{orw}$  es la frecuencia correspondiente al fallo del anillo exterior,  $f_{irw}$  es la frecuencia correspondiente al fallo del anillo interior, y  $f_{ball}$  es la frecuencia correspondiente al daño de la bola.  $N_b$  es el número de bolas en el cojinete,  $D_b$ ,  $D_c$ , y  $\beta$  son los parámetros dimensionales del cojinete,  $f_r$  es la frecuencia de la corriente del estator correspondiente a la velocidad del rotor. La frecuencia de la corriente del estator correspondiente al fallo del cojinete está representada por:

$$f_s = \left| f_{fundamental} \pm k \cdot f_{bearing} \right| \quad (10)$$

donde,  $f_s$  es la frecuencia de la corriente del estator,  $f_{fundamental}$  es la frecuencia de salida del estator,  $k$  es una constante correspondiente a diferentes modos de fallo.

- 5 En una realización específica, la frecuencia correspondiente a un fallo del anillo exterior del engranaje intermedio se determina en función de los parámetros físicos y operativos del tren de transmisión. La frecuencia del cojinete se calcula a partir de la ecuación (9) como:

$$f_{bearing} = \frac{N_b}{2} (f_{shaftspeed} \div f_{excitation}) \times Gear\_ratio \times \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta\right)$$

- 10 dónde  $f_{shaftspeed}$  es la velocidad de rotación del eje,  $f_{fundamental}$  es la frecuencia fundamental de 60Hz,  $Gear\_ratio$  es la relación de engrane correspondiente al engranaje intermedio. La frecuencia del cojinete es la frecuencia correspondiente al fallo del anillo exterior  $f_{orw}$ . La frecuencia de la corriente del estator correspondiente al fallo del anillo exterior del cojinete del tren de transmisión se calcula de acuerdo con la ecuación (10) como:

15

$$f_s = \left| f_{fundamental} \pm k \cdot f_{orw} \right|$$

- 20 La amplitud de la firma de la señal eléctrica a una frecuencia  $f_s$  es representativa de información sobre el fallo del anillo exterior del engranaje intermedio del tren de transmisión. Una amplitud máxima de la firma de la señal eléctrica es representativa del parámetro de diagnóstico correspondiente al fallo del anillo exterior del cojinete del tren de transmisión. El parámetro de diagnóstico se compara con un umbral predefinido 314. Si el parámetro de diagnóstico es mayor que el umbral predefinido 316, entonces se determina el fallo del tren de transmisión del cojinete 318. Si el parámetro de diagnóstico es menor que el umbral predefinido, entonces el cojinete del tren de transmisión no presenta fallo en el anillo exterior 324.

25

- El método incluye, además, determinar la gravedad del fallo de cada uno de los fallos de del tren de transmisión determinados. Por ejemplo, cada uno de los fallos del tren de transmisión puede clasificarse en gravedad leve, media o alta. Para determinar la gravedad de un fallo en particular, se compara el parámetro de diagnóstico correspondiente al fallo del tren de transmisión con dos umbrales. Si el parámetro de diagnóstico es menor que ambos umbrales, el fallo se considera de baja gravedad. Si el parámetro de diagnóstico se encuentra entre los dos umbrales, el fallo se considera de gravedad media. Si el parámetro de diagnóstico es mayor que ambos umbrales, el fallo se considera de alta gravedad.

30

- 35 Los valores umbral descritos aquí se determinan a priori en función de mediciones de referencia de un tren de transmisión sin fallos. En una realización, las firmas de señal se determinan para un dispositivo electromecánico que funciona en condiciones normales sin ningún fallo. Se determina un valor máximo de la firma de señal en una banda de frecuencia adecuada correspondiente a un fallo del tren de transmisión. Este valor se utiliza para definir un umbral predefinido correspondiente al fallo del tren de transmisión. Para mejorar la precisión de detección de fallos, se determina un conjunto de umbrales a priori para cada componente del tren de transmisión, incluyendo la caja de engranajes y el cojinete del conjunto del dispositivo electromecánico. Se mide una pluralidad de señales de corriente y tensión para condiciones de línea de base y condiciones de detección de fallos para cada componente y se establecen los valores de umbral correspondientes. Por ejemplo, para diferenciar un estado deteriorado de la caja de engranajes de otros componentes defectuosos, se determina un valor umbral de advertencia para el valor de media cuadrática (RMS) del espectro de corriente del estator de la caja de engranajes. Puede detectarse un posible fallo de la caja de engranajes si existe una variación entre el espectro de corriente del estator y el valor de umbral de advertencia determinado. Para evitar errores de cálculo debidos a datos insuficientes, el dispositivo basado en un controlador mide una pluralidad de muestras de la corriente del estator, por ejemplo, alrededor de 30-50 muestras de valores de medición. Si el valor RMS del valor de corriente del estator supera el valor umbral predefinido, se determina un estado de fallo del tren de transmisión en la caja de engranajes. De manera similar, correspondiente a cada tipo de fallo del tren de transmisión, se determina uno o más valores umbral adicionales para identificar la gravedad del fallo.

