

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 787 509**

51 Int. Cl.:

G01M 13/021 (2009.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.10.2011** E 11185001 (2)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.03.2020** EP 2581724

54 Título: **Procedimiento y sistema para supervisar las condiciones de unas cajas de engranajes**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
16.10.2020

73 Titular/es:

**MOVENTAS GEARS OY (100.0%)
Vesangantie 1, P.O. Box 158
40101 Jyväskylä, FI**

72 Inventor/es:

**KIVINIEMI, JOONAS;
ELFSTRÖM, JUKKA y
PYLVÄNEN, MARKUS**

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo

ES 2 787 509 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

Procedimiento y sistema para supervisar las condiciones de unas cajas de engranajes

Campo de la invención

5 La invención se refiere a la supervisión de las condiciones de unas cajas de engranajes. De manera más particular, la invención se refiere a un sistema, a un procedimiento y a un programa informático para supervisar las condiciones de unas cajas de engranajes.

Antecedentes

10 Muchas técnicas para diagnosticar engranajes se basan en el análisis de vibraciones mecánicas medidas en una caja de engranajes. El objetivo es detectar la presencia de posibles fallos en una fase incipiente de desarrollo y supervisar la evolución de los fallos, para estimar la vida residual de la caja de engranajes y/o elegir un plan de mantenimiento adecuado. La supervisión típicamente está basada en convertir la señal que representa las vibraciones mecánicas medidas en la caja de engranajes al dominio de la frecuencia y posteriormente buscar a partir del espectro resultante de las vibraciones mecánicas indicaciones de fallos. Por ejemplo, la publicación DE19933105 desvela un procedimiento en el que se proporciona una indicación de un engranaje defectuoso cuando un espectro medido se desvía de un espectro de referencia. La caja de engranajes a supervisar puede ser, por ejemplo, pero no necesariamente, una caja de engranajes de una estación de energía eólica.

15 Una disposición de supervisión típicamente comprende sensores de vibración sujetos a las cajas de engranajes a supervisar, conexiones de comunicación de datos desde los sensores de vibración hasta una estación de supervisión centralizada, y, en la estación de supervisión, equipos de procesamiento y visualización para procesar los datos medidos y mostrar los espectros de las vibraciones mecánicas a operarios que han sido entrenados para analizar los espectros. La disposición de supervisión puede cubrir cientos o incluso un millar de cajas de engranajes a supervisar, y se pueden medir, por ejemplo, 20 espectros al día a partir de cada caja de engranajes. Esto significaría que se deben analizar diariamente hasta 20000 espectros medidos. De este modo, hay una clara necesidad de procedimientos y sistemas que sean adecuados para un análisis automatizado y/o para una purga previa de los resultados medidos con el fin de reducir la cantidad de trabajo humano requerida.

20 La publicación EP1612458 describe un sistema de supervisión de las condiciones de una caja de engranajes que comprende al menos un sensor de vibración situado en la carcasa de una caja de engranajes. Una unidad de procesamiento está acoplada al sensor de vibración y está configurada para recibir señales representativas de las vibraciones detectadas desde el sensor de vibración. La unidad de procesamiento es operable para procesar las señales representativas de las vibraciones detectadas de engranajes y rodamientos y para calcular al menos un índice de energía dinámico o localización de fallos, en el que el índice de energía está definido como el sumatorio de energía de una señal dinámica en un ancho de banda de frecuencias específico. En muchos casos este sistema funciona bien, pero sigue habiendo la necesidad de mejorar la fiabilidad en la detección de fallos en una caja de engranajes.

25 La publicación EP1548419 describe un sistema para diagnosticar la presencia o ausencia de anomalías en una unidad de rodamiento de un vehículo ferroviario. El sistema comprende un sensor para emitir una señal generada por la unidad de rodamiento como una señal eléctrica, un procesador para tomar una decisión sobre la anomalía de la unidad de rodamiento basándose en una información sobre la vibración contenida en la señal eléctrica, una porción de emisión para emitir la decisión producida por el procesador y un controlador para retroalimentar una señal de control a un sistema de control del vehículo ferroviario basándose en la decisión.

30 **Sumario**

La invención se expone en el conjunto de reivindicaciones adjuntas.

A continuación, se presenta un sumario simplificado con el fin de facilitar una comprensión básica de algunos aspectos de diversas realizaciones de la invención. El siguiente sumario meramente presenta algunos conceptos de la invención en forma simplificada como preludio de una descripción más detallada de realizaciones ilustrativas de la invención.

35 De conformidad con el primer aspecto de la presente invención, se proporciona un nuevo sistema con el fin de supervisar las condiciones de unas cajas de engranajes. El sistema de acuerdo con la invención comprende una memoria configurada para almacenar datos indicativos de al menos dos frecuencias específicas predeterminadas de un fenómeno y valores de referencia de amplitudes relativas a las frecuencias específicas predeterminadas de un fenómeno, en el que al menos dos de los valores de referencia de las amplitudes son desiguales entre sí, El sistema además comprende un equipo de procesamiento configurado para:

- 40 - recibir datos que contienen información de al menos un espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas medidas en al menos una caja de engranajes,
- buscar, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, al menos dos picos en frecuencias tales que corresponden a un fenómeno definido con las al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno y con los

valores de referencia de las amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno, y

- formar un indicador de probabilidad de ocurrencia para el fenómeno basándose en a) amplitudes de los picos buscados y b) los valores de referencia de las amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno.

5 Muchos fenómenos tales como, por ejemplo, un fallo en los dientes de una rueda dentada, se manifiestan con más de un pico en el espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas medidas en una caja de engranajes. Por ejemplo, puede haber un pico principal y uno o más picos laterales más pequeños en el espectro de frecuencias. En el sistema desvelado anteriormente, cada fenómeno está definido con dos o más frecuencias específicas de un fenómeno que pueden determinarse teóricamente y/o experimentalmente. Por otro lado, con respecto, por ejemplo, a los fallos de rodamiento, las frecuencias específicas de un fenómeno las pueden proporcionar los vendedores de los rodamientos. 10 El hecho de que el indicador relativo a un cierto fenómeno se forme basándose en las amplitudes de dos o más picos que son todos relativos al fenómeno en consideración mejora la fiabilidad del indicador. Naturalmente, es posible que además de uno o más fenómenos, cada uno definido con dos o más frecuencias específicas de un fenómeno, haya uno o más fenómenos, cada uno definido con solo una frecuencia específica de un fenómeno. Cada caja de engranajes que se está supervisando puede ser bien una caja de engranajes que está integrada en otro dispositivo, p. ej., un generador o un motor, o bien una caja de engranajes independiente. 15

De conformidad con el segundo aspecto de la presente invención, se proporciona un nuevo procedimiento con el fin de supervisar las condiciones de unas cajas de engranajes. El procedimiento de acuerdo con la invención comprende:

- recibir datos que contienen información de al menos un espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas medidas en al menos una caja de engranajes,
- 20 - buscar, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, al menos dos picos de frecuencias tales que corresponden a un fenómeno definido con al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno y con valores de referencia de amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno, en el que al menos dos de los valores de referencia de las amplitudes son desiguales entre sí, y
- formar un indicador de probabilidad de ocurrencia para el fenómeno basándose en a) amplitudes de los picos buscados y b) los valores de referencia de las amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno. 25

De conformidad con el tercer aspecto de la presente invención, se proporciona un nuevo programa informático con el fin de supervisar las condiciones de unas cajas de engranajes. El programa informático comprende instrucciones ejecutables por ordenador para controlar un procesador programable para:

- 30 - recibir datos que contienen información de al menos un espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas medidas en al menos una caja de engranajes,
- buscar, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, al menos dos picos de frecuencias tales que corresponden a un fenómeno definido con al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno y con valores de referencia de amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno, en el que al menos dos de los valores de referencia de las amplitudes son desiguales entre sí, y
- 35 - formar un indicador de probabilidad de ocurrencia para el fenómeno basándose en a) amplitudes de los picos buscados y b) los valores de referencia de las amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno.

