

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 397 084**

51 Int. Cl.:

G01H 1/00

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.02.2010 E 10705625 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.12.2012 EP 2399104**

54 Título: **Método y aparato para el monitorado y análisis de las vibraciones en máquinas rotativas**

30 Prioridad:

18.02.2009 GB 0902730

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

04.03.2013

73 Titular/es:

**OPTIMIZED SYSTEMS AND SOLUTIONS LIMITED
(100.0%)**

**Moor Lane
Derby DE24 8BJ, GB**

72 Inventor/es:

**TARASSENKO, LIONEL;
CLIFTON, DAVID;
KING, DENNIS;
KING, STEVEN y
AULT, DAVID**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 397 084 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

Método y aparato para el monitorado y análisis de las vibraciones en máquinas rotativas.

La presente invención está relacionada con un método y aparato para el monitorado de las vibraciones en máquinas en donde pueden obtenerse espectros de vibraciones acústicas, y en particular para el análisis y monitorado del contenido espectral de tales datos, para facilitar una detección de fallos de forma fiable.

Para el monitorado del rendimiento y funcionamiento de las maquinas rotativas es bien conocido el poder registrar y analizar el espectro de los datos de las vibraciones, utilizando transductores de presión obtenidos utilizando transductores de vibraciones montados en las máquinas. (Véase por ejemplo el documento EP1431727A2. El contenido espectral de los datos de vibración de una máquina rotativa que opera normalmente tiende a ser relativamente estable y por tanto la operación anormal (tal como el desarrollo de fallos) puede reconocerse por un cambio en el espectro, en particular con un cambio significativo en la energía de una o más frecuencias distintas. Típicamente la señal de vibración dependiente del tiempo del transductor se transforma en un espectro de vibraciones utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT), dando lugar a unas series en el tiempo. Tales espectros pueden, por ejemplo, generarse con una velocidad de 5 Hz. Las aplicaciones típicas para dicho monitorado pueden incluir: motores de turbina de gas (por ejemplo, motores de aviones), motores marinos y turbocompresores de grandes buques, taladradoras y demás maquinas y componentes de dichas máquinas en los procesos de fabricación y en los componentes rotativos en los motores de automóviles.

La representación grafica del espectro de las vibraciones con respecto al tiempo da lugar a una representación con respecto al tiempo-frecuencia, y mostrando en la figura 1 un ejemplo de dicha representación gráfica, en este caso para un motor de turbina de gas.

Se observa que una FTT contiene $N_{FFT}=2^n$ rangos de frecuencia que cubren el rango de frecuencias $[0 f_s/2]$, en donde f_s es la velocidad de muestreo en el transductor de vibraciones montado en el armazón, (por ejemplo 10 KHz), una representación gráfica en el tiempo-frecuencia comprende N_{FFT} filas y t columnas, en donde t es el numero de FFT obtenidas (por ejemplo, 5 por segundo para la longitud del funcionamiento del motor). A través de la duración de un vuelo, t típicamente llega a ser muy grande, significando que existe un lote de datos a procesar y que el problema de cálculo del procesado de grandes cantidades de datos es de alto valor.

Contenidos dentro de las representaciones graficas de vibraciones de tiempo-frecuencia se encuentran unos picos en la frecuencia correspondientes a los modos fundamentales y armónicos de vibración de la máquina. El seguimiento de la amplitud de estos picos, representan los componentes espectrales relacionados con las resonancias de las maquinas rotativas, dando lugar a unas series en el tiempo denominadas como "ordenes con seguimiento" (TO), que pueden utilizarse para caracterizar el rendimiento de la máquinas. Estas "ordenes", es decir, los modos de vibración relacionadas con la rotación, pueden tener seguimiento a través del tiempo, conforme se desplazan en el espacio de frecuencias con cambios en la velocidad de rotación. La publicación PCT WO-2004/090486 propone esta utilización para construir un modelo de "comportamiento normal" en los términos de las ordenes con seguimiento. Los valores de las ordenes con seguimiento de los conjuntos de datos de los conjuntos de datos previos se compararon con el modelo de comportamiento observado durante el periodo de entrenamiento con el fin de determinar si son similares o no para este comportamiento "asumido" como anormal", con el objetivo de identificar el deterioro del sistema con antelación al fallo del sistema.

Existen sin embargo muchos modos de fallos que no pueden identificarse por la utilización de modelos de normalidad construidos utilizando órdenes con seguimiento. Las ordenes con seguimiento cubren solo un pequeño sub-rango de frecuencias completas de los espectros de vibración completos, y otros modos de fallos pueden dar lugar a una nueva energía (es decir, energía no observada de dicha parte del espectro de frecuencias en los datos de entrenamiento) apareciendo fuera de este pequeño sub-rango.

Un ejemplo de esto es el fallo de los cojinetes de un motor de turbina de gas. Típicamente utilizan unos pequeños rodamientos a bolas encerradas en armazones fijos tales que puedan rotar libremente con el fin de formar contactos de rodamiento de las cargas entre los distintos ejes del motor rotativo, y para mantener la posición de los ejes entre si. Los daños de las superficies de estos rodamientos pueden dar lugar a una energía de vibración previamente no observada en las altas frecuencias, eliminadas significativamente de las bandas estrechas de frecuencias de las órdenes con seguimiento observadas bajo las condiciones "normales". El fallo de los armazones en los que están montados los rodamientos o cojinetes pueden dar lugar a unos picos constantes en la energía espectral en los múltiplos no vistos previamente de las órdenes fundamentales con seguimiento. Esto último podría describirse como "ordenes nuevas con seguimiento" (NTO) porque son picos en la energía de vibración dentro de las bandas de frecuencia estrechas, y que son por tanto bandas estrechas de frecuencias, pero que tienen lugar en frecuencias con seguimiento, pero que tienen lugar en frecuencias en donde las ordenes con seguimiento no se observan bajo las condiciones "normales".

Con el fin de identificar los NTO y otros contenidos espectrales significativos no observados previamente durante los periodos de entrenamiento de la operación "normal" dentro de las series de tiempos de los espectros, es necesario identificar y desechar los componentes espectrales correspondientes al ruido de fondo. Se ha propuesto

- 5 previamente realizar esto en forma heurística para todos los motores de turbina de gas de una clase similar mediante la definición de un umbral de “ruido-fondo” de la energía espectral (en términos de la amplitud de vibración) por debajo de la cual los componentes espectrales se estiman que son ruido. Con el fin de evitar grandes números de clasificación de falso-positivo durante la detección de las órdenes con seguimiento nuevas, al utilizar este umbral con una clase completa de motores, tiene que ser en forma conservadora debido a la variabilidad inter-motor dentro de dicha clase. No obstante, esto la nueva detección para tener una baja sensibilidad, porque el umbral conservador da lugar a un alto número de clasificaciones falsas-negativas.
- 10 El uso de este umbral de fondo del ruido da lugar también a la incapacidad para determinar los eventos de los motores en forma significativa, que se manifiestan como cambios en la energía espectral para las frecuencias mucho más altas que los primeros pocos armónicos de las ordenes con seguimiento fundamental, las cuales pueden ser una indicación de peligro para los cojinetes o rodamientos, fallos de los rodamientos, y otros eventos que tengan lugar para las frecuencias más altas, porque tienden a tener una amplitud mucho más inferior que la vibración a frecuencias inferiores.
- 15 Otra exposición anterior es la US2004060347, la cual describe un motor de un avión que incluye medios para medir la vibración y la velocidad con el fin de adquirir datos relativos a la velocidad del rotor y también la amplitud y la fase de la vibración del rotor durante un vuelo determinado. El método descrito incluye los datos adquiridos de la lectura; calculando un vector promedio sobre un rango de velocidad del rotor predeterminado sobre la base de los datos adquiridos mencionados; calculando una diferencia vectorial entre el vector de vibración promedio del mencionado vuelo determinado y el vector de vibración promedio de un vuelo de referencia para el mencionado rango de velocidad del rotor; comparando los módulos de la mencionada diferencial vectorial con un valor de umbral predeterminado; y emitiendo una señal de aviso cuando el módulo de la diferencia vectorial exceda al mencionado valor de umbral predeterminado, en donde las etapas ejecutadas después del mencionado vuelo determinado se hayan completado.
- 20 De acuerdo con la presente invención, se proporciona un método de monitorar la amplitud y frecuencia de la vibración en una máquina rotativa, que comprende las etapas de: recepción de las medidas de las vibraciones de amplitud y frecuencia y la velocidad de rotación de la máquina; grabación como puntos de datos de cada medida de la amplitud como una función de la frecuencia de vibración y la velocidad rotacional; almacenar una pluralidad de los umbrales de amplitud distintos, representando cada uno un fondo de ruido para el conjunto respectivo de un primer conjunto de sub-rangos de la frecuencia de vibración y de la velocidad rotacional; comparar cada medida de amplitud con el umbral de amplitud para el sub-rango de la frecuencia de vibración y la velocidad rotacional dentro de la cual pueda encajar; y determinación de la medida que representa el ruido si cae por debajo del umbral, y como un contenido espectral significativo si está por encima del umbral.
- 25 Así pues, con la presente invención, las amplitudes de vibración se graban como una función de la frecuencia y la velocidad de rotación de la máquina, en lugar de la frecuencia y el tiempo. Esta es una forma particularmente excelente de caracterizar el comportamiento de las máquinas rotativas ya que los espectros de vibración varían típicamente como una función (no lineal) de la velocidad de rotación.
- 30 La invención almacena también un umbral de fondo del ruido distinto para cada uno de una pluralidad de sub-rangos de la frecuencia y de la velocidad rotacional. En un ejemplo, el rango de frecuencias completo puede dividirse entre 50 y 100 sub-rangos, y el rango completo rotacional de la velocidad, expresado como un porcentaje de velocidad máxima, que puede dividirse en 20 a 40 sub-rangos (o “bins”) o un umbral de amplitud que representa el fondo de ruido que puede almacenarse para cada sub-rango de velocidad-frecuencia (es decir, cada combinación distinta de un sub-rango de frecuencia con un sub-rango de velocidad). Este uso de los umbrales de fondo del ruido distintos es esencial porque la amplitud del ruido disminuye no linealmente al incrementar la frecuencia. Esto permite que pueda establecerse un fondo de ruido apropiado para cada uno de los sub-rangos de velocidad-frecuencia, significando con ello que para las altas frecuencias el fondo de ruido puede ajustarse a un valor menor que el fondo de ruido para frecuencias menores que permita un contenido espectral significativo para las altas frecuencias, tales como las ordenes con seguimiento correspondientes a los armónicos más altos, para su detección y monitoreado en lugar de perderse por debajo de un fondo de ruido apropiado para las frecuencias menores.
- 35 Preferiblemente, los distintos fondos de ruido para los distintos subrangos de velocidad-frecuencia se establecen en un proceso de entrenamiento, utilizando los puntos de datos de entrenamiento, que consisten en los datos de vibración de uno o más funcionamientos de la máquina rotativa que se hayan estimado como “normales”. Así pues, los datos de entrenamiento en cada sub-rango de velocidad-frecuencia pueden analizarse y poder establecerse un fondo de ruido adecuado.
- 40 Preferiblemente, este análisis comprende el acoplamiento de una distribución de amplitud en los puntos de los datos de la distribución de amplitud, calculando entonces una distribución de valores extremos (EVD) a partir de la distribución de amplitud acoplada, y seleccionando entonces el umbral del ruido de un valor de amplitud que represente una probabilidad en particular de ser un extremo para los datos ajustados con dicha distribución de amplitud. Por ejemplo, utilizando esta técnica es posible encontrar la amplitud que tenga el 99% de probabilidad de ser el valor más alto en cualquier conjunto dado de los puntos seleccionados al azar a partir de dicha distribución, y
- 45
- 50
- 55