50

- 55 La figura 5 es una representación gráfica 400 de una corriente del estator de muestra en el dominio de frecuencia de una caja de engranajes dañada que tiene un fallo en el anillo exterior del cojinete. El eje x 408 representa la frecuencia en Hz (hercios) y el eje y 410 representa la amplitud en dB (decibelios) del espectro de corriente del estator. La curva 412 representa un espectro de una corriente de estator durante un buen estado de la caja de engranajes, mientras que la curva 406 representa un espectro de una corriente de estator durante un estado

5 defectuoso de la caja de engranajes que tiene un fallo en el anillo exterior del cojinete. El pico del espectro 402 de la curva 406 representativo de la corriente del estator debido al fallo de la caja de engranajes es más elevado en comparación con el pico del espectro 404 de la curva 412 representativo de la corriente del estator de la caja de cambios en buen estado. En la realización ilustrada, la diferencia entre los picos del espectro 404, 402 representativos de un buen estado de la caja de engranajes y un estado defectuoso de la caja de engranajes es de aproximadamente 9 dB.

10 De acuerdo con las realizaciones descritas aquí, los fallos en un tren de transmisión de un dispositivo electromecánico se determinan utilizando una o más señales eléctricas medidas de uno o más sensores eléctricos y una o más señales de vibración medidas de uno o más sensores de vibración. De las señales eléctricas se derivan firmas de señal eléctrica y de las señales de vibración se derivan firmas de señal de vibración. De acuerdo con las firmas de señal eléctrica y las firmas de señal de vibración, se determinan varios fallos del tren de transmisión. El uso de señales eléctricas facilita la reducción del número de señales de vibración para determinar los fallos del tren de transmisión.

15 Debe entenderse que no todos los objetos o ventajas descritos anteriormente pueden necesariamente lograrse de acuerdo con cualquier realización particular. Así, por ejemplo, los expertos en la materia reconocerán que los sistemas y técnicas descritos aquí pueden realizarse o llevarse a cabo de una manera que se logre o se mejore una ventaja o grupo de ventajas tal como se indica aquí sin lograr necesariamente otros objetos o ventajas tal como puede indicarse o sugerirse aquí.