Un producto de programa informático de acuerdo con la invención comprende un medio no volátil legible por ordenador, por ejemplo, un disco compacto ("CD"), codificado con un programa informático de acuerdo con la invención.

40 En las reivindicaciones dependientes adjuntas se describe una serie de realizaciones ilustrativas de la invención.

Las diversas realizaciones ilustrativas de la invención tanto las relacionadas con construcciones como con procedimientos operativos, así como los objetivos y las ventajas adicionales de la misma, se entenderán mejor a partir de la siguiente descripción de realizaciones ilustrativas específicas, cuando se lean en relación con los dibujos adjuntos.

45 El verbo "comprender" se utiliza en el presente documento como una limitación abierta que ni excluye ni requiere la existencia de características no enumeradas. Las características enumeradas en las reivindicaciones dependientes pueden combinarse libremente entre sí a no ser que se indique explícitamente lo contrario.

Breve descripción de las figuras

50 Las realizaciones ilustrativas de la invención, así como sus ventajas, se explican con más detalle a continuación, a modo de ejemplos y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 ilustra una caja de engranajes y un sistema de acuerdo con una realización de la invención para supervisar las condiciones de la caja de engranajes,

la figura 2a ilustra definiciones de parámetros que pueden usarse en sistemas y procedimientos de acuerdo con algunas realizaciones de la invención y las figuras 2b-2d ilustran espectros de frecuencias ilustrativos de vibraciones mecánicas,

5 la figura 3 ilustra un parque eólico provisto de un sistema de acuerdo con una realización de la invención para supervisar las condiciones de las cajas de engranajes del parque eólico, y

la figura 4 muestra un diagrama de flujo de un procedimiento de acuerdo con una realización de la invención con el fin de supervisar las condiciones de unas cajas de engranajes.

Descripción de las realizaciones ilustrativas

10 La figura 1 ilustra una caja de engranajes 107 y un sistema de acuerdo con una realización de la invención para supervisar las condiciones de una caja de engranajes. Los dispositivos mecánicos conectados a los árboles de entrada y de salida de la caja de engranajes no se muestran en la figura 1. La caja de engranajes puede ser, por ejemplo, pero no necesariamente, una caja de engranajes de una estación de energía eólica en la que la caja de engranajes está situada entre una turbina eólica y un generador. La caja de engranajes está provista de sensores de vibración 104, 105 y 106 para medir vibraciones mecánicas en diferentes puntos de medición de la caja de engranajes. Cada sensor de vibración puede comprender unos medios para medir vibraciones en tres direcciones mutuamente ortogonales o, como alternativa, puede haber sensores de vibración separados para diferentes direcciones en algunos o todos los puntos de medición. El sistema de supervisión de las condiciones de las cajas de engranajes comprende un equipo de procesamiento 101 que está configurado para recibir datos que contienen información de al menos un espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas medidas en las cajas de engranajes. Las señales brutas producidas por los sensores de vibración 104-106 son señales en el dominio de tiempo que representan las vibraciones mecánicas. El equipo de procesamiento 101 ventajosamente está configurado para convertir las señales en el dominio de tiempo a unas en el dominio de frecuencia para obtener los espectros de frecuencia de las vibraciones mecánicas medidas. La conversión al dominio de frecuencia puede realizarse con la Transformada Rápida de Fourier "FFT". Naturalmente, también es posible que haya un motor de conversión separado entre los sensores de vibración y el equipo de procesamiento. También es posible que los sensores de vibración 104-105 comprendan motores de conversión integrados.

El equipo de procesamiento 101 está configurado para buscar, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, picos de frecuencias tales que corresponden a un fenómeno definido con al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno y con valores de referencia de amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno. Las frecuencias específicas de un fenómeno y los valores de referencia de amplitudes correspondientes representan datos que se han almacenado previamente en el propio equipo de procesamiento o en un dispositivo de memoria externa 102. El equipo de procesamiento 101 preferentemente está conectado al equipo 103 de interfaz de usuario. El equipo de procesamiento 101 puede comprender una o más unidades de procesador y cada una de las cuales puede ser una unidad de procesador programable, una unidad dedicada de procesador de hardware tal como un circuito integrado de aplicación específica "ASIC", una unidad de procesador configurable tal como una matriz de puertas programables por campo "FPGA" o una combinación de las mismas.

Los picos mencionados anteriormente pueden buscarse a partir del espectro de frecuencias leyendo las amplitudes correspondientes a las frecuencias específicas de un fenómeno y comparando posteriormente estas amplitudes con el nivel de fondo de las vibraciones mecánicas. Se puede tomar una decisión de que hay un pico, por ejemplo, en una situación en la que la amplitud es al menos una constante predeterminada multiplicada por el nivel de fondo de la vibración mecánica. El nivel de fondo puede formarse filtrando las amplitudes sobre la frecuencia con un filtro promedio de ventana deslizante, con un filtro medio de una ventana deslizante o utilizando algún otro procedimiento matemático adecuado. El equipo de procesamiento está configurado para formar un indicador de probabilidad de ocurrencia del fenómeno basándose en a) amplitudes de los picos buscados, es decir, amplitudes correspondientes a las frecuencias específicas de un fenómeno y b) los valores de referencia de las amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno. El fenómeno puede ser, por ejemplo, un desequilibrio estático, un desequilibrio dinámico, un error de alineación angular, un error de alineación radial, un fallo en la trayectoria externa de rodadura de un rodamiento, un fallo en la trayectoria interna de rodadura de un rodamiento, un fallo en un elemento de rodadura de un rodamiento, un fallo en el soporte de los elementos de rodadura de un rodamiento, una resonancia mecánica, un fallo en los dientes de una rueda dentada o un ajuste con holgura.

El indicador de probabilidad de ocurrencia se puede calcular, por ejemplo, según la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N \min\left\{\frac{A(f_i)}{A_R(f_i)}, 1\right\}}{N} \quad (1)$$

En la ecuación (1), C es el indicador de probabilidad de ocurrencia relativa al fenómeno que posiblemente se esté produciendo cuando el espectro de frecuencias de las vibraciones mecánicas medidas contiene picos correspondientes a las frecuencias específicas de un fenómeno F_1, f_2, \dots, f_N guardadas previamente. Así pues, f_i es la frecuencia correspondiente al i-ésimo pico buscado. $A(f_i)$ es la amplitud del i-ésimo pico buscado y $A_R(f_i)$ es el valor de referencia guardado previamente de la amplitud relativa a la i-ésima frecuencia específica de un fenómeno.

Preferentemente, los valores de referencia $A_R(f_1), \dots, A_R(f_N)$ de las amplitudes guardados previamente se seleccionan basándose en una información empírica y/o teórica de manera que, cuando cada una de las amplitudes $A(f_1), \dots, A(f_N)$ supera el correspondiente valor de referencia, en la práctica sea cierto que se está produciendo el fenómeno. En ese caso, el indicador de probabilidad de ocurrencia C es una unidad como puede verse a partir de la ecuación (1).

5 En un sistema de acuerdo con una realización de la invención, el equipo de procesamiento 101 está configurado para recibir un indicador de potencia que es indicativo de la potencia mecánica transferida por la caja de engranajes 107 y para calcular uno o más de los valores de referencia de amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno, es decir, $A_R(f_1), \dots, A_R(f_N)$, basándose en el indicador de potencia y los datos previamente almacenados que definen los valores de referencia de amplitudes como funciones del indicador de potencia. El indicador de potencia
10 puede ser, por ejemplo, un valor medido de la potencia eléctrica generada en un generador conectado a la caja de engranajes. Un valor de referencia de amplitud es preferentemente una función ascendente del indicador de potencia de manera que el valor de referencia aumenta a medida que aumenta la potencia mecánica transferida con la caja de engranajes 107. Con relación a muchos picos del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, una propiedad inherente es que la amplitud de un pico aumenta a medida que aumenta la potencia. Cuando la caja de engranajes
15 está muy cargada determinadas amplitudes pueden ser normales, pero, por otra parte, si estas amplitudes se produjeron durante unas condiciones sin carga o con poca carga, sería un fuerte indicador de un fallo.