ajustando este valor como el umbral del fondo de ruido. Las distintas probabilidades pueden seleccionarse si así se desea, con el fin de caracterizar los niveles de ruido de los sistemas con las características de ruido distintas.

5 En un ejemplo, con aplicación a un motor de turbina de gas, la distribución de amplitudes en cada subrango de velocidad-frecuencia es una distribución Gamma y por tanto la distribución de valores extremos es una distribución Gumbel.

10 Preferiblemente, la distribución de amplitud está acoplada a los puntos de los datos de entrenamiento después de excluir cualesquiera puntos de datos que representen el contenido espectral significativo, por ejemplo, las órdenes con seguimiento. Esto puede conseguirse mediante el acoplamiento de una distribución en amplitud en todos los puntos de datos de entrenamiento dentro del sub-rango de velocidad-frecuencia, excluyendo entonces los puntos de datos subyacentes, por ejemplo, definidos como aquellos que tengan más de tres desviaciones estándar a partir de la distribución de primera acoplada. Los conjuntos de datos compensados sin los puntos de datos excluidos se usan entonces para acoplar de nuevo la distribución de amplitud, y en donde el EVD se calcula a partir de la distribución de amplitud re-acoplada. Esto permite que el EVD se base solo sobre los datos que represente el ruido de fondo, sin que el contenido espectral aparezca por encima del ruido de fondo resultante (el cual puede ser órdenes con seguimiento, o bien con otro contenido espectral significativo).

15 El número y el posicionamiento de los sub-rangos de frecuencia y de velocidad rotacional (referidos como los sub-rangos de velocidad-frecuencia) se establecen preferiblemente en un proceso de entrenamiento tal que se incluya una cantidad suficiente de datos de entrenamiento en cada sub-rango de velocidad-frecuencia.

20 Habiendo obtenido una distribución de valores extremos (EVD) para cada uno de los subrangos de velocidad-frecuencia, que proporciona la probabilidad de que cualquier amplitud de vibración dada sea probablemente de amplitud máxima que podría obtenerse para el ruido de un conjunto de datos obtenidos de dicha distribución, una realización de la invención utiliza esto para el cálculo de un valor nuevo definido como $\log_{10}\{1-P_e(x)\}$. Este nuevo valor es particularmente efectivo al visualizarse para mejorar la visualización del contenido espectral significativo, por ejemplo, las ordenes con seguimiento y eliminando los datos que se correspondan con el ruido de fondo, en lugar de visualizar el tiempo-serie de los espectros. En este último, el contenido espectral significativo de interés pueden apenas ser visible (particularmente a frecuencias más altas), porque es similar al ruido en frecuencias menores. Mediante la visualización de los valores nuevos, tales como el contenido espectral significativo que se resalta, mientras que se atenúa el ruido de fondo.

25 Una realización de la invención permite también la detección y el monitoreo del contenido espectral significativo no presente durante la operación normal de la máquina (con más precisión no presente en los datos de entrenamiento). Estos pueden ser armónicos más altos de las ordenes fundamentales con seguimiento, o el contenido espectral no relacionados con cualquier orden con seguimiento en los datos de entrenamiento.

30 Esto puede conseguirse por la definición durante un proceso de entrenamiento con sub-rangos de velocidad-frecuencia que se corresponden a ordenes conocidas con seguimiento, cuyos rangos de velocidad-frecuencia no tienen ninguna orden con seguimiento durante la operación "normal". A continuación si durante la operación de la máquina, una amplitud de vibración significativa aparece en un sub-rango de velocidad-frecuencia distinto al que contiene ordenes conocidas con seguimiento, esto podrá considerarse como un contenido espectral nuevo significativo y se visualizará como una nueva función a partir de la base de una alerta. La denominación de la vibración significativa significa una amplitud de la vibración por encima del fondo del ruido apropiado para dicha velocidad y frecuencia. Puede ser que la alerta pueda aparecer sobre la base de un punto de datos que aparezca como un contenido espectral nuevo significativo (por ejemplo, una nueva orden con seguimiento), es decir, un FFT que contenga datos nuevos, o bien que pueda ser un número preajustado de puntos de datos, opcionalmente en sucesión o al menos cercanos en el tiempo, que serán precisos antes de considerarlos como un contenido espectral significativo nuevo.

35 40 45 Se observará que la dimensión y el número de sub-rangos de velocidad-frecuencia para la detección de las ordenes con seguimiento conocidas y el contenido espectral significativo no necesitan ser los mismos conforme el tamaño y posicionamiento del sub-rango de velocidad-frecuencia utilizado para el cálculo del fondo de ruido. Es posible para los sub-rangos de velocidad-frecuencia que pueda detectarse la orden con seguimiento y el contenido espectral nuevo para que sea mayor o menor que los sub-rangos de velocidad-frecuencia utilizados para el cálculo del fondo de ruido.

40 45 50 55 Preferiblemente las ordenes conocidas con seguimiento se definen como los sub-rangos de velocidad-frecuencia que incluyen mas de un número preajustado de puntos de datos de vibración por encima del fondo de ruido en un conjunto de datos de entrenamiento que representen la operación "normal" de la máquina (es decir, teniendo normalmente un contenido espectral significativo por encima del ruido de fondo). El número preestablecido de datos significativos, y también el número y tamaño de los sub-rangos de velocidad-frecuencia, pueden establecerse por la comparación del comportamiento del método en un conjunto de datos normales y en un conjunto de datos anormales (es decir, un conjunto de puntos de datos conocidos que sean indicativos de un comportamiento "anormal"). Mediante el establecimiento del número preajustado de datos significativos y el número y tamaño de

sub-rangos en forma apropiada en aquellos sub-rangos que contengan los puntos de datos anormales que se considerarán como un contenido espectral nuevo significativo.

5 La invención se extiende a un aparato para monitorizar la amplitud y frecuencia de la vibración de una maquina rotativa, operando el aparato de acuerdo con el método descrito anteriormente. Dicho aparato puede ser una parte del sistema de control para la maquina rotativa.

El método puede realizarse en un software ejecutable en un ordenador o bien otro sistema que tenga una capacidad de proceso de datos.

La invención se describirá además a modo de ejemplos con referencia a los dibujos adjuntos, en donde:

10 La figura 1 es una representación grafica convencional en el tiempo y frecuencia del espectro de vibración con respecto al tiempo;

La figura 2 ilustra una representación basado en la velocidad de los datos de vibración espectral de acuerdo con una realización de la invención;

La figura 3 es una representación logarítmica de la amplitud de la vibración con respecto a la frecuencia:

15 La figura 4 es un diagrama de flujo que explica el ajuste del fondo de ruido en relacion con los datos de la vibración de acuerdo con una realización de la invención;

La figura 5(a) y (b) ilustran las partes de un histograma de los datos de vibración y acoplos de una distribución Gamma;

La figura 6 ilustra los procesos Gamma y Gumbel acumulativos que se acoplan al histograma de la figura 5 de acuerdo con una realización de la invención;

20 Las figuras 7(a) a (d) ilustra el ajuste del fondo de ruido a dos sub-rangos distintos de velocidad-frecuencia, de acuerdo con una realización de la invención;

La figura 8 es un diagrama de flujo que explica el monitorado de los datos de la vibración de acuerdo con una realización de la invención;

25 La figura 9 es un diagrama de flujo que explica el cálculo de los valores nuevos de acuerdo con una realización de la invención;

Las figuras 10(a) a (c) ilustran la amplitud de vibración logarítmica, y la correspondiente probabilidad y los valores nuevos calculados para una muestra temporal de los datos de vibración de acuerdo con una realización de la invención;

30 La figura 11 es un diagrama de flujo que explica el entrenamiento del modelo para las órdenes con seguimiento conocidas y el contenido espectral significativo nuevo de acuerdo con una realización de la invención;

Las figuras 12(a) a (d) ilustran los efectos en la sensibilidad de las distintas cuantificaciones del espacio de velocidad y frecuencia;

35 Las figuras 13(a) y (b) ilustran los datos de vibración y la detección de acuerdo con una realización de la invención del contenido espectral nuevo representativo del armazón del cojinete o rodamiento en los fallos en un motor de turbina de gas; y

Las figuras 14(a) y (b) ilustran los datos de vibración y la detección de acuerdo con una realización de la invención del nuevo contenido espectral representativo del daño en los cojinetes o rodamientos en un motor de turbina de gas.