20 Si bien se ha descrito en detalle la tecnología en relación con sólo un número limitado de realizaciones, debe entenderse fácilmente que la invención no se limita a tales realizaciones descritas. Más bien, la tecnología puede modificarse para incorporar cualquier cantidad de variaciones, alteraciones, sustituciones o disposiciones equivalentes no descritos hasta ahora, pero que sean acorde al espíritu y alcance de las reivindicaciones. Además, aunque se han descrito diversas realizaciones de la tecnología, debe entenderse que los aspectos de la invención pueden incluir sólo algunas de las realizaciones descritas. Por consiguiente, la invención no debe verse limitada por la descripción anterior, sino que sólo está limitada por el alcance de las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Método (300) de detección de fallos en un dispositivo electromecánico (160), incluyendo el dispositivo electromecánico un conjunto de rotor (110), un cojinete principal (120), un eje principal (130), un tren de transmisión (140) y un generador (150) que genera potencia de salida, en el que el conjunto de rotor (110) está acoplado al generador (150) a través del tren de transmisión (140), comprendiendo el método:
- 10 recibir (304) una señal eléctrica medida desde el generador (150) del dispositivo electromecánico (160);  
recibir (302) una señal de vibración medida desde un tren de transmisión (140) del dispositivo electromecánico (160), acoplado al generador (150);  
determinar (308) una primera firma de señal en base a la señal eléctrica medida, que comprende determinar un espectro de la señal eléctrica;  
determinar (306) una segunda firma de señal en base a la señal de vibración medida, que comprende determinar un espectro de la señal de vibración;
- 15 determinar (312) una pluralidad de parámetros de diagnóstico, en el que por lo menos un parámetro de diagnóstico se basa en la primera firma de señal y por lo menos otro parámetro de diagnóstico se basa en la segunda firma de señal; y  
determinar un fallo en el tren de transmisión (140) en base a la pluralidad de parámetros de diagnóstico, y  
determinar la gravedad del fallo comparando la pluralidad de parámetros de diagnóstico con dos umbrales para  
20 clasificar la gravedad.
2. Método (300) de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que la señal eléctrica es representativa de por lo menos una de una corriente medida, una tensión medida del generador.
- 25 3. Método (300) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que comprende, además, determinar (310) una tercera firma de señal en base a la primera firma de señal y la segunda firma de señal, añadiendo una primera señal de firma y una segunda señal de firma.
- 30 4. Método (300) de acuerdo con la reivindicación 3, caracterizado por el hecho de que comprende, además, determinar (312) un parámetro de diagnóstico en base a la tercera firma de señal.
5. Método (300) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que determinar el fallo del tren de transmisión (140) comprende comparar (316) la pluralidad de parámetros de diagnóstico con un valor umbral predefinido.
- 35 6. Sistema (100), que comprende:  
un dispositivo electromecánico (160) que incluye:
- 40 un generador (150) que genera potencia de salida;  
un tren de transmisión (140);  
un conjunto de rotor (110), un cojinete principal (120) y un eje principal (120), estando acoplado el conjunto de rotor (110) al generador (150) a través del tren de transmisión (140)  
un dispositivo basado en un controlador (190) configurado para llevar a cabo el método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores.
- 45