Con el fin de proporcionar un ejemplo, se considera un caso ilustrativo en el que un fenómeno es un fallo y está definido con las siguientes frecuencias $f_{fallo}, 2 \times f_{fallo}$ y $3 \times f_{fallo}$, y con los siguientes valores de referencia de las amplitudes relativas a estas frecuencias, respectivamente: 0,35 mm/s, 0,25 mm/s y 0,15 mm/s. A continuación, se asume que hay picos
20 en el espectro de frecuencias de las vibraciones mecánicas medidas correspondientes a frecuencias f_{fallo} y $2 \times f_{fallo}$ de modo que las amplitudes de estos picos son de 0,40 mm/s y 0,10 mm/s, respectivamente. Asimismo, se asume que no hay picos, es decir, no se supera el nivel de fondo, correspondiente a la frecuencia $3 \times f_{fallo}$. Sustituyendo estos valores numéricos en la ecuación (1) se obtiene el indicador de probabilidad de ocurrencia $C \approx 0,47$. Diferentes valores del indicador de probabilidad de ocurrencia se pueden clasificar basándose en datos empíricos. La clasificación puede
25 ser, por ejemplo, tal como sigue:

- no hay fallo cuando $C < 0,6$,
- hay un fallo incipiente cuando $0,6 \leq C < 1$, y
- hay un fallo cuando $C = 1$.

El equipo de procesamiento 101 preferentemente está configurado para gestionar dos o más fenómenos simultáneamente. En ese caso, el equipo de procesamiento 101 está configurado para buscar, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, picos en dos o más conjuntos de frecuencias tales que correspondan a dos o más fenómenos, estando cada uno de los mismos definido con al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno y con valores de referencia de amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno. El equipo de
30 procesamiento 101 está configurado para formar, para cada uno de los al menos dos fenómenos, el indicador de probabilidad de ocurrencia basándose en a) amplitudes de los picos buscados correspondientes a ese fenómeno y b) los valores de referencia de las amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno.

En un sistema de acuerdo con una realización de la invención, el equipo de procesamiento 101 está configurado para disponer las frecuencias específicas de un fenómeno y el espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas para que se correspondan entre sí con la ayuda de una velocidad de rotación relativa al espectro de frecuencias de vibraciones
40 mecánicas y una velocidad de rotación de referencia relativa a las frecuencias específicas de un fenómeno. Esto es necesario en los casos en los que la velocidad de rotación de la caja de engranajes 107 durante la medición de las vibraciones mecánicas difiere de la velocidad de rotación de referencia correspondiente a las frecuencias específicas de un fenómeno previamente almacenadas. El equipo de procesamiento 101 preferentemente está configurado para recibir una velocidad de rotación medida de la caja de engranajes junto con la información sobre las vibraciones
45 mecánicas. El equipo de procesamiento 101 además puede configurarse para que busque, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, un pico de referencia cuya frecuencia es, según una teoría conocida, un número entero o racional conocido multiplicado por la velocidad de rotación de la caja de engranajes. Por ejemplo, la frecuencia de engranado de dos ruedas dentadas interoperativas es un número racional conocido multiplicado por la velocidad de rotación. El valor de la velocidad de rotación medida puede ajustarse finamente con la ayuda de la frecuencia del
50 pico de referencia y el número entero o número racional conocido.

Las frecuencias específicas de un fenómeno pueden convertirse para que correspondan al espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas multiplicando un primer subconjunto de las frecuencias específicas de un fenómeno por una relación de la velocidad de rotación y la velocidad de rotación de referencia. El primer subconjunto de las frecuencias
55 específicas de un fenómeno son unas frecuencias tales que son proporcionales a la velocidad de rotación y al menos parte del resto de las frecuencias específicas de un fenómeno son frecuencias de resonancias mecánicas que no son proporcionales a la velocidad de rotación. Como alternativa, el espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas se puede convertir para que corresponda a las frecuencias específicas de un fenómeno multiplicando un primer subconjunto de frecuencias del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas por una relación de la velocidad de rotación de referencia y la velocidad de rotación. El primer subconjunto de las frecuencias del espectro de frecuencias

de vibraciones mecánicas son unas frecuencias tales que son proporcionales a la velocidad de rotación y al menos parte del resto de las frecuencias del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas son frecuencias de resonancias mecánicas. En las conversiones, se debería tener en cuenta que las amplitudes, cuando se expresan como velocidad, por ejemplo, en mm/s, o como aceleración, por ejemplo, en mm/s², también se escalan cuando la velocidad de rotación cambia si la amplitud expresada como desplazamiento, por ejemplo, en mm, es la misma a diferentes velocidades de rotación.

En un sistema de acuerdo con una realización de la invención, el equipo de procesamiento 101 está configurado para llevar a cabo las siguientes acciones a)-e) para buscar picos a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas:

- 10 a) seleccionar una banda de frecuencias que cubra las frecuencias específicas de un fenómeno relativas al fenómeno en consideración,
- b) formar una señal en el dominio de tiempo que se corresponda a la parte del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas que pertenece a la banda de frecuencias seleccionada,
- c) rectificar la señal en el dominio de tiempo, por ejemplo, cuadrando o formando un valor absoluto,
- 15 d) convertir la señal en el dominio de tiempo rectificadas en una en el dominio de frecuencia con la transformada de Fourier, por ejemplo, una FFT, para formar un espectro de frecuencias auxiliar, y
- e) buscar los al menos dos picos a partir del espectro de frecuencias auxiliar.

La señal en el dominio de tiempo mencionada anteriormente puede formarse bien aplicando un filtro de paso de banda a la señal de vibración mecánica medida en el dominio de tiempo o recortando del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas la parte que corresponde a la banda de frecuencias seleccionada y convirtiendo posteriormente esta parte del espectro de frecuencias en el dominio del tiempo con la transformada inversa de Fourier, por ejemplo, una IFFT.

El espectro de frecuencias auxiliar mencionado anteriormente representa un espectro de frecuencias envolvente a partir del cual picos débiles que representan fallos incipientes son más fáciles de detectar que a partir del espectro original de frecuencias de vibraciones mecánicas.

En un sistema de acuerdo con una realización de la invención, el equipo de procesamiento 101 está configurado para llevar a cabo las siguientes acciones a)-f) para formar una cifra de interés L:

- 30 a) calcular un nivel total de vibración a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, en el que el nivel total de vibración puede ser, por ejemplo, el valor eficaz "RMS" (por sus siglas en inglés de Root-mean-square, valor cuadrático medio) de la vibración representada por todo el espectro de frecuencias
- b) establecer la cifra de interés L para que sea el nivel total de vibración,
- c) extraer, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, picos que no son conocidos en el sentido de que no corresponden a ninguna de las frecuencias específicas de un fenómeno relativas a los fenómenos en consideración,
- 35 d) añadir, a la cifra de interés L, un valor que depende del número de picos no conocidos,
- e) para cada pico desconocido, añadir, a la cifra de interés L, un valor que depende de la relación de ese pico desconocido y el nivel de vibraciones de fondo predominante en el dominio de la frecuencia en el entorno de ese pico desconocido, en el que el nivel de vibraciones de fondo puede formarse filtrando las amplitudes sobre la frecuencia con un filtro promedio de ventana deslizante, con un filtro medio de ventana deslizante o utilizando algún otro procedimiento matemático, y
- 40 f) para cada fenómeno en consideración, añadir, a la cifra de interés L, un valor que depende del indicador de probabilidad de ocurrencia relativo a ese fenómeno.