40 La figura 2 ilustra una representación basada en la velocidad de los datos de vibración espectral de acuerdo con una realización de la invención en donde las medidas de amplitud del sensor de vibración se registran como una función de la frecuencia de vibración y la velocidad de rotación. En la figura 2 la amplitud media de vibración en cada uno de los sub-rangos $f_i = 1 \dots N_{FFT}$ (en este caso, $N_{FFT} = 1024$) recogidos en sub-rangos del 1% de la velocidad del eje w_{LP} , a partir de un funcionamiento de un motor de turbina de gas durante un solo vuelo que así representado, en donde la amplitud de vibración promedio está representada por el nivel gris de los datos representados con amplitudes más altas y más cercanas al negro. Esta ilustración muestra también el espacio de velocidad-frecuencia que está dividido en 10×10 sub-rangos de velocidad-frecuencia.

45 La energía asociada con las ordenes con seguimiento fundamental en el decil más inferior del rango de frecuencias, a partir de las velocidades del eje entre el 15% y el 85% del máximo (se observará que el motor está al ralenti cuando $w_{LP} < 30\%$). La energía asociada con las ordenes con seguimiento del segundo armónico aparece en el segundo decil del rango de frecuencias (aunque para amplitudes menores que las ordenes con seguimiento fundamental), mientras que puede verse un único armónico de alta energía alrededor del sub-rango espectral f_{220}

entre el 20% y el 50% de la velocidad del eje. La energía de baja amplitud puede verse que aparece entre el 60% y el 80% de la velocidad del eje, entre los sub-rangos espectrales f_{600} y f_{800} .

La grabación de los datos espectrales como una función de la velocidad comprime realmente la información haciendo que sea más fácil el poder analizar y visualizar los mismos. Así mismo, como la amplitud de la vibración es una función no lineal de la velocidad y la frecuencia, esta función no lineal está modelada utilizando distribuciones probabilísticas, de forma tal que el "comportamiento "normal" puede estar caracterizado y permitiendo así la detección del comportamiento "anormal".

Tal como se ha expuesto anteriormente, el análisis de los datos de vibración por los medios de las ordenes con seguimiento es efectivo para las frecuencias menores, pero difícil a altas frecuencias, porque las ordenes con seguimiento adquieren amplitudes de vibración similares a las del ruido. La figura 3 muestra una representación grafica de $-\log_{10}$ de la amplitud de la vibración con respecto a la frecuencia y una representación gráfica en la totalidad del rango de frecuencias para la velocidad del eje de baja presión del 30%, 60% y 90% en un motor de turbina de gas. Las ordenes con seguimiento pueden verse como picos en la amplitud con el resto que es ruido, pero puede verse que no existe relación entre la amplitud del ruido y la frecuencia que permitiría que el ruido fuera tratado utilizando una función simple lineal o bien una función polinómica. De acuerdo con una realización de la presente invención, se toma un conjunto de datos de entrenamiento y se divide en los sub-rangos de velocidad-frecuencia, y el fondo de ruido se calcula para cada uno de los sub-rangos. La forma de hacer esto se explicará más adelante.

En el caso de un motor de un avión (aunque el mismo fenómeno tiene lugar también en otras maquinarias) el motor gasta la mayor parte del tiempo operando al ralenti o a la velocidad de crucero, con periodos relativamente cortos de otras velocidades correspondientes a subidas, zonas planas o bien otras maniobras. Esto significa que existe un gran lote de datos para el ralenti y para las velocidades del motor de crucero y una pequeña cantidad relativa de datos para otras velocidades del motor. Por tanto, la dimensión de los sub-rangos de velocidad-frecuencia utilizados para calcular el fondo del ruido a seleccionar es una cantidad estadísticamente significativa de datos en cada sub-rango. Claramente esto dependerá de la dimensión y naturaleza del conjunto de datos bajo su consideración. En el ejemplo descrito más adelante, utilizando los datos de vibración de una turbina de gas recogidos durante varios vuelos de un avión, la división del rango de velocidades en 20 sub-rangos y el rango de frecuencias en 100 sub rangos, proporcionando así 20 x 100 sub-rangos, proporcionó al menos 100 puntos de datos en cada sub-rango, proporcionando un compromiso adecuado entre la retención de una cuantificación fina del espacio de velocidad-frecuencia con los datos suficientes para calcular el fondo del ruido. (Cada punto de datos tiene tres componentes que son: la amplitud y la frecuencia de uno de los 1024 componentes del FFT, conjuntamente con la velocidad del eje LP (baja presión) en ese tiempo).

Se describirá a continuación la forma del establecimiento de los fondos de ruido de los 20 x 100 subrangos de velocidad-frecuencia, con referencia a diagrama de flujo de la figura 4. El fondo de ruido se fija con referencia a un conjunto de datos de entrenamiento obtenidos haciendo funcionar el motor (o bien otra maquina rotativa) y grabando los datos de vibración y la velocidad del motor tal como se indica en la etapa 501. Tal como es bien conocido en el arte del análisis espectral de los datos de vibración, están sometidos a la Transformada Rápida de Fourier en la etapa 502, de forma que en la etapa 503 se obtienen un conjunto de datos de entrenamiento que comprenden puntos de datos de entrenamiento que tienen los tres componentes de la amplitud, frecuencia y velocidad rotacional de la vibración. Para obtener el fondo del ruido se requiere un conjunto de datos de entrenamiento representativo de la operación normal. Utilizando dicho conjunto de datos de entrenamiento normal, los puntos de datos se combinan en sus sub-rangos respectivos de velocidad-frecuencia en la etapa 506, y para cada uno de los 20 x 100 sub-rangos se construye un histograma para mostrar la distribución de las amplitudes dentro del sub-rango de velocidad-frecuencia. La figura 5 ilustra una parte de dicho histograma, en este caso para el subrango de velocidad 16, sub-rango de frecuencia 5 de un conjunto de datos de entrenamiento que tenga lugar para que contenga una energía asociada con una vibración de orden con seguimiento que no sea visible en la figura 5(a) y (b), ya que es un orden de magnitud más alto en el eje x que los datos ilustrados, es decir significativamente lejos fuera del lado derecho de la ilustración en la escala mostrada en la figura 5(a). Esto puede verse en la figura 5(c), en donde la vibración con seguimiento tiene lugar para $x = 0,14$ pulgadas por segundo. SE observará que el número de datos correspondientes a la vibración de orden con seguimiento es bajo con respecto al número de datos correspondientes al ruido. Así pues, en la figura 5 cada columna del histograma representa el numero de muestras de datos en el sub-rango $b_w=16$, $b_f=5$ con dicha amplitud de la vibración. Un histograma similar se construye para cada uno de los sub-rangos de velocidad-frecuencia de 20 x 100, formando el espacio de velocidad-frecuencia para este conjunto de datos.

La forma del histograma se corresponde a la distribución Gamma, significando que la distribución Gamma es un modelo adecuado para estos datos. El objetivo, no obstante, es modelar en particular el ruido en cada sub-rango de velocidad-frecuencia, en lugar de las ordenes con seguimiento que son componentes espectrales significativos de interés. Puede verse a partir de la figura 5 (a) que el acoplamiento de todos los datos en un sub-rango que contenga una orden con seguimiento no proporciona un acoplo particularmente apto (la distribución Gamma es la línea de trazo continuo) debido a la amplitud significativa en los ordenes con seguimiento a la derecha de la ilustración, tal como se muestra en la figura 5(c), que realiza un sesgado de la distribución para el acoplo de la distribución principal (Gamma) de las amplitudes del ruido. En consecuencia, en la etapa 507 del método se produce un conjunto de datos mediante la exclusión de los puntos de datos correspondientes a las ordenes con seguimiento en dicho sub-

rango. Esto puede conseguirse por el acoplo de una distribución inicial ML (Probabilidad Máxima) de todos los datos en el sub-rango (tal como se ilustra en la figura 5(a)), y calculando la desviación media y estándar de la distribución Gamma. Por tanto, cualesquiera puntos que estén situados en más de las tres desviaciones estándar se excluirán y un nuevo acoplo de una distribución Gamma ML se acoplará con los datos restantes en la etapa 508. El resultado de esto está ilustrado en la figura 5(b) y pudiendo verse que el encaje es mucho mejor para representar el ruido.

Con el fin de fijar un fondo de ruido apropiado (umbral de amplitud) por debajo de los datos que se consideren como ruido, esta realización utiliza estadísticas de valores extremos con el fin de modelar más en forma precisa el extremo de la distribución Gamma en donde existan menos datos. Teniendo en cuenta que el ruido en cada sub-rango está siendo modelado por una distribución Gamma, el objetivo es determinar el valor de amplitud más alto que podría considerarse como ruido (es decir, que se generaría a partir de la distribución Gamma para dicho sub-rango). La distribución de valores extremos (EVD) puede utilizarse para indicar que el valor de amplitud máximo probablemente que se obtendría para el ruido. La distribución de valores extremos calculada a partir de la distribución Gamma para el histograma de la figura 5 se ilustra en la figura 6. La línea $p_e(x)$ es la distribución de los valores extremos lo cual es un valor EVD Gumbel clásico. La línea $P_e(x)$ ilustra la probabilidad acumulativa calculada a partir del Gumbel EVD clásico. Así pues, haciendo referencia al eje vertical derecho de la figura 6 y el Gumbel acumulativo $P_e(x)$ es posible encontrar cual es el valor de la amplitud que tenga cualquier probabilidad deseada de poder ser el valor extremo de los datos con esta distribución.

Así pues, la etapa 509 del método incluye el cálculo del valor de la amplitud de la vibración correspondiente a la probabilidad deseada para el fondo del ruido. Las figuras 7(a) a (d) ilustran el umbral del fondo del ruido para cada uno de dos sub-rangos de velocidad-frecuencia con el conjunto del umbral como la amplitud de vibración que tiene la probabilidad $P_e(x) = 0,99$ del Gumbel acumulativo para dicho sub-rango. La figura 7(a) corresponde a los datos de un sub-rango de velocidad 8, sub-rango de frecuencia 5, que contiene una orden con seguimiento mientras que la figura 7(b) ilustra los datos para el sub-rango 40 que no contiene una orden con seguimiento. Se observará que las amplitudes de vibración sobre el eje horizontal de la figura 7(b) son un orden de magnitud inferior a los de la figura 7(a) (porque este sub-rango no contiene ordenes con seguimiento). Las figuras 7(c) y 7 (d) muestran los mismos datos utilizando la expresión $\log_{10}y$ -eje, que permiten que se vea el extremo de las amplitudes de distribución y vibración para la sub-orden que contenga la energía de la orden con seguimiento de la figura 7(c), que se extiende bien por encima del umbral del fondo de ruido, mientras que la distribución para la ventana que no contenga energía del orden con seguimiento, mostrada en la figura 7(d), en donde todos los datos se estiman como ruido de fondo. Los umbrales del fondo del ruido marcados en la figura 7 son de 0,36 mm por segundo para el sub-rango del orden con seguimiento y 0,084 mm por segundo para el sub-rango de orden sin seguimiento.