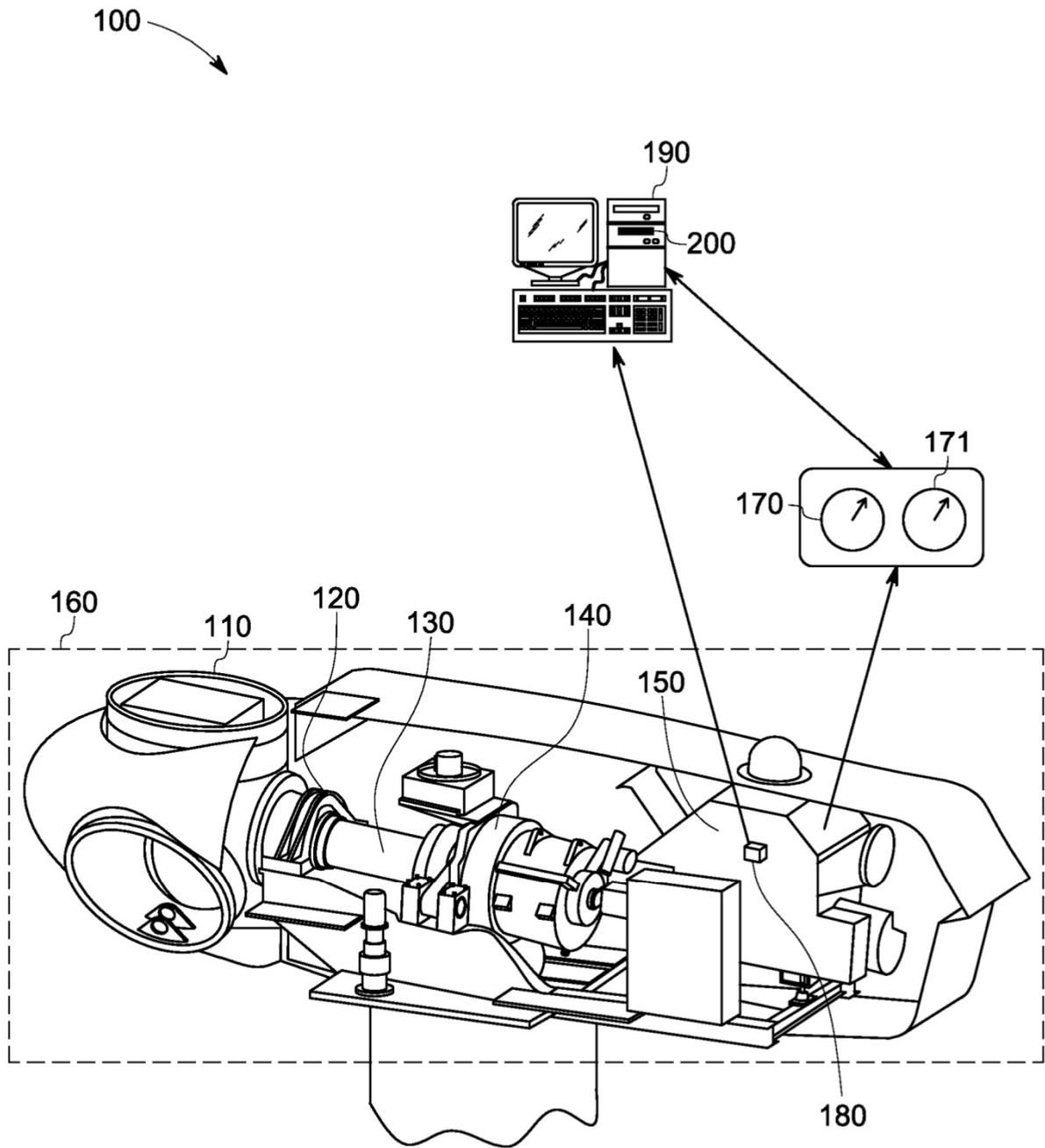


FIG. 1

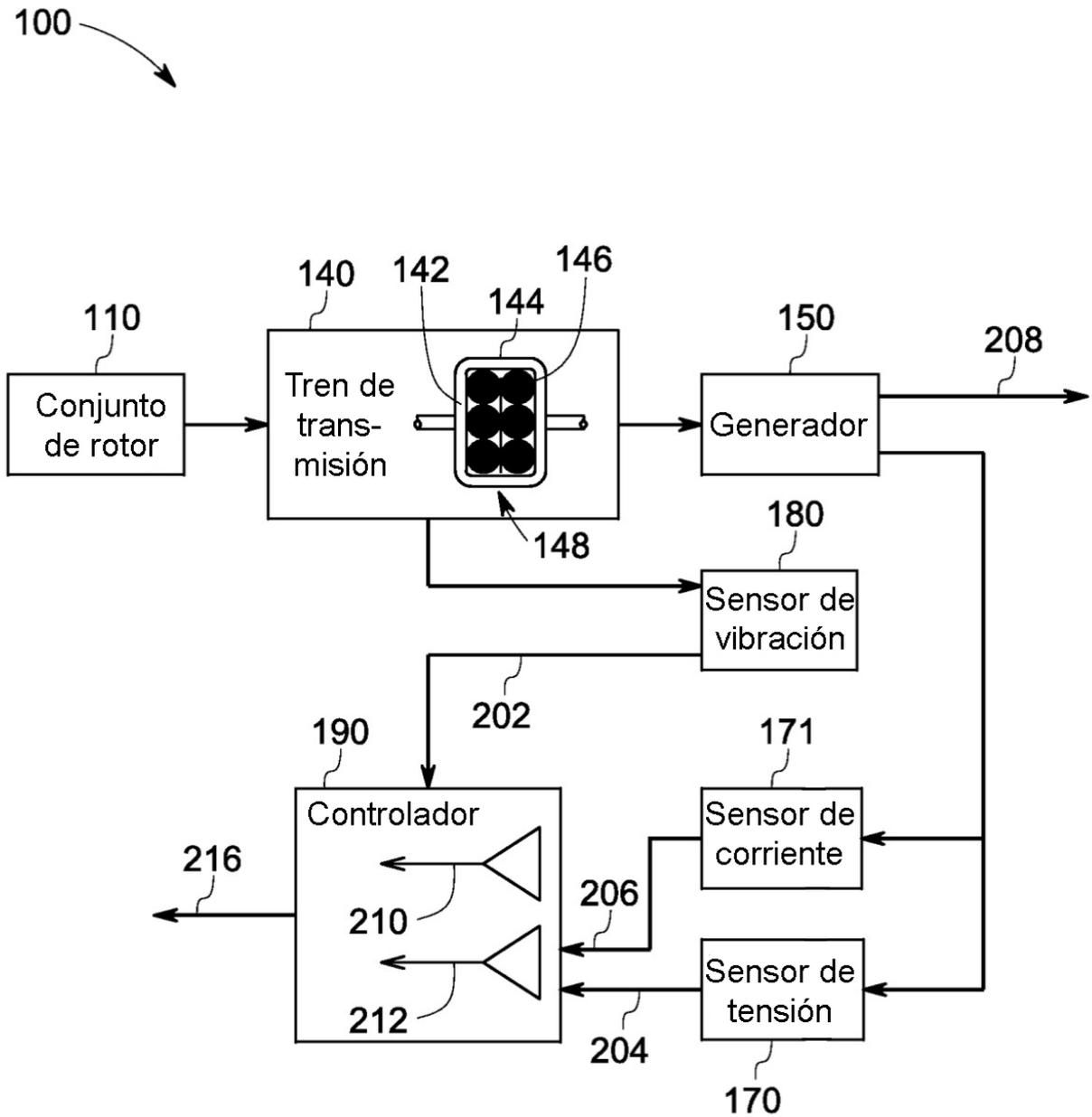