La cifra de interés L es un número único que puede utilizarse, por ejemplo, para indicar si el espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas merece o no prestarle más atención.

En un sistema de acuerdo con una realización de la invención, el equipo de procesamiento 101 está configurado para comparar la cifra de interés L con una cifra de interés de Aprendizaje formada previamente para la misma caja de engranajes para derivar información sobre la tendencia de la cifra de interés. La comparación puede realizarse, por ejemplo, calculando la diferencia de las cifras de interés que se están comparando, calculando una relación de las cifras de interés que se están comparando o utilizando algún otro procedimiento matemático adecuado. Las figuras de interés que corresponden a diferentes instantes de tiempo también pueden presentarse como una curva en una pantalla de visualización para permitir que un operario supervise la evolución de la cifra de interés.

En un sistema de acuerdo con una realización de la invención, el equipo de procesamiento 101 está configurado para comparar la cifra de interés L con una cifra de interés L_{otra} correspondiente formada para otra caja de engranajes que es idéntica y opera en condiciones similares para derivar información sobre las diferencias entre la caja de engranajes y la otra caja de engranajes.

- 5 Con el fin de proporcionar un ejemplo, se consideran algunos fallos que pueden producirse en un rodamiento de bolas mostrado en la figura 2a. Se asume que el anillo externo del rodamiento es estacionario y que el anillo interno rota f_R revoluciones por segundo. Cuando hay un fallo en la trayectoria externa de rodadura 211 del rodamiento, se puede calcular una estimación de la frecuencia de la vibración provocada por este fallo con la siguiente ecuación conocida:

$$f_{\text{externa}} = \frac{n}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_R, \quad (2)$$

- 10 en la que n es el número de bolas del rodamiento, D es la distancia entre los puntos medios de las bolas en lados opuestos del rodamiento, tal y como se ilustra en la figura 2a, d es el diámetro de las bolas, tal y como se ilustra en la figura 2a, y α es el ángulo de contacto de las bolas, tal y como se ilustra en la sección transversal A-A mostrada en la figura 2a.

- 15 Cuando hay un fallo en la trayectoria interna de rodadura 212 del rodamiento, se puede calcular una estimación de la frecuencia de la vibración provocada por este fallo con la siguiente ecuación conocida:

$$f_{\text{interna}} = \frac{n}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_R. \quad (3)$$

Cuando hay un fallo en una bola 210 del rodamiento, se puede calcular una estimación de la frecuencia de la vibración provocada por este fallo con la siguiente ecuación conocida:

$$f_{\text{bola}} = \frac{D}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right) f_R. \quad (4)$$

- 20 Cuando hay un fallo en el soporte 213 de las bolas del rodamiento, se puede calcular una estimación de la frecuencia de la vibración provocada por este fallo con la siguiente ecuación conocida:

$$f_{\text{soporte}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_R. \quad (5)$$

- La figura 2b muestra una ilustración esquemática de un espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas cuando hay un fallo en un rodamiento. La frecuencia f_{fallo} mostrada en la figura 2b puede ser, por ejemplo, una de las frecuencias: f_{externa}, f_{interna}, f_{bola} o f_{soporte} mencionadas anteriormente. En el espectro de frecuencias, el pico 220 representa la componente fundamental de la vibración provocada por el fallo del cojinete y los picos 221 y 222 representan el segundo y el tercer armónico de la componente fundamental de vibración, respectivamente. Los picos 223, 224, 225 y 226 son picos laterales de la componente fundamental de vibración. Los picos laterales 223-226 están provocados por una intermodulación entre la componente fundamental de vibración y las vibraciones a la frecuencia f_R que representa la velocidad de rotación. Por otro lado, el espectro de frecuencias contiene un pico en la frecuencia f_R y en sus armónicos, así como una vibración de fondo 227. Un fenómeno que representa el fallo de rodamiento puede definirse, por ejemplo, con las frecuencias de los picos 220-222, es decir f_{fallo}, 2f_{fallo} y 3f_{fallo}, y con los valores de referencia de las amplitudes de estos picos. En algunos casos, también las frecuencias de algunos de los picos laterales, es decir, f_{fallo} ± número entero × f_R, y los valores de referencia de las amplitudes correspondientes pueden incluirse en la definición del fallo del rodamiento. El fallo del rodamiento puede detectarse con mayor fiabilidad y/o puede formarse un indicador de la fiabilidad de la detección cuando se detecta el fallo del rodamiento basándose en muchos picos en lugar de inspeccionar solo la existencia y amplitud del pico en f_{fallo}.

- Con el fin de proporcionar otro ejemplo, la figura 2b muestra una ilustración esquemática de un espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas cuando el diente de una rueda dentada se ha desgastado. Los dientes gastados provocan un aumento del pico 230 en la frecuencia de engranado f_{GM} de las ruedas dentadas y en los picos laterales 231 y 232 que están provocados por una intermodulación entre la componente de la frecuencia de engranado y las vibraciones correspondientes a la velocidad de rotación de la rueda dentada de entrada o salida. Por otro lado, la vibración provocada por las ruedas dentadas desgastadas puede despertar vibraciones de resonancia en la rueda dentada de salida y/o en otras estructuras mecánicas de la caja de engranajes. En el espectro de frecuencias mostrado en la figura 2b, el pico 235 representa la vibración de resonancia. El pico 235 puede tener picos laterales 236 y 237 provocados por la intermodulación entre la vibración de resonancia y las vibraciones correspondientes a la velocidad de rotación de la rueda dentada de entrada o de salida.

- En un sistema de acuerdo con una realización de la invención, el equipo de procesamiento 101 está configurado para comparar la forma del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas con una forma previamente almacenada que es indicativa de falta de fiabilidad en la medición del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas. La forma del espectro de frecuencias puede compararse con la forma previamente almacenada, por ejemplo, de la siguiente manera. El espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas se presenta como un vector N-dimensional **s** de manera

que el $i^{\text{ésimo}}$ elemento de \mathbf{s} es la amplitud en el punto de la $i^{\text{ésima}}$ frecuencia, en el que $i = 1, \dots, N$. Por consiguiente, la forma previamente almacenada se presenta como un vector N -dimensional \mathbf{p} de manera que el $i^{\text{ésimo}}$ elemento de \mathbf{p} es la amplitud correspondiente a la forma previamente almacenada en el punto de la $i^{\text{ésima}}$ frecuencia. A continuación, se determina un parámetro β de manera que se minimice una norma vectorial del vector de diferencia $\mathbf{s} - \beta\mathbf{p}$. La norma vectorial puede ser, por ejemplo, la norma cuadrática $\sqrt{[(\mathbf{s} - \beta\mathbf{p})^T(\mathbf{s} - \beta\mathbf{p})]}$ que se conoce a partir de unas matemáticas básicas. Se puede utilizar el valor minimizado de la norma vectorial como indicador de lo cerca que la forma del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas está de la forma previamente almacenada. Cabe destacar que el procedimiento matemático presentado anteriormente es tan solo un único ejemplo y que puede haber muchos otros procedimientos matemáticos que se pueden utilizar para comparar la forma del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas con la forma previamente almacenada.

La forma previamente almacenada puede ser, por ejemplo, tal que representa el denominado fenómeno de "pista de esquí" que típicamente se produce cuando hay problemas con un sensor de vibración y/o el sensor de vibraciones está sujeto a vibraciones mecánicas tan fuertes que no es capaz de producir resultados de medición fiables. El fenómeno de la "pista de esquí" está caracterizado porque la amplitud es fuerte a bajas frecuencias y la amplitud disminuye pronunciadamente con el aumento de la frecuencia a bajas frecuencias y despacio a frecuencias más altas. La figura 2d ilustra la forma del espectro de frecuencias cuando tiene lugar el fenómeno "pista de esquí".