Este proceso se repite en la etapa 511 y de esta forma el umbral del fondo de ruido se fija para cada uno de los sub-rangos, representando un sub-rango de frecuencia y velocidad en el espacio de velocidad-frecuencia.

Habiendo establecido un umbral de amplitud de fondo del ruido para cada parte del espacio de velocidad-frecuencia, estos pueden utilizarse al monitorar el rendimiento del motor en la determinación de si cada muestra entrante representa un ruido o bien un componente espectral significativo tal como una orden con seguimiento, nueva orden con seguimiento, o bien otro contenido espectral significativo. La figura 8 ilustra dicho proceso de monitorado. En la etapa 901 se reciben los datos de vibración de un sensor de vibraciones y una señal de velocidad del motor, y en la etapa 902 los datos de vibración son Transformadas Rápidas de Fourier. Para obtener la amplitud de la vibración en función de la frecuencia. En la etapa 903 cada medida de la amplitud se almacena como un punto de datos de la frecuencia y la velocidad del eje LP del motor. Para cada punto de datos su amplitud de vibración se compara entonces en la etapa 905 con el fondo de ruido apropiado para el sub-rango de velocidad-frecuencia. Si la amplitud de la vibración es menor que el fondo de ruido puede estimarse ruido en la etapa 906, pero si es mayor o igual que el umbral ello representará un contenido espectral significativo.

En esta realización para cada punto de datos que represente una amplitud de vibración observada, se calculará una marcación nueva y que se visualizará en la etapa 907. La figura 9 ilustra la forma en que la marcación nueva se calculará. La marcación nueva $z(x)$ es una cantidad que incrementa con la probabilidad de que x no es ruido; es decir, que x corresponde al contenido espectral significativo. Un ejemplo de dicho índice puede definirse como:

$$z(x) = -\log_{10}\{1-P_e(x)\}$$

Así pues, para cada punto de datos, la amplitud x se compara con el acumulativo EVD $P_e(x)$ (del cual se ilustra uno en la figura 6) para leerse en la etapa 102 la probabilidad correspondiente $P_e(x)$ en donde el valor extremo es menor que esto. La marcación nueva se calcula entonces a partir de este valor de la probabilidad. La figura 10 ilustra la relación entre la amplitud de la variación, probabilidad $P_e(x)$, y la novedad $z(x)$ para los datos espectrales en el instante $T=680$ para los datos de entrenamiento utilizados previamente.

La figura 10(a) ilustra la amplitud logarítmica, y puede verse que solo las fundamentales de la baja presión, presión intermedia y los ejes de alta presión pueden verse conjuntamente con dos armónicos del eje de alta presión. No puede distinguirse ningún contenido espectral significativo en la mayoría del rango de frecuencias que se extienden desde el componente f_{120} a f_{1024} .

La figura 10(b) muestra las probabilidades calculadas en la forma anteriormente descrita, utilizando por tanto fondos distintos de ruidos para los distintos rangos de frecuencia, y el acumulativo EVD. La figura 10(c) muestra las marcaciones nuevas correspondientes $z(x)$ calculadas de acuerdo con la fórmula anterior. Puede verse que es posible identificar los armónicos de orden alto a través del rango de frecuencias porque tienen valores de probabilidad nuevos a través del rango de frecuencias, porque tienen valores de probabilidad y novedad mucho mayores que los de los componentes espectrales periféricos que contienen ruido de fondo. Puede verse que incluso el armónico 15 del eje de alta presión puede verse en forma relativa fácil que tiene lugar en el componente espectral f_{950} .

Mediante la utilización de este contenido de información espectral puede extraerse el contenido de información espectral a partir de los datos de vibración. Esto permite un mejor análisis y monitorado del rendimiento de la máquina, haciendo uso de la información que no estaba disponible utilizando las técnicas existentes.

Se mencionó anteriormente que las propuestas actuales de los datos de vibración se enfocaban en el monitorado de las ordenes con seguimiento conocidas. No obstante, algunos modos de fallos se manifiestan en la apariencia repentina de la energía en frecuencias en donde no se había observado antes el contenido espectral significativo. Construyendo sobre el análisis anterior, esta realización de la invención permite que pueda detectarse un nuevo contenido espectral de forma eficiente. Con el fin de conseguir esto, la localización del contenido espectral significativo observado durante el periodo de entrenamiento se registra primeramente mediante la observación de los datos de entrenamiento a partir de uno o más funcionamientos de la máquina que se hayan estimado como normales. Esto proporciona un modelo de normalidad.

Un ejemplo basado en los mismos datos para un motor de turbina de gas tal como el utilizado anteriormente será el que se describe a continuación.

Tal como se ilustra en la figura 11, los datos de entrenamiento para un funcionamiento normal del motor (o con más de un funcionamiento) son los obtenidos en la etapa 1201. Al igual que anteriormente, estos datos son Transformaciones Rápidas de Fourier en la etapa 1202 para obtener en la etapa 1203 puntos de datos con tres valores de amplitud, frecuencia y velocidad del motor. En la etapa 1204, cualesquiera puntos de datos con amplitudes de vibración se estiman como un ruido de fondo (es decir, por debajo del umbral del fondo de ruido antes descrito) que se descarta en la etapa 1205. Los datos restantes se incluyen en los sub-rangos de velocidad-frecuencia en la etapa 1206. Se observará que el sub-rango de velocidad-frecuencia para la etapa 1206 será el mismo que el sub-rango de velocidad-frecuencia utilizado para la definición del fondo de ruido en la etapa 506. No obstante, puede ser distinto por el contrario. Más adelante se describirán como decidir el número de los sub-rangos.

Suponiendo que existen $N'_{bw} \times N'_{bf}$ sub-rangos de velocidad-frecuencia, puede definirse una matriz de cómputo C_{ij} , puede definirse una matriz de cómputo C_{ij} tal que el elemento (i, j) se fije con el número de muestras (por encima del fondo del ruido) en el conjunto de entrenamiento que caiga dentro del sub-rango (i, j) correspondiente de velocidad y frecuencia de un armónico fundamental o de orden bajo que dará lugar a grandes números de datos que caerán en la parte inferior del rango de frecuencia, mientras que los armónicos de orden superior darán lugar a cómputos grandes en las partes más altas del rango de frecuencias. La mayor parte de los sub-rangos no tendrán muestras en absoluto. Así pues, la matriz C caracteriza la distribución del contenido espectral significativo a través del espacio de velocidad-frecuencia para los datos de entrenamiento. Teniendo en cuenta que los sub-rangos correspondientes a las ordenes con seguimiento contendrán números altos de muestras, se define el número N_m de forma que cualquier sub-rango (i, j) con C_{ij} mayor o igual que N_m se considera como conteniendo un "contenido espectral significativo". Esto significará que cuando los datos reales se analicen durante la operación de un motor, cualquier muestra por encima del fondo de ruido y que caiga dentro de un sub-rango para el cual C_{ij} sea mayor o igual que N_m se considerará como un contenido espectral significativo conocido. Al revés, cualquier muestra por encima del fondo de ruido que caiga dentro de un sub-rango para el cual C_{ij} sea menor que N_m se considerará como un contenido espectral significativo nuevo, porque el conjunto de entrenamiento no contendría un número (N_m) significativo porque el conjunto de entrenamiento no contendría un número (N_m) significativo de muestras por encima del fondo del ruido en dicho sub-rango.

Esta monitorización de datos reales se ilustra en las etapas 908 y 909 de la figura 8 en donde cada muestra por encima del fondo del ruido apropiado para su frecuencia y velocidad se comprueba en la etapa 908 para ver si está en un sub-rango de velocidad-frecuencia que haya sido designado como un contenido espectral conocido significativo (en el proceso de entrenamiento). En caso negativo, entonces la muestra es representativa de un contenido espectral nuevo significativo, y esto puede visualizarse en la etapa 909 y puede dispararse una alarma si fuera necesario. Además de ello, la condición de alarma puede dispararse si se encuentra el número de umbral de las muestras que representen un nuevo contenido espectral, o si el contenido espectral nuevo significativo persiste durante un cierto tiempo.

Se apreciará que el nivel de cuantificación del espacio de velocidad-frecuencia (es decir, el número de los sub-rangos de velocidad-frecuencia, y también la selección del umbral N_m afectan a la sensibilidad del método. Si el número de sub-rangos es pequeño (es decir, una cuantificación basta del espacio de velocidad-frecuencia), y N_m es también pequeño, entonces una alta proporción de los sub-rangos contendrá un contenido espectral significativo conocido con respecto a los datos de entrenamiento. Así pues, el método será relativamente insensible y el método