FIG. 2

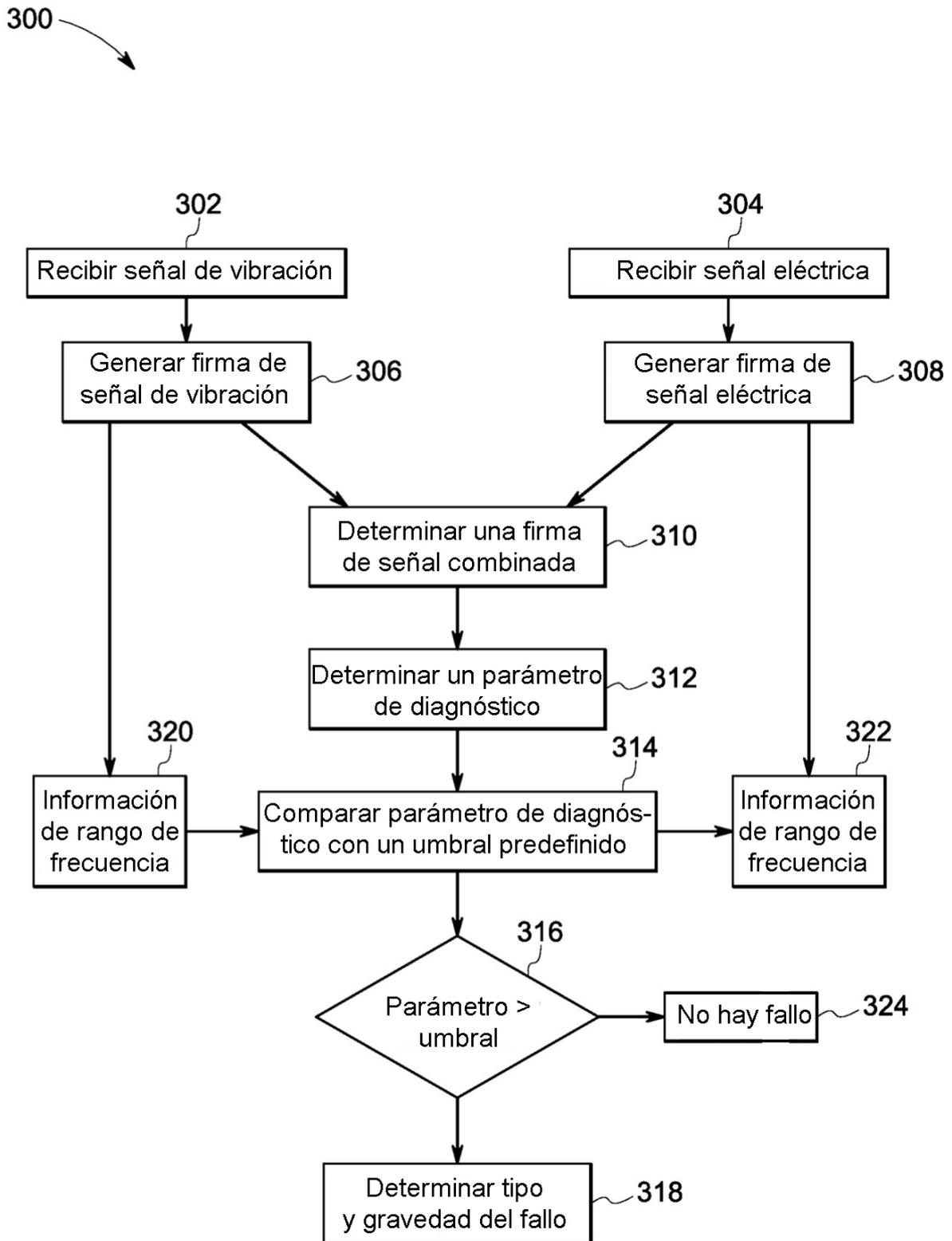


FIG. 3