La figura 3 ilustra un parque eólico 300 provisto de un sistema de acuerdo con una realización de la invención para supervisar las condiciones de las cajas de engranajes del parque eólico. Las cajas de engranajes están situadas en las góndolas 340, 341, 342, 343 y 344 de las estaciones de energía eólica del parque eólico. Las cajas de engranajes están provistas de sensores de vibración para medir vibraciones mecánicas de las cajas de engranajes. El sistema de supervisión de las condiciones de las cajas de engranajes comprende un equipo de procesamiento 301 que está configurado para recibir datos que contienen información de espectros de frecuencias de vibraciones mecánicas medidas en las cajas de engranajes. El equipo de procesamiento 301 está configurado para buscar, a partir de cada espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, picos en frecuencias tales que se corresponden a los fenómenos en consideración. Cada uno de los fenómenos está definido con al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno y con valores de referencia de amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno. El equipo de procesamiento 301 está configurado para formar, para cada fenómeno en consideración, un indicador de probabilidad de ocurrencia basándose en a) amplitudes de los picos buscados relativos a ese fenómeno y b) los valores de referencia de las amplitudes.

Todas las cajas de engranajes del parque eólico 300 no son necesariamente similares entre sí. En un sistema de acuerdo con una realización de la invención, el equipo de procesamiento 301 está configurado para seleccionar, a partir de una biblioteca de fenómenos que contiene datos relativos a varios tipos de cajas de engranajes, un subconjunto de los datos que son relativos a la caja de engranajes en consideración. El subconjunto de datos seleccionados contiene las frecuencias específicas de un fenómeno y los valores de referencia de amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno para una caja de engranajes en consideración. La biblioteca de fenómenos puede almacenarse en un dispositivo de memoria externa 302 o el propio dispositivo de procesamiento puede comprender una cantidad suficiente de memoria para almacenar la biblioteca de fenómenos.

En un sistema de acuerdo con una realización de la invención, el equipo de procesamiento 301 está configurado para comparar el indicador de probabilidad de ocurrencia con un indicador de probabilidad de ocurrencia correspondiente formado previamente y en condiciones similares para la misma caja de engranajes para derivar información sobre una tendencia del fenómeno relativo al indicador de probabilidad de ocurrencia. La información sobre la tendencia puede utilizarse para detectar la presencia de posibles fallos en una fase incipiente de desarrollo.

En un sistema de acuerdo con una realización de la invención, el equipo de procesamiento 301 está configurado para comparar el indicador de probabilidad de ocurrencia con un indicador de probabilidad de ocurrencia correspondiente formado para otra caja de engranajes que es idéntica y opera en condiciones similares para derivar información sobre las diferencias entre la caja de engranajes y la otra caja de engranajes. La información de diferencia puede utilizarse para detectar la presencia de posibles fallos en una fase incipiente de desarrollo.

La figura 4 muestra un diagrama de flujo de un procedimiento de acuerdo con una realización de la invención con el fin de supervisar las condiciones de unas cajas de engranajes. El procedimiento comprende:

- acción 401: recibir datos que contienen información de al menos un espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas medidas en al menos una caja de engranajes,
- acción 402: buscar, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, al menos dos picos de frecuencias tales que corresponden a un fenómeno definido con al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno y con valores de referencia de amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno, y
- acción 403: formar un indicador de probabilidad de ocurrencia para el fenómeno basándose en a) amplitudes de los picos buscados y b) los valores de referencia de las amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno.

Un procedimiento de acuerdo con una realización de la invención comprende:

- buscar, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, picos en al menos dos conjuntos de frecuencias tales que corresponden a dos o más fenómenos, estando cada uno de los mismos definido con al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno y con valores de referencia de amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno, y
- 5 - formar, para cada uno de los al menos dos fenómenos, el indicador de probabilidad de ocurrencia basándose en a) amplitudes de los picos buscados correspondientes a ese fenómeno y b) los valores de referencia de las amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno.

10 Cada fenómeno en consideración puede ser, por ejemplo, un desequilibrio estático, un desequilibrio dinámico, un error de alineación angular, un error de alineación radial, un fallo en la trayectoria externa de rodadura de un rodamiento, un fallo en la trayectoria interna de rodadura de un rodamiento, un fallo en un elemento de rodadura de un rodamiento, un fallo en el soporte de los elementos de rodadura de un rodamiento, una resonancia mecánica, un fallo en los dientes de una rueda dentada o un ajuste con holgura.

15 Un programa informático de acuerdo con una realización de la invención comprende módulos de software con el fin de supervisar las condiciones de unas cajas de engranajes. Los módulos de software comprenden instrucciones ejecutables por ordenador para controlar un procesador programable para:

- recibir datos que contienen información de al menos un espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas medidas en al menos una caja de engranajes,
 - buscar, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, al menos dos picos de frecuencias tales que corresponden a un fenómeno definido con al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno y con valores de referencia de amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno, y
 - formar un indicador de probabilidad de ocurrencia para el fenómeno basándose en a) amplitudes de los picos buscados y b) los valores de referencia de las amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno.
- 20

Los módulos de software pueden ser, por ejemplo, subrutinas y funciones generadas con un lenguaje de programación adecuado.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema que comprende un equipo de procesamiento (101, 301) configurado para recibir datos que contienen información de al menos un espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas medidas en al menos una caja de engranajes, **caracterizado porque:**
 - 5 - el sistema comprende una memoria configurada para almacenar datos indicativos de al menos dos frecuencias predeterminadas específicas de un fenómeno y valores de referencia de amplitudes relativas a las frecuencias predeterminadas específicas de un fenómeno,
 - el equipo de procesamiento está configurado para buscar, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, al menos dos picos en frecuencias tales que corresponden a un fenómeno definido con las al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno y con los valores de referencia de las amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno, y
 - 10 - el equipo de procesamiento está configurado para formar un indicador de probabilidad de ocurrencia para el fenómeno basándose en a) amplitudes de los picos buscados y b) los valores de referencia de las amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno.
- 15 2. Un sistema de acuerdo con la reivindicación 1, en el que:
 - el equipo de procesamiento está configurado para buscar, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, picos en al menos dos conjuntos de frecuencias tales que corresponden a dos o más fenómenos, estando cada uno de los mismos definido con al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno y con valores de referencia de amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno, y
 - 20 - el equipo de procesamiento está configurado para formar, para cada uno de los al menos dos fenómenos, el indicador de probabilidad de ocurrencia basándose en a) amplitudes de los picos buscados correspondientes a ese fenómeno y b) los valores de referencia de las amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno.
- 25 3. Un sistema de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que el equipo de procesamiento está configurado para disponer las frecuencias específicas de un fenómeno y el espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas para que se correspondan entre sí con la ayuda de una velocidad de rotación predominante en la caja de engranajes durante la medición del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas y una velocidad de rotación de referencia relativa a las frecuencias específicas de un fenómeno.
- 30 4. Un sistema de acuerdo con la reivindicación 3, en el que el equipo de procesamiento está configurado para convertir las frecuencias específicas de un fenómeno para que se correspondan con el espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas multiplicando un primer subconjunto de las frecuencias específicas de un fenómeno con una relación de la velocidad de rotación y la velocidad de rotación de referencia, siendo el primer subconjunto de las frecuencias específicas de un fenómeno unas frecuencias que son proporcionales a la velocidad de rotación y siendo al menos parte del resto de las frecuencias específicas de un fenómeno unas frecuencias de resonancias mecánicas.
- 35 5. Un sistema de acuerdo con la reivindicación 3, en el que el equipo de procesamiento está configurado para convertir el espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas para que se corresponda con las frecuencias específicas de un fenómeno multiplicando un primer subconjunto de frecuencias del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas con una relación de velocidad de rotación de referencia y la velocidad de rotación, siendo el primer subconjunto de las frecuencias del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas unas frecuencias que son proporcionales a la
- 40 velocidad de rotación y siendo al menos parte del resto de las frecuencias del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas unas frecuencias de resonancias mecánicas.
- 45 6. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-5, en el que el equipo de procesamiento está configurado para seleccionar, a partir de una biblioteca de fenómenos que contiene datos relativos a varios tipos de cajas de engranajes, un subconjunto de los datos que son relativos a la caja de engranajes en consideración, conteniendo el subconjunto de los datos las frecuencias específicas de un fenómeno y los valores de referencia de amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno.
7. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-6, en el que:
 - el equipo de procesamiento está configurado para seleccionar una banda de frecuencias que cubre las
 - 50 frecuencias específicas de un fenómeno relativas al fenómeno en consideración,
 - el equipo de procesamiento está configurado para formar una señal en el dominio de tiempo que se corresponde a una parte del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas que pertenece a la banda de frecuencias seleccionada,
 - el equipo de procesamiento está configurado para rectificar la señal en el dominio de tiempo,
 - el equipo de procesamiento está configurado para convertir la señal en el dominio de tiempo rectificadas en el
 - 55 dominio de frecuencia para formar un espectro de frecuencias auxiliar, y
 - el equipo de procesamiento está configurado para buscar los al menos dos picos a partir del espectro de frecuencias auxiliar.

8. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-7, en el que el equipo de procesamiento está configurado para comparar la forma del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas con una forma previamente almacenada que es indicativa de falta de fiabilidad en la medición del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas.

5 9. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 3-5, en el que el equipo de procesamiento está configurado para recibir una velocidad de rotación medida de la caja de engranajes, representando la velocidad de rotación medida la velocidad de rotación relativa al espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas.

10. Un sistema de acuerdo con la reivindicación 9, en el que:

- 10 - el equipo de procesamiento está configurado para buscar, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, un pico de referencia cuya frecuencia es un número entero o racional conocido multiplicado por la velocidad de rotación de la caja de engranajes, y
- el equipo de procesamiento está configurado para corregir la velocidad de rotación relativa al espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas con la ayuda de la frecuencia del pico de referencia y el número entero o racional conocido.

15 11. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-10, en el que el equipo de procesamiento está configurado para formar, para cada fenómeno en consideración, el indicador de probabilidad de ocurrencia de acuerdo con la ecuación:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N \min \left\{ \frac{A(f_i)}{A_R(f_i)}, 1 \right\}}{N},$$

20 en la que C es el indicador de probabilidad de ocurrencia, f_i es la frecuencia del i-ésimo pico buscado, $A(f_i)$ es la amplitud del i-ésimo pico buscado, $A_R(f_i)$ es el valor de referencia de la amplitud relativa a la i-ésima frecuencia específica de un fenómeno y N es el número de frecuencias específicas de un fenómeno.

12. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-11, en el que:

- 25 - el equipo de procesamiento está configurado para calcular un nivel total de vibración a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, siendo el nivel total de vibración indicativo del valor cuadrático medio de las vibraciones mecánicas medidas en la al menos una caja de engranajes,
- el equipo de procesamiento está configurado para establecer una cifra de interés para que sea el nivel total de vibración, siendo la cifra de interés un único número para indicar si el espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas es digno de atención,
- 30 - el equipo de procesamiento está configurado para extraer, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, picos que se producen en frecuencias diferentes a las frecuencias correspondientes a las frecuencias específicas de un fenómeno,
- el equipo de procesamiento está configurado para añadir, a la cifra de interés, un valor que depende del número de los picos extraídos que se producen a las frecuencias diferentes a las frecuencias correspondientes a las frecuencias específicas de un fenómeno,
- 35 - el equipo de procesamiento está configurado para añadir a la cifra de interés, para cada uno de los picos extraídos, un valor que depende de la relación del pico extraído en consideración y el nivel de vibración de fondo indicativo de un valor cuadrático medio de vibraciones mecánicas que se producen en el dominio de frecuencia en los alrededores del pico extraído en consideración, y
- 40 - el equipo de procesamiento está configurado para añadir a la cifra de interés, para cada fenómeno en consideración, un valor que depende del indicador de la probabilidad de ocurrencia relativa al fenómeno en consideración.

13. Un sistema de acuerdo con la reivindicación 12, en el que el equipo de procesamiento está configurado para comparar la cifra de interés con una cifra de interés formada previamente para la misma caja de engranajes para derivar información sobre una tendencia de la cifra de interés.

45 14. Un sistema de acuerdo con la reivindicación 12 o 13, en el que el equipo de procesamiento está configurado para comparar la cifra de interés con una cifra de interés correspondiente formada para otra caja de engranajes que es idéntica y opera en las mismas condiciones para derivar información sobre las diferencias entre la caja de engranajes y la otra caja de engranajes.

50 15. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-14, en el que el equipamiento de procesamiento está configurado para calcular uno o más de los valores de referencia de amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno basándose en i) un indicador de potencia que es indicativo de la potencia mecánica transferida con la caja de engranajes y ii) datos previamente almacenados que definen los valores de referencia de amplitudes como funciones del indicador de potencia.

16. Un procedimiento que comprende:

- recibir (401) datos que contienen información de al menos un espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas medidas desde al menos una caja de engranajes,

caracterizado porque el procedimiento además comprende:

- 5 - buscar (402), a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, al menos dos picos en frecuencias tales que corresponden a un fenómeno definido con al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno previamente almacenadas y con valores de referencia previamente almacenados de amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno, y
- 10 - formar (403) un indicador de probabilidad de ocurrencia para el fenómeno basándose en a) amplitudes de los picos buscados y b) los valores de referencia de las amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno.

17. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 16 en el que el fenómeno es uno de los siguientes: un desequilibrio estático, un desequilibrio dinámico, un error de alineación angular, un error de alineación radial, un fallo en la trayectoria externa de rodadura de un rodamiento, un fallo en la trayectoria interna de rodadura de un rodamiento, un fallo en un elemento de rodadura de un rodamiento, un fallo en el soporte de los elementos de rodadura de un rodamiento, una resonancia mecánica, un fallo en los dientes de una rueda dentada, un ajuste con holgura.

15

18. Un programa informático que comprende instrucciones ejecutables por ordenador para controlar un procesador programable para:

- recibir datos que contienen información de al menos un espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas medidas en al menos una caja de engranajes,

20 **caracterizado porque** el programa informático además comprende instrucciones ejecutables por ordenador para controlar el procesador programable para:

- 25 - buscar, a partir del espectro de frecuencias de vibraciones mecánicas, al menos dos picos en frecuencias tales que corresponden a un fenómeno definido con al menos dos frecuencias específicas de un fenómeno previamente almacenadas y con valores de referencia previamente almacenados de amplitudes relativas a estas frecuencias específicas de un fenómeno, y
- formar un indicador de probabilidad de ocurrencia para el fenómeno basándose en a) amplitudes de los picos buscados y b) los valores de referencia de las amplitudes relativas a las frecuencias específicas de un fenómeno.