5 estará sujeto a muchas negativas falsas. Por el contrario, si la cuantificación del espacio de velocidad-frecuencia es demasiado fina, por lo que existirán muchos sub-rangos de velocidad-frecuencia, y/o N_m será grande, y en consecuencia una proporción relativamente pequeña de los sub-rangos se considerarán como que contienen un contenido espectral significativo conocido en relación con la fecha de entrenamiento, por tanto cuando se monitorizan datos nuevos es mucho más probable que las muestras de datos puedan caer en un sub-rango no considerado con un contenido espectral significativo conocido, y por tanto se clasificará como un contenido espectral significativo nuevo. Esto tenderá a hacer que el método sea sobresensible y pueda generar grandes números de positivos falsos. Los valores N'_{bw} , N'_{br} y N_m pueden establecerse debidamente por el uso de conjuntos de datos normales y conjuntos de datos de entrenamiento conocidos para contener ejemplos de una operación de motor anormal. La figura 12 ilustra los resultados de la detección de un contenido espectral significativo para cuatro conjuntos de datos, tres de los cuales se estimaron como normales y uno anormal para distintos niveles de cuantificación del espacio de velocidad-frecuencia. Cada representación gráfica muestra la proporción de los datos espectrales a partir del conjunto de datos que se clasifica como "nuevo" (es decir, correspondiente a un nuevo contenido espectral significativo) para cada una de 49 cuantificaciones de espacio de velocidad-frecuencia distintas (es decir, $N'_{bw} = 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100$) y $N'_{br} = 10, 50, 100, 200, 400, 500, 1024$, en este caso con $N_m = 3$. Puesto que las figuras 12(a), (b), y (c) contienen datos correspondientes a un funcionamiento normal del motor, cualesquiera clasificación nueva (es decir, zonas no negras) se corresponderán a los positivos falsos. Por el contrario, en la figura 12(d) los datos son conocidos para contener un contenido espectral significativo, por lo que las cuantificaciones darán lugar a identificaciones no nuevas (zonas negras) que serán negativos falsos. La zona de puntos en la figura 12(d) indica cuantificaciones que identifican correctamente nuevos contenidos espectrales significativos en los datos sin un contenido espectral significativo nuevo de clasificación errónea. Comparando esta zona de puntos con las zonas negras deseadas en las figuras 12(a)-(c) se muestra que las cuantificaciones del rango de frecuencias desde 30 a 120 sub-rangos y las cuantificaciones del rango de velocidad desde 5 a 30 proporcionan una distinción correcta entre el contenido espectral significativo nuevo y conocido, en este caso con $N_m = 3$. Los mismo datos se utilizaron para probar el efecto de variar N_m y se encontró que con N_m mayor que 3 el número de clasificaciones nuevas positivas falsas se incrementaba, mientras que con N_m disminuyendo hacia 1, no se crearon clasificaciones nuevas incluso en los datos de la figura 12(d). Los distintos valores de N_m pueden encontrarse como apropiados para distintas máquinas.

30 Mediante la repetición de este proceso de prueba en otros conjuntos de datos conocidos como normales y otros conjuntos de datos conocidos como anormales, puede conseguirse la cuantificación óptima del espacio de velocidad-frecuencia y el establecimiento de N_m . Se encontró que con otros conjuntos de datos del mismo motor de turbina de gas utilizado como anteriormente, con menos de 40 sub-rangos de velocidad y 50 ó 100 sub-rangos de frecuencia, conjuntamente con N_m por encima de 3 se proporciona un excelente rendimiento. La figura 13 ilustra los resultados de la aplicación de esta detección del contenido espectral nuevo significativo a distintos datos del motor de turbina. La figura 13(a) ilustra el espectro de vibración completo, mientras que la figura 13(b) ilustra el valor de $P_e(x)$ para los puntos de los datos clasificados como un orden con seguimiento nuevo. Es decir, esto muestra solo aquellos puntos de datos que están por encima del fondo del ruido en un sub-rango de velocidad-frecuencia que no estaba designado durante el proceso de entrenamiento por encima, conteniendo el contenido espectral conocido significativo. Esto muestra la alta energía de vibración de la alta amplitud para las frecuencias correspondientes a un fallo del armazón del cojinete o rodamiento, es decir una serie de ordenes con nuevo seguimiento entre $T = 200$ y $T = 400$. En este caso, $N'_{bw} = 20$, $N'_{br} = 100$ y $N_m = 3$.

45 La figura 14 ilustra la aplicación de la técnica a otro conjunto de datos que contiene datos anormales, con la figura 14(a) que ilustra el espectro de vibración completo y la figura 14(b) que ilustra solamente aquellos puntos de datos clasificados como correspondientes al nuevo contenido espectral significativo. En este caso, se identifica (correctamente) solo un nuevo orden con seguimiento correspondiente a un daño en el rodamiento o cojinete a una frecuencia de 2.500 Hz.

50 Así pues, con este aspecto de la técnica se ha establecido una vez un fondo de ruido en la forma apropiada para cada área del espacio de velocidad-frecuencia, en donde los datos de entrenamiento pueden utilizarse para identificar cuales son las zonas que se corresponden a un contenido espectral significativo nuevo, mediante la designación de un contenido de sub-rangos de velocidad-frecuencia, que contenga más del número preestablecido de muestras por encima del fondo del ruido. Durante la monitorización, las nuevas muestras de datos que están por encima del fondo del ruido pueden entonces comprobarse para ver si caen dentro de un sub-rango de velocidad-frecuencia tal como se conoce por el contenido espectral, y en caso negativo podría considerarse como un contenido espectral nuevo significativo.

55 Sumario

60 Con la técnica descrita anteriormente, en consecuencia, la representación de velocidad-frecuencia, de los datos espectrales se utiliza para caracterizar la distribución de la energía espectral y se estima un fondo de ruido basado en el conjunto de datos de entrenamiento del espacio de velocidad-frecuencia. Esto permite la detección de órdenes con seguimiento armónicas de alto orden que no puedan detectarse rápidamente con las técnicas existentes. Además de ello, la técnica permite un modelo de normalidad para entrenarse a partir de un conjunto de entrenamiento, en los términos del contenido espectral significativo conocido presente en los datos de entrenamiento, y pudiendo detectar un contenido nuevo espectral durante la monitorización de datos reales. Los

procesos son automáticos y por tanto pueden aplicarse a cada motor específico o bien en otra maquina, en lugar de tener que sintonizarse por un análisis experto con respecto a una clase de motor o máquina.

- 5 Se observará también que aunque la anterior descripción está basada en el uso de conjuntos de datos de entrenamiento designados, es posible re-entrenar el modelo en cualquier punto, o bien en una base continua, basándose en datos reales lo cual se considera como normal. Así pues, en el uso de la técnica para monitorizar un motor o bien otra máquina, cualquier funcionamiento que sea normal podría utilizarse para refinar el fondo de ruido, y para refinar la detección del contenido espectral significativo conocido.

REIVINDICACIONES

1. Un método de monitorización de la amplitud y frecuencia de las vibraciones en una maquina rotativa, que comprende las etapas de:
 - recepción de las medidas de la amplitud de la vibración y la velocidad de rotación de la máquina (901);
- 5 gravar como un punto de datos cada medida de la amplitud como una función de la frecuencia de vibración y la velocidad rotacional (903);
 - almacenar una pluralidad de distintos umbrales de amplitud distintos, representando cada uno un fondo de ruido para el conjunto respectivo primero de un primer conjunto de sub-rangos de la frecuencia de vibración y de la velocidad rotacional;
- 10 comparar cada medida de amplitud con el umbral de amplitud para el sub-rango de la frecuencia de vibración y la velocidad rotacional dentro de la cual pueda caer (905); y
 - determinar la medida como la representación del ruido si cae por debajo del umbral y que tenga un contenido espectral significativo si está por encima del umbral.
- 15 2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde los umbrales distintos de la amplitud representan un sub-rango respectivo de la frecuencia de vibración y la velocidad rotacional que se establecen en un proceso de entrenamiento, utilizando los datos de vibración a partir del funcionamiento de la maquina rotativa estimado como normal.
3. Un método de acuerdo con la reivindicación 2, en donde los distintos umbrales de amplitud representa cada uno un fondo del ruido para el sub-rango respectivo de la frecuencia de vibración y la velocidad rotacional que se establecen por el acoplamiento de una distribución de la amplitud en los puntos de datos de entrenamiento en cada sub-rango de la frecuencia de vibración y la velocidad rotacional, calculando una distribución de valores extremos para la mencionada distribución de la amplitud y estableciéndose como el mencionado umbral de la amplitud con un valor que represente una probabilidad preestablecida de ser el valor máximo de amplitud que se obtendría para el ruido.
- 20 4. Un método de acuerdo con la reivindicación 3, en donde la probabilidad preestablecida es una probabilidad por encima de 0,99.
5. Un método de acuerdo con la reivindicación 3 ó 4 en donde la distribución de la amplitud es una distribución Gamma.
- 30 6. Un método de acuerdo con la reivindicación 3, 4 ó 5, en donde la distribución de amplitud está acoplada después de excluir los puntos de datos de entrenamiento que no representen el ruido de fondo de los mencionados datos en cada sub-rango de la frecuencia de vibración y de la velocidad rotacional.
7. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 3 a 6, que comprende además:
 - comparar cada medida de amplitud con la distribución del valor extremo
 - obtenido a partir de los puntos de datos de entrenamiento para la lectura de un valor de probabilidad para dicha amplitud;
 - 35 calcular a partir del valor de la probabilidad el valor de dicha amplitud;
 - valor de la novedad = $-\log_{10}\{1-P_e(x)\}$, en donde $P_e(x)$ es el valor extremo de la distribución como una función de amplitud x ; y
 - dar salida al mencionado valor de la novedad.
- 40 8. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende además:
 - almacenar un segundo conjunto de la frecuencia de vibración y la velocidad rotacional, durante un proceso de entrenamiento utilizando los datos de vibración a partir de un funcionamiento de la maquina rotativa estimada como normal, con un valor mayor de un numero preajustado de puntos de datos de entrenamiento cuya amplitud estaba por encima del fondo del ruido y definiendo esta frecuencia de vibración y los sub-rangos de velocidad rotacional
 - 45 como un contenido espectral significativo conocido;
 - comparar cada medida de amplitud con el umbral de amplitud que represente el fondo de ruido para uno del primer número de sub-rangos de la frecuencia de vibración y la velocidad de rotación dentro de la cual pueda caer;
 - definir un nuevo contenido espectral significativo cualquier conjunto de la frecuencia de vibración y los sub-rangos de velocidad rotacional no definidos como contenidos espectrales significativos, y que contengan más de un segundo

numero preajustado de las medidas de amplitud que excedan del umbral de amplitud que representen el fondo del ruido.

