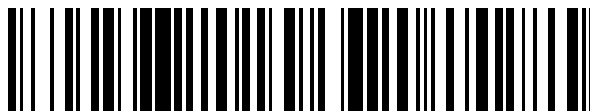


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 549 652**

21 Número de solicitud: 201430606

51 Int. Cl.:

G06F 17/14

(2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

24.04.2014

43 Fecha de publicación de la solicitud:

30.10.2015

71 Solicitantes:

ALSTOM TRANSPORTE, S.A. (41.3%)

Paseo Castellana, 257, 6º

28046 Madrid ES;

DANOBAT S. COOP. (36.1%);

SKF ESPAÑOLA, S.A. (21.6%) y

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID (1.0%)

72 Inventor/es:

GARCÍA PRADA, Juan Carlos;

CASTEJÓN SISAMÓN, Cristina;

GÓMEZ GARCÍA, María Jesús y

MENESES ALONSO, Jesús

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

54 Título: **Método y sistema para detectar automáticamente fallos en un eje rotatorio**

57 Resumen:

Método y sistema para detectar automáticamente fallos en un eje rotatorio.

La presente invención se refiere a un método y un sistema para detectar automáticamente fallos en un eje rotatorio. La invención comprende los pasos de: adquirir, mediante al menos un sensor, una señal de tipo vibratorio del eje rotatorio; procesar, mediante un procesador, en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, la señal adquirida por el sensor, obteniendo como resultado de dicho procesado, unas medidas de energía de la señal adquirida; comparar, en el procesador, las medidas de energía con unos patrones de energía previamente establecidos; y finalmente determinar si existe algún fallo en el eje rotatorio en base a la comparación entre las medidas de energía y los patrones previamente establecidos.

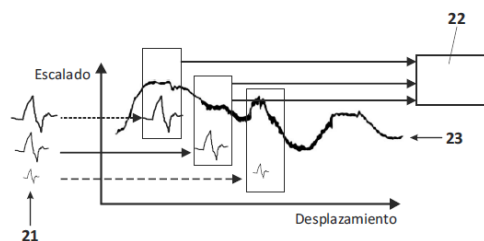


FIG. 2

DESCRIPCIÓN

Método y sistema para detectar automáticamente fallos en un eje rotatorio

5 **Objeto de la invención**

La presente invención tiene aplicación en el campo de la defectología y la prevención de daños, más específicamente en la detección automática de fallos en ejes rotatorios como puede ser un eje de ferrocarril, para diagnosticar el estado de dichos ejes y garantizar su mantenimiento.

10

Antecedentes de la invención

Actualmente los métodos de diagnóstico y monitorización de estado de los sistemas mecánicos presentan gran interés industrial. El mantenimiento predictivo es fundamental para evitar roturas en máquinas rotativas, y uno de los métodos de diagnóstico más usados es el análisis de vibraciones, ya que de las señales acústicas y vibratorias se pueden extraer patrones útiles para la detección de defectos en maquinaria.

La detección de defectos en elementos mecánicos rotatorios es crítica en el mantenimiento de los mismos y debido a que los engranajes y rodamientos son los componentes más utilizados en las aplicaciones industriales, estas técnicas de monitorización han sido ampliamente desarrolladas para estos elementos. Sin embargo, hoy en día, las técnicas de mantenimiento aplicadas son muy diferentes dependiendo del sector y, para elementos mecánicos como es el caso de los ejes ferroviarios, actualmente se utilizan otro tipo de técnicas de inspección no destructivas, principalmente ultrasonidos. En este caso se establecen unos intervalos fijos para realizar inspecciones que cuando se realizan obligan a dejar la máquina fuera de servicio durante el proceso, incluyendo el decalado de las ruedas, con los gastos que ello implica. Los ultrasonidos tienen además la desventaja de que no ofrecen probabilidades de acierto muy altas en las zonas de cambios de sección (que son precisamente las que presentan mayor probabilidad de tener una grieta), y en el caso de las partículas magnéticas (otra técnica habitual), el bajo nivel de automatización de los equipos de inspección, hace que se esté expuesto a errores humanos.

Las técnicas basadas en la monitorización de estado, en cambio presentan las ventajas de que se elimina la necesidad de parar y desmontar la máquina para comprobar el estado de

sus elementos y además la probabilidad de detectar un fallo, antes de que sea grave aumenta, evitando así pérdidas e incrementando la seguridad de los procesos. Estas dos razones hacen que la monitorización de estado en procesos industriales haya sido objeto de numerosas investigaciones en las últimas décadas.

5

Particularizando en la monitorización de ejes, desde los años 60 se han realizado multitud de estudios sobre el comportamiento dinámico de los mismos, tanto con la presencia de defectos como sobre ejes sanos. Sin embargo, este tipo de estudios no suele incluir el proceso inverso de identificación de defectos. Sobre el problema de detección de defectos en ejes, los métodos de