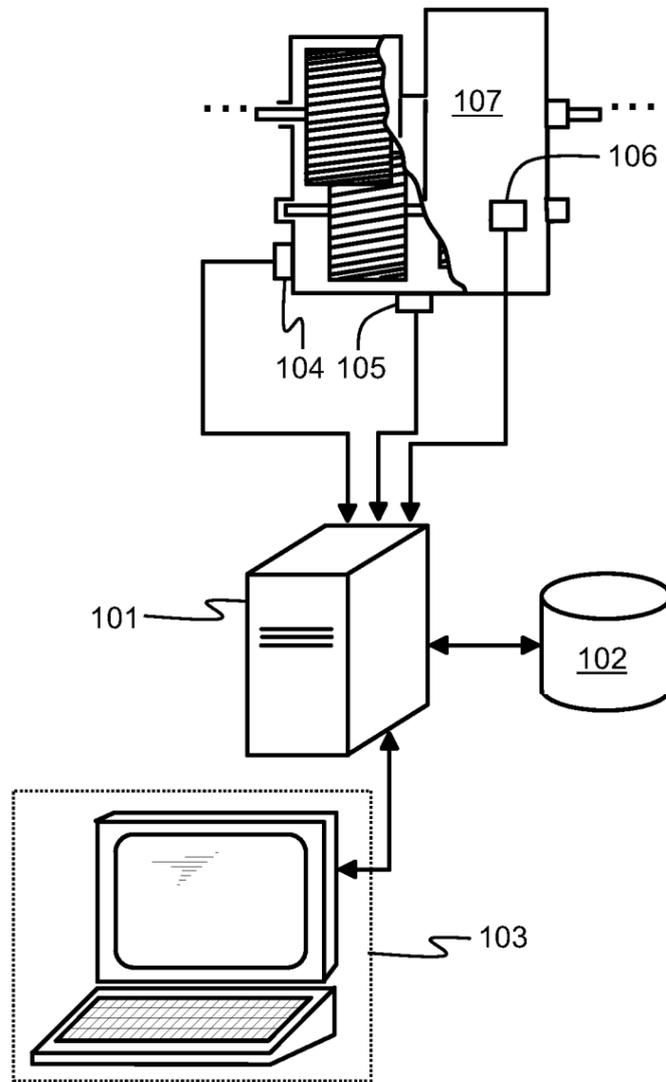


Figura 1

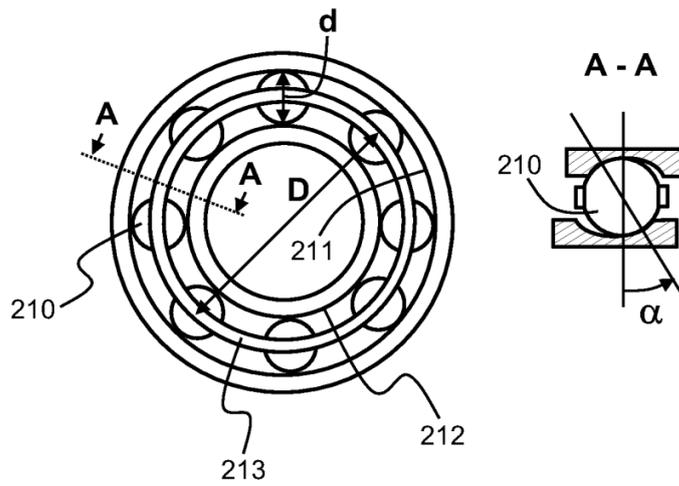


Figura 2a

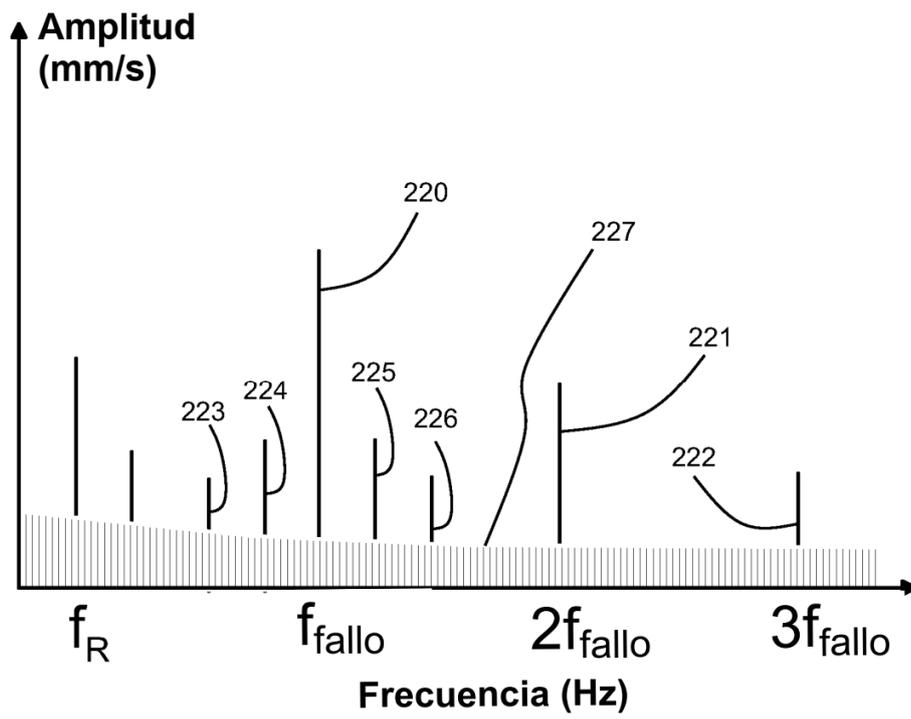


Figura 2b

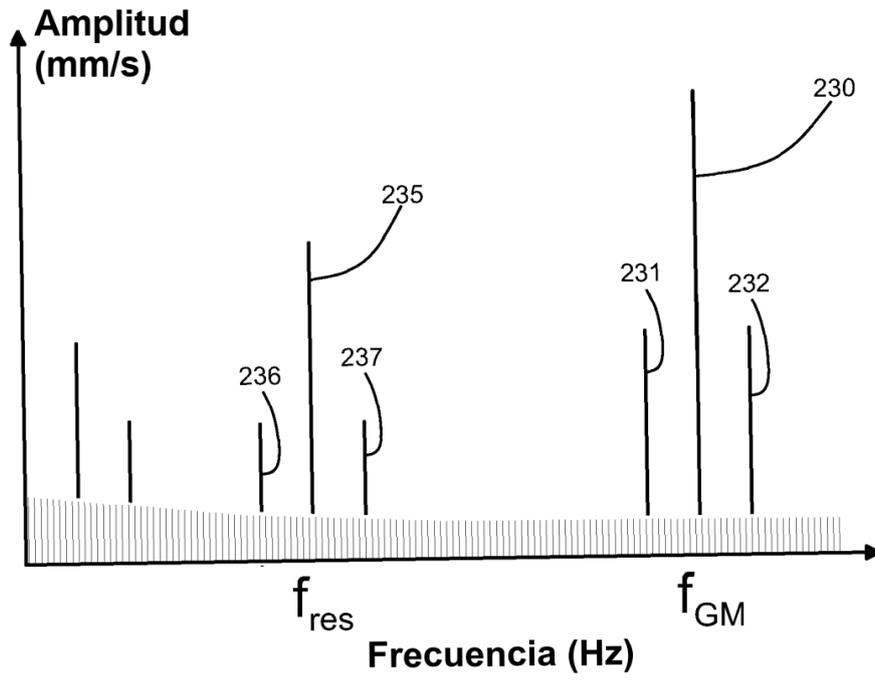