9. Un método de acuerdo con la reivindicación 8, en donde el segundo numero preestablecido de las medidas de amplitud es la unidad.
- 5 10. Un método de acuerdo con la reivindicación 8 ó 9 en donde el segundo conjunto de la frecuencia de vibración y los sub-rangos de velocidad rotacional, y el numero preestablecido mencionado de los puntos de datos de entrenamiento, están determinados en un proceso de entrenamiento utilizando puntos de datos de entrenamiento que comprenden los datos de vibración a partir de un funcionamiento de la maquina rotatoria que contenga los datos anormales, tal que solo los datos del segundo conjunto de la frecuencia de vibración y los sub-rangos de velocidad rotacional que contengan puntos de datos de entrenamiento anormales estarán definidos como una energía espectral significativa nueva.
- 10 11. Un método de acuerdo con la reivindicación 8, 9 ó 10, en donde el primero y el segundo conjuntos de sub-rangos de la frecuencia de vibración y la velocidad rotacional sean los mismos.
- 15 12. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores en donde el rango de la frecuencia está dividido en 30 a 120 sub-rangos y en donde el rango de la velocidad rotacional está dividido en 5 a 40 sub-rangos.
13. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores en donde el rango de frecuencia está dividido en 50 a 100 sub-rangos, y en donde el rango de velocidad rotacional está dividido en 10 a 30 sub-rangos.
- 20 14. Un aparato para la amplitud de vibración y la frecuencia en una maquina rotativa, que comprende entradas para las medidas de vibración de recepción del sensor de vibración, y las medidas de velocidad rotacional de la maquina a partir de un tacómetro, y un sistema de procesamiento de datos adaptado para ejecutar el método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores.
- 25 15. Un sistema de control para una máquina rotativa que comprende un aparato de acuerdo con la reivindicación 14.

Fig.1.

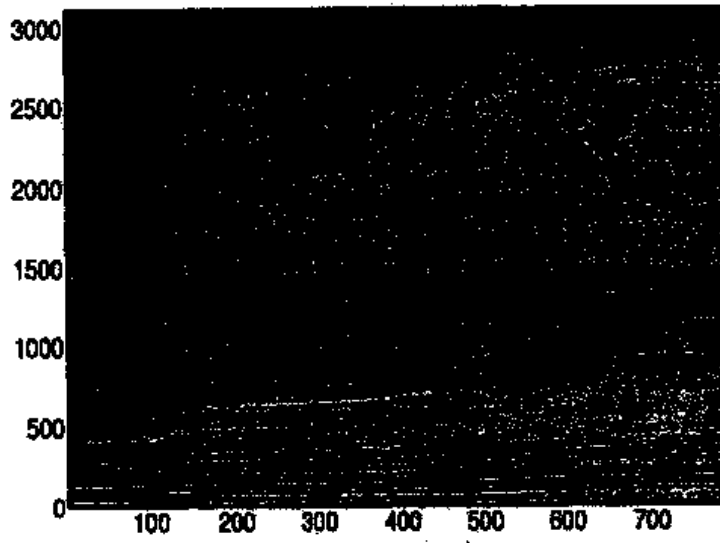


Fig.2.

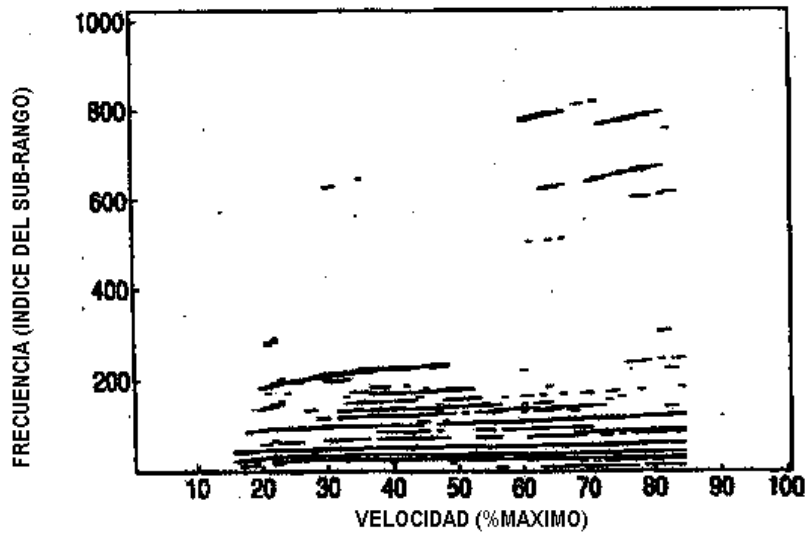


Fig.3.

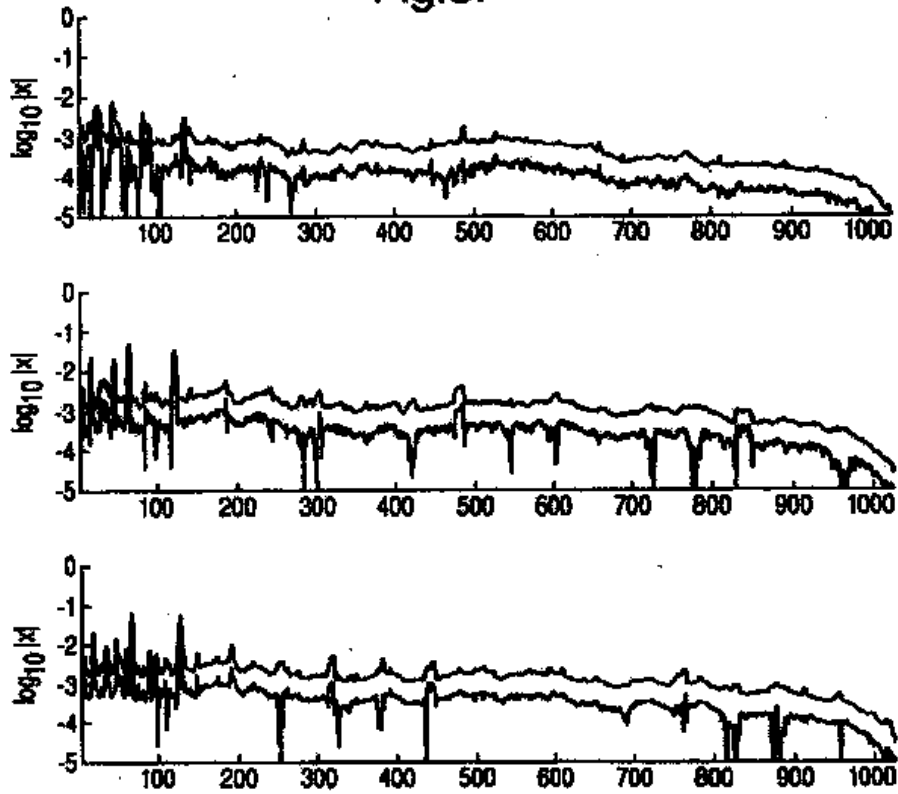


Fig.4.

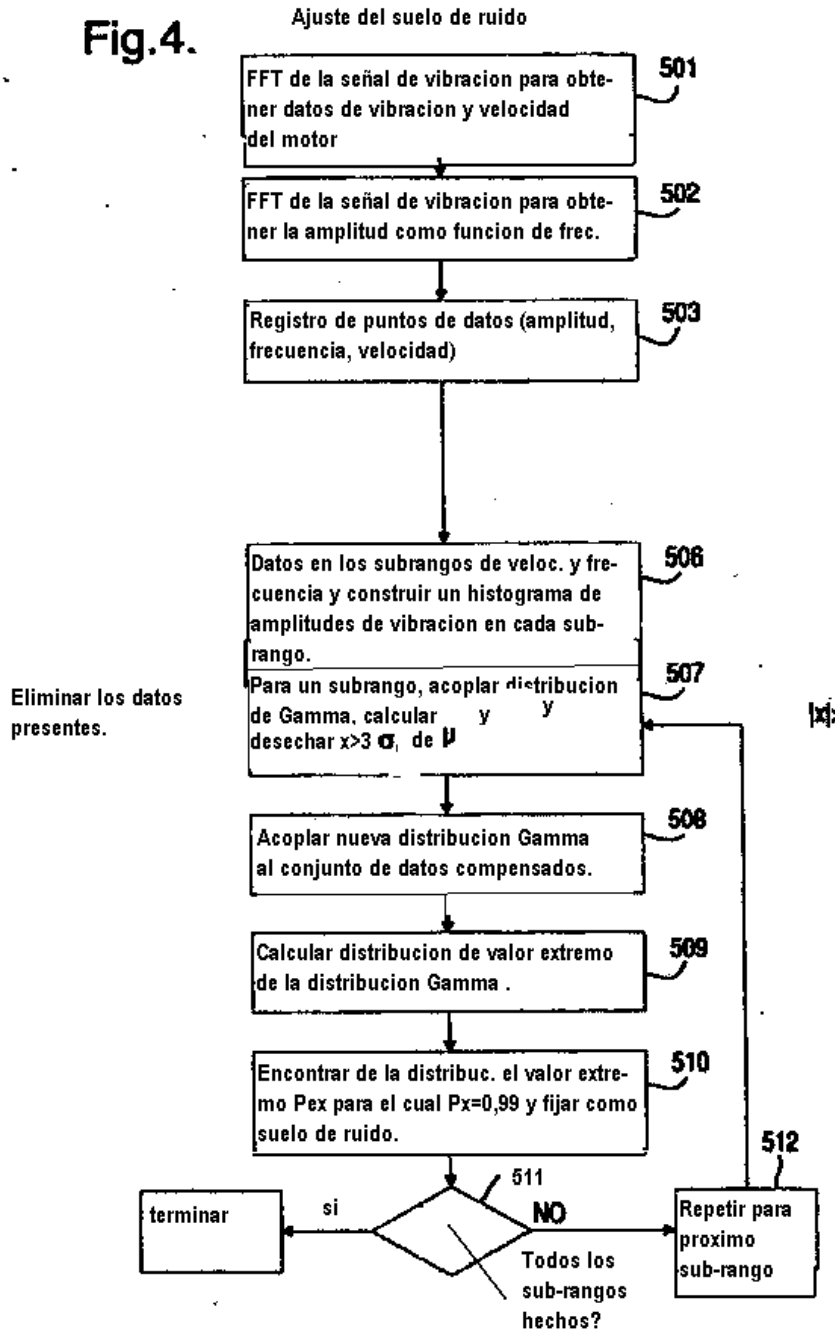


Fig.5(b).