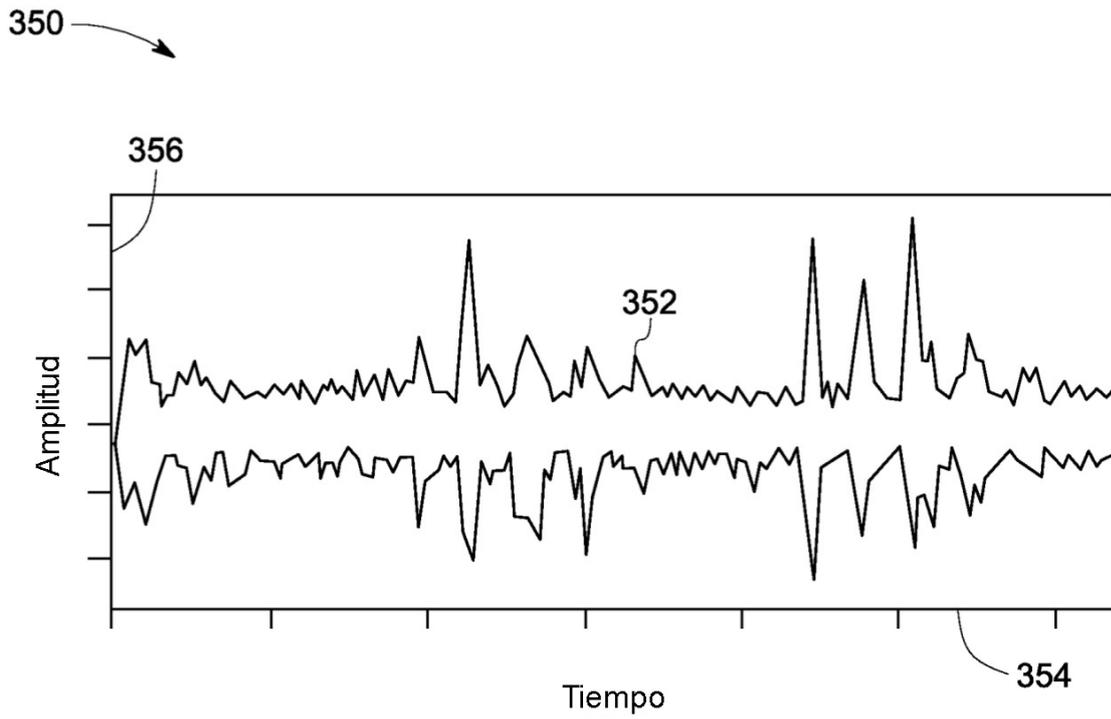


FIG. 4A

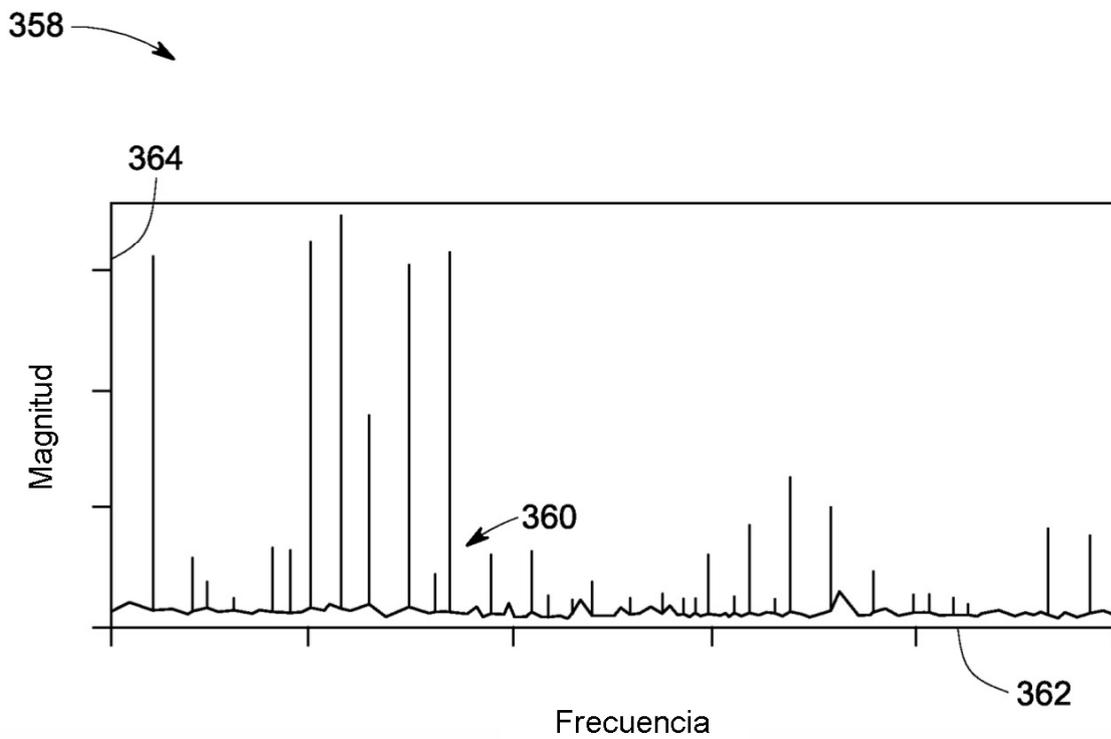