Figura 2c

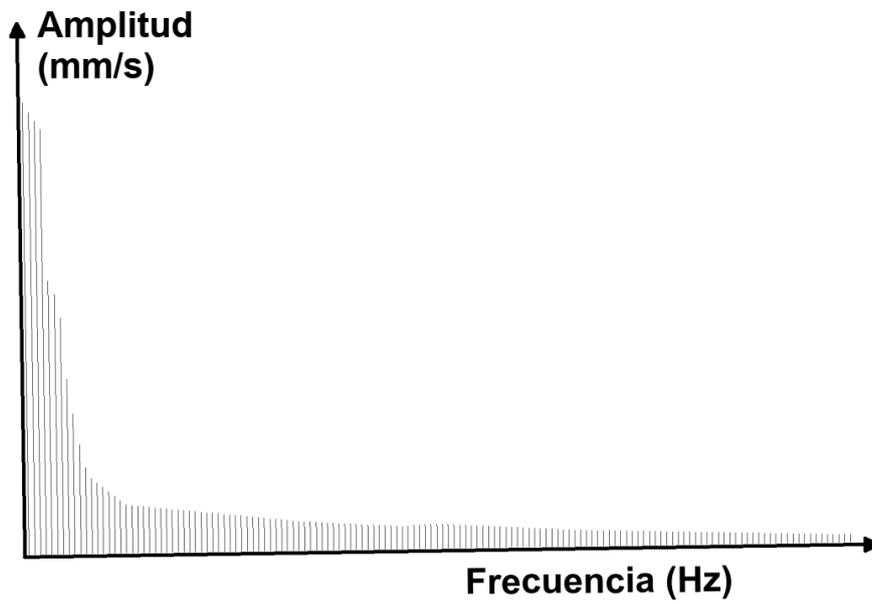


Figura 2d

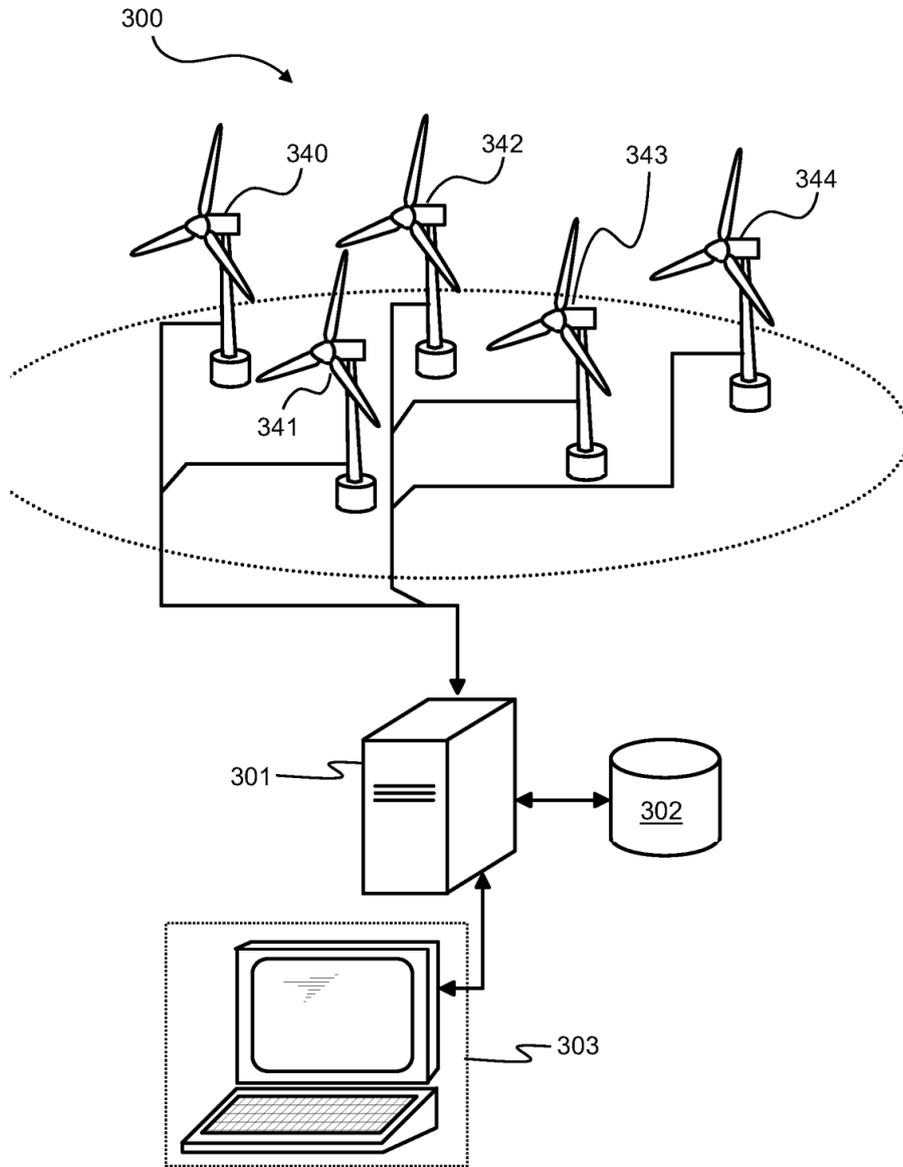


Figura 3

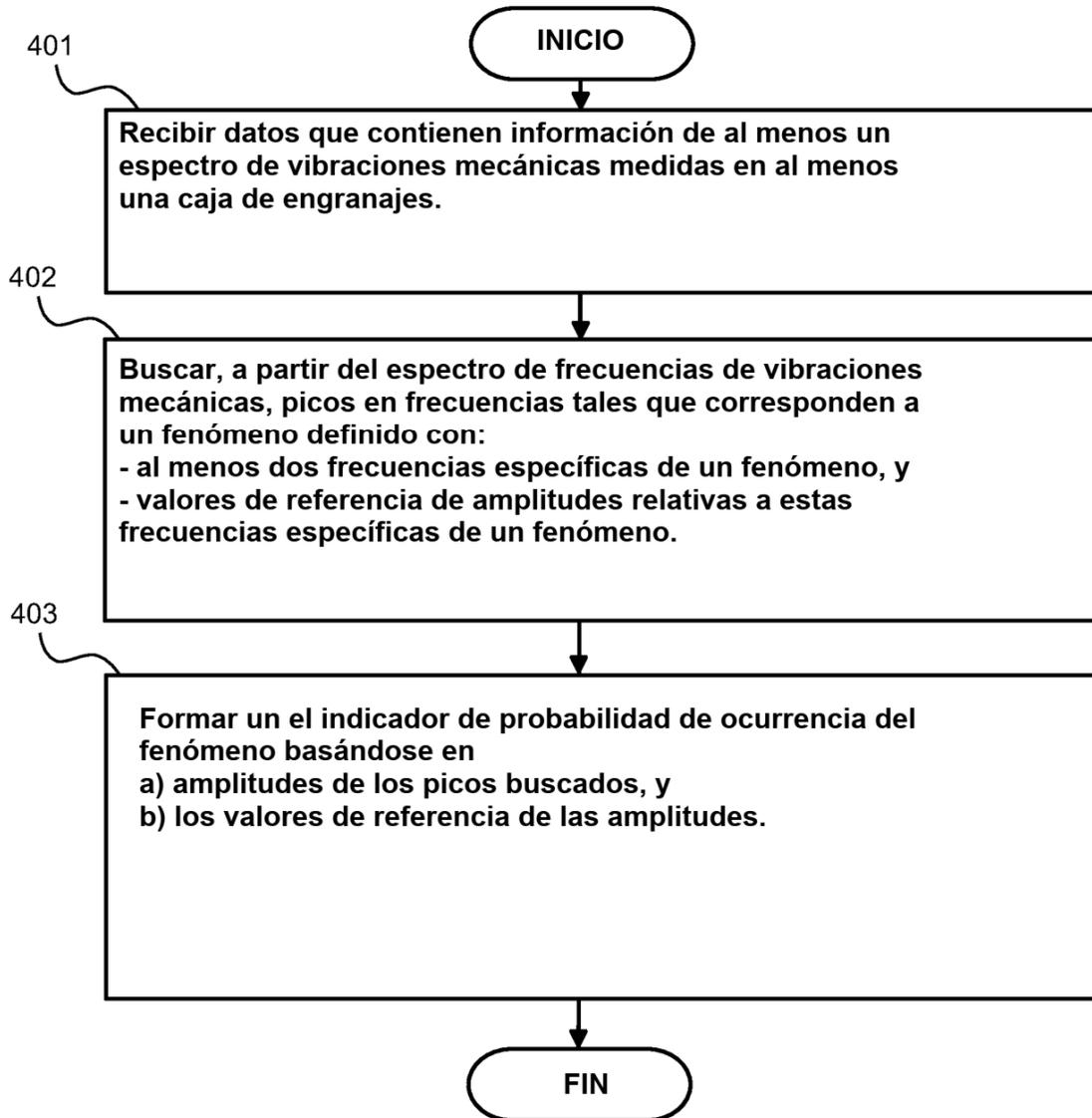


Figura 4