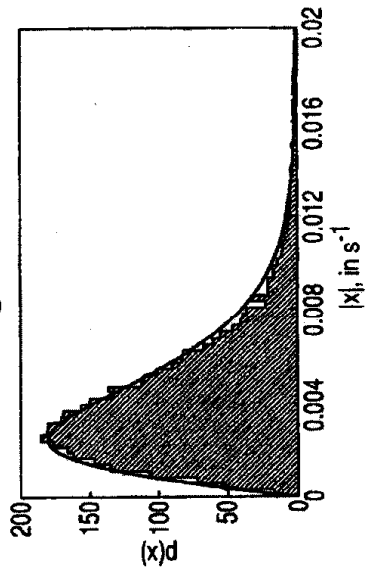


Fig.5(a).

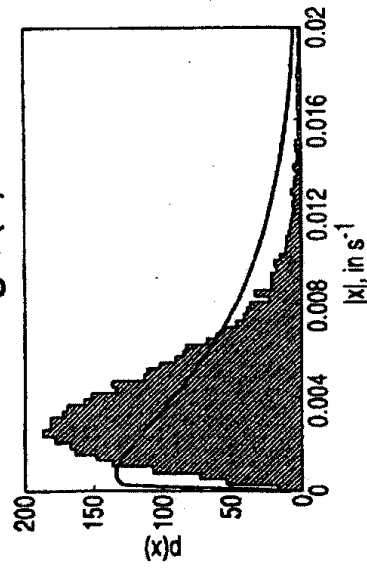


Fig.5(c).

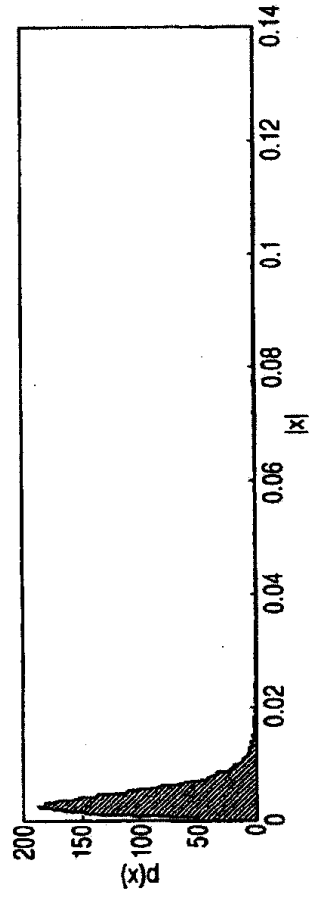


Fig.6.

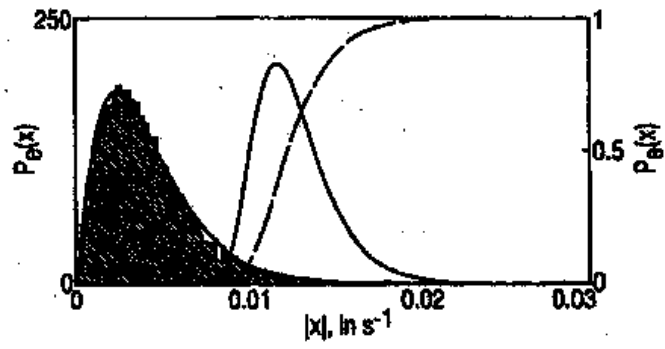


Fig.7(a).

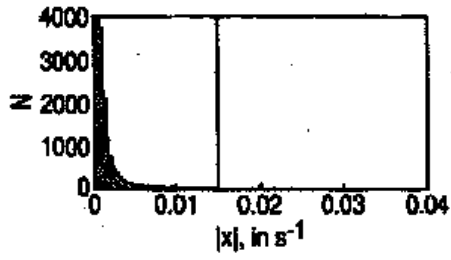


Fig.7(b).

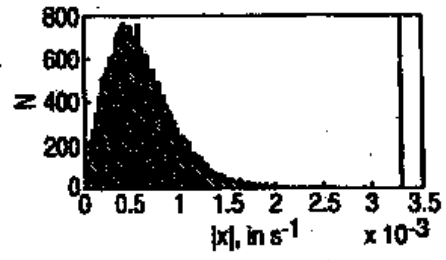


Fig.7(c).

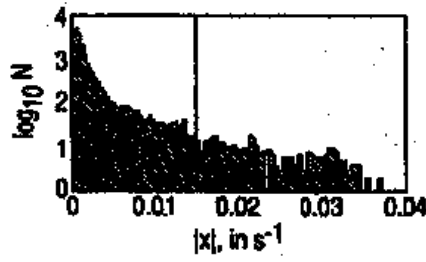


Fig.7(d).

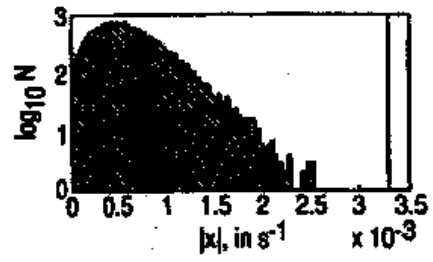


Fig.8.

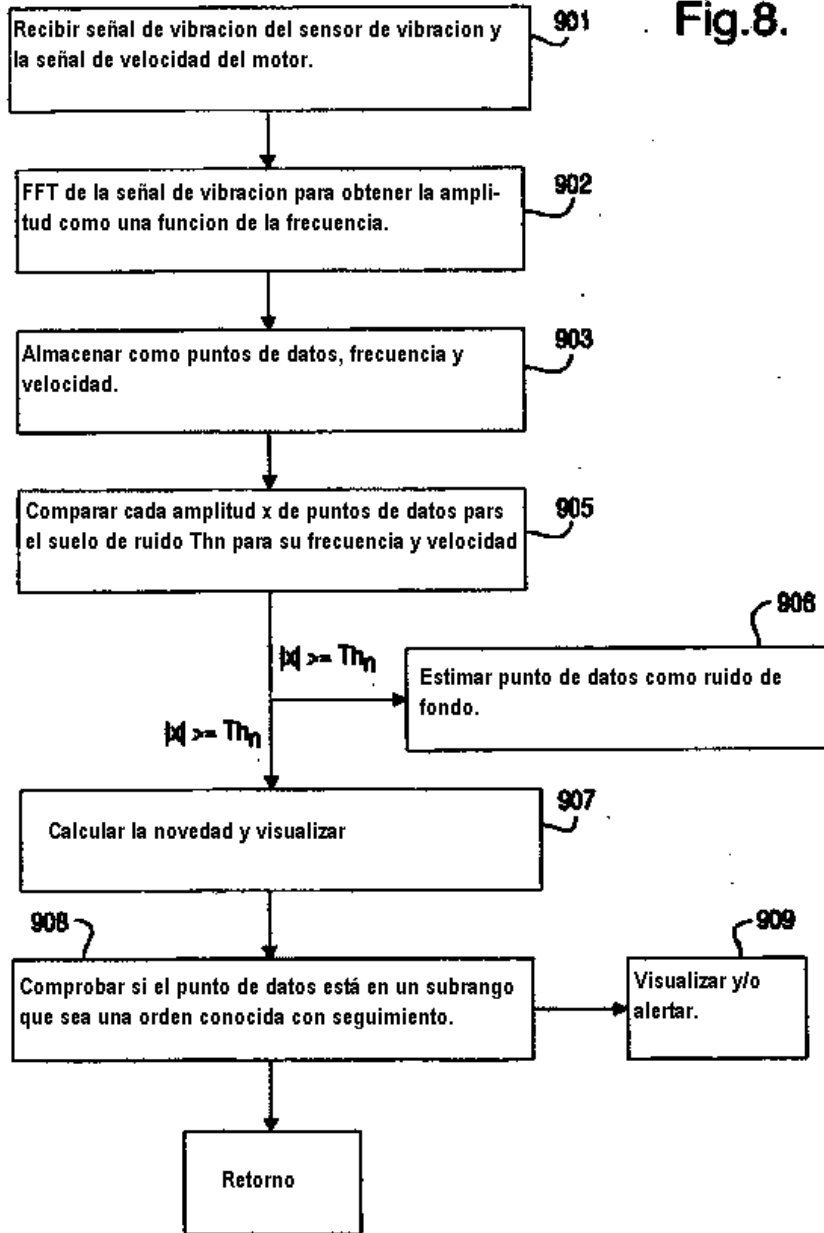
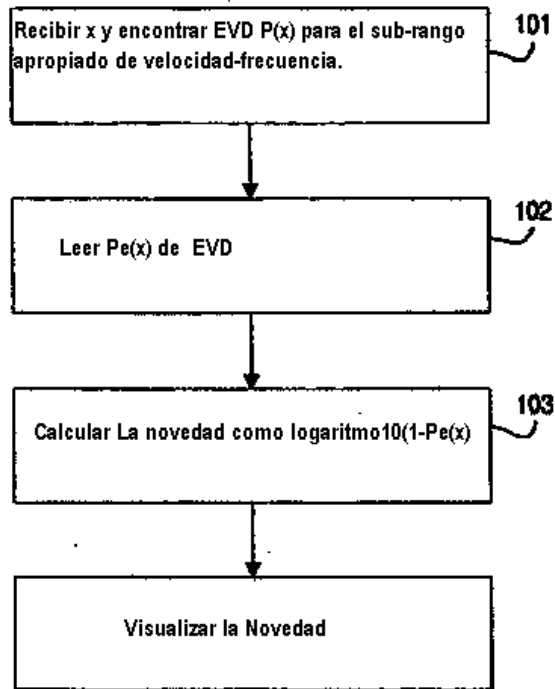


Fig.9.