FIG. 4B

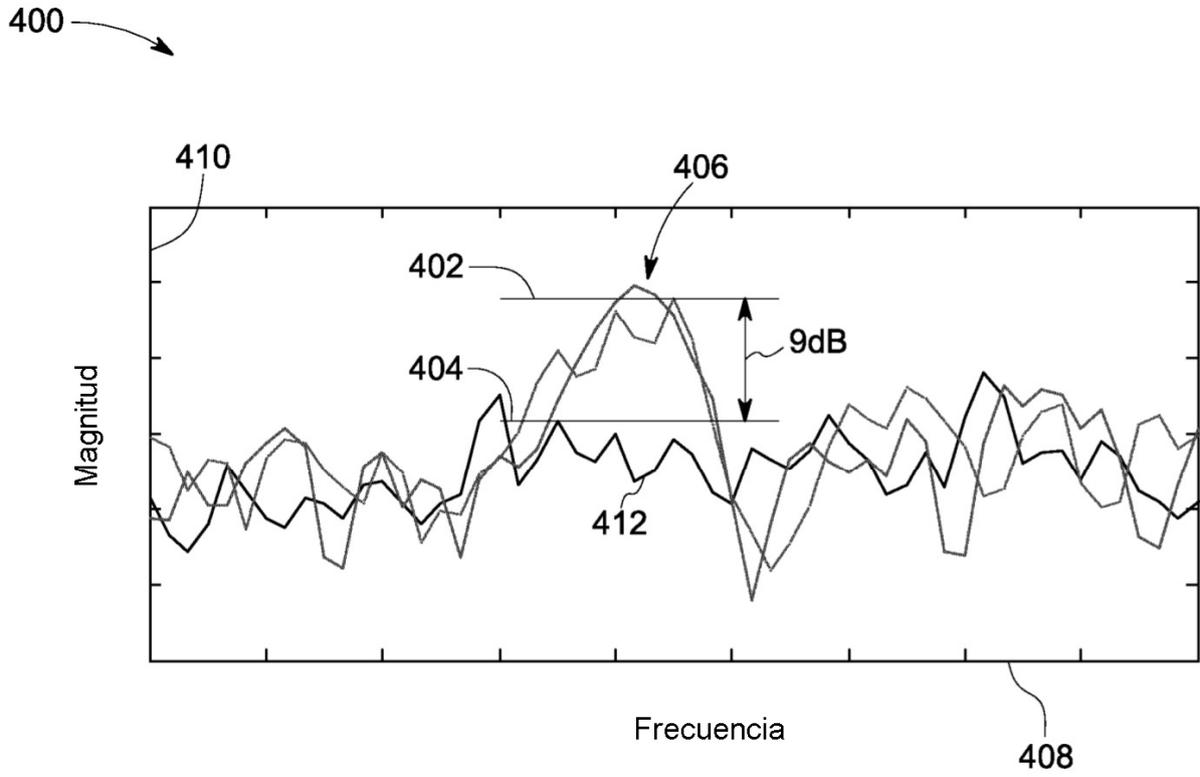


FIG. 5