Calculo de la Novedad



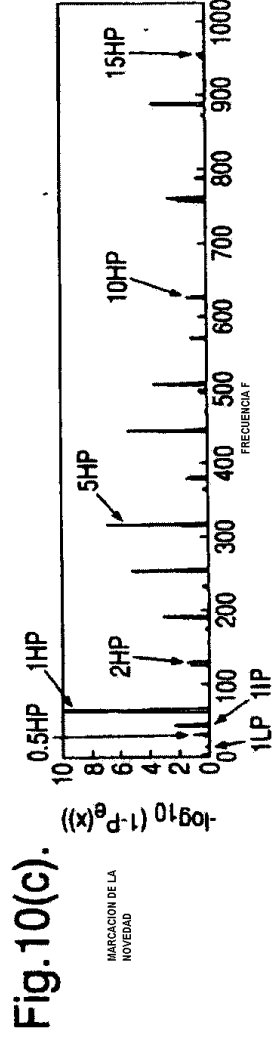
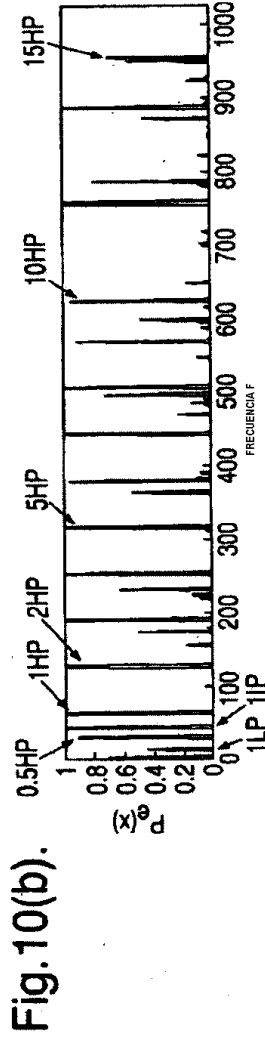
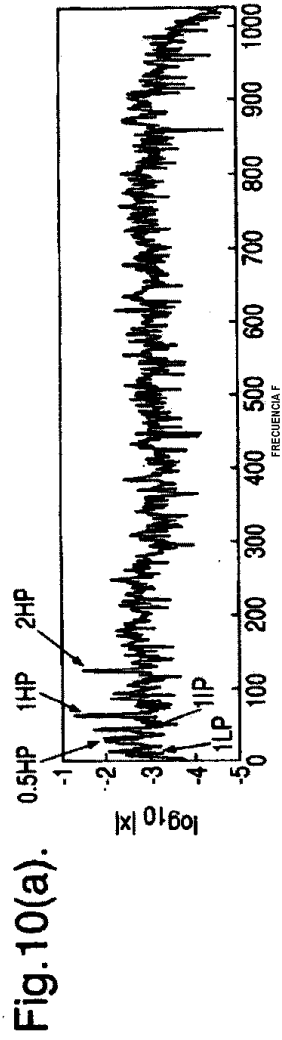
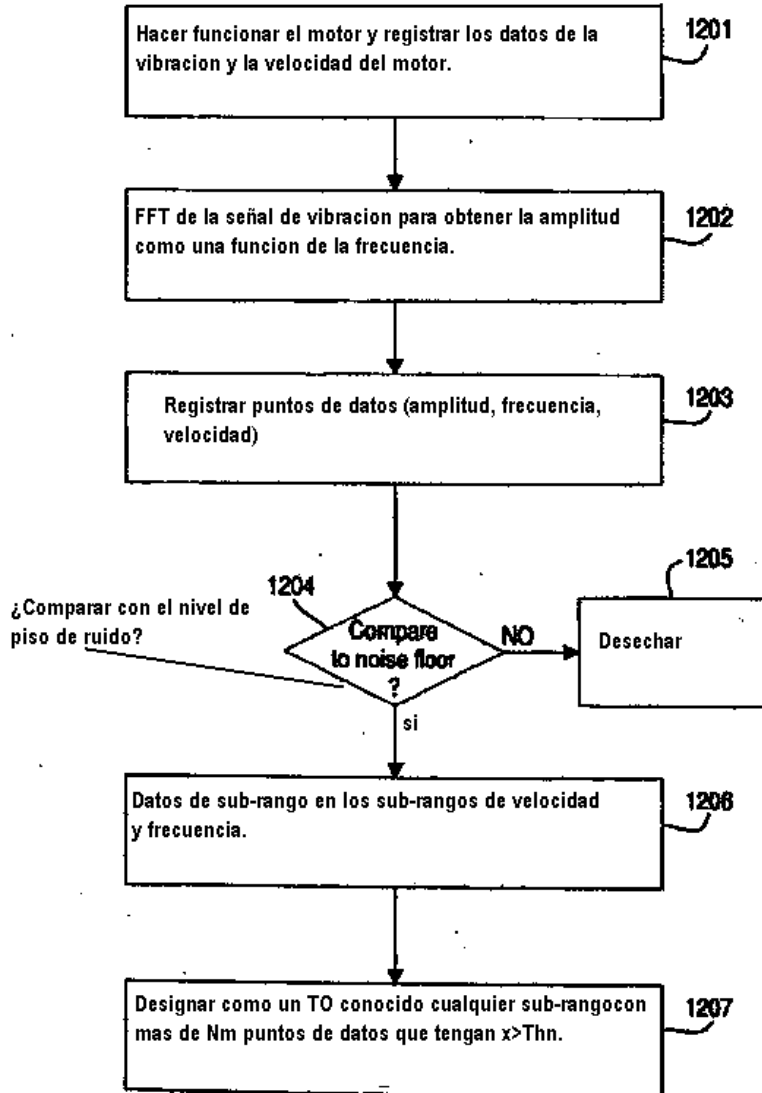


Fig.11.

**ENTRENAMIENTO PARA LAS ORDENES
CONOCIDAS-NUEVAS CON SEGUIMIENTO**



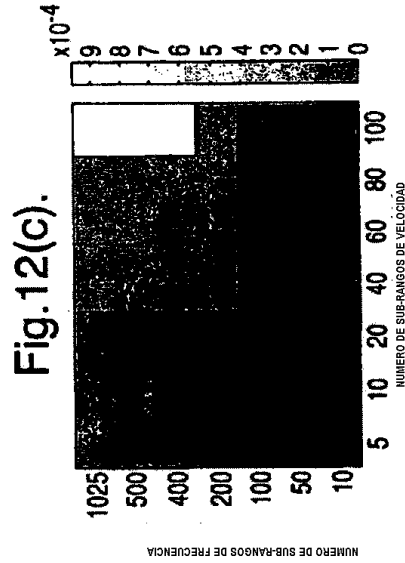
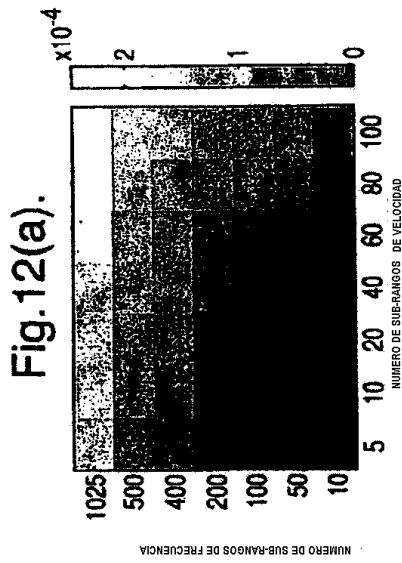
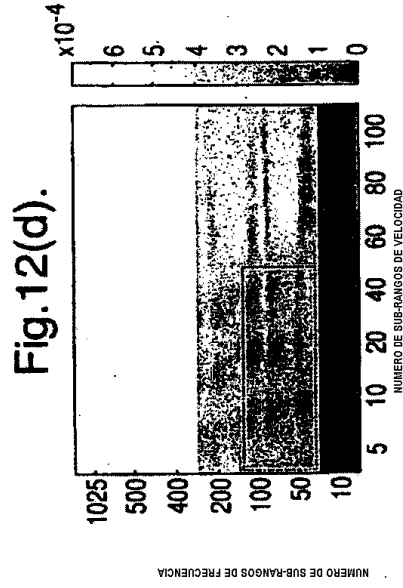
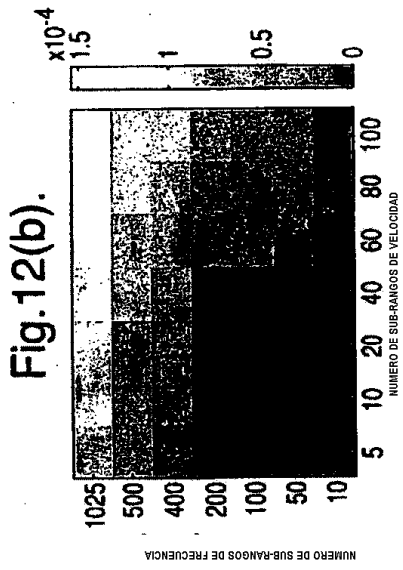


Fig.13(b).

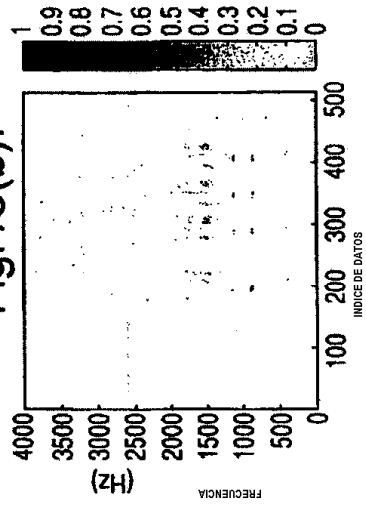


Fig.14(b).

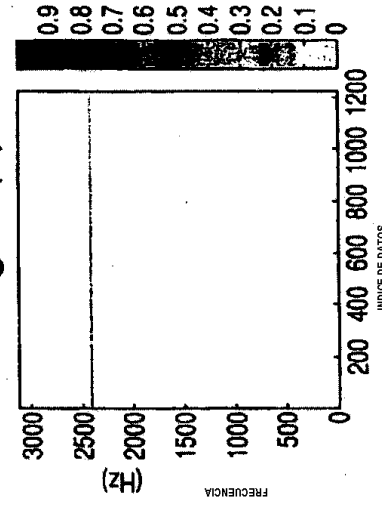


Fig.13(a).

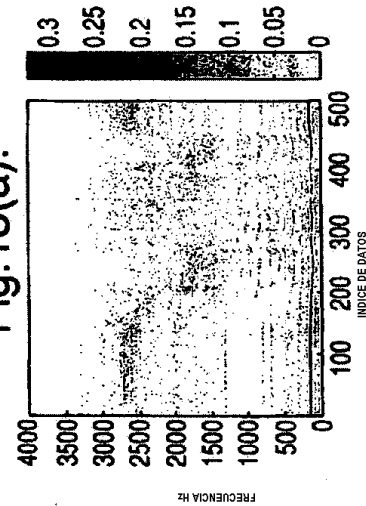


Fig.14(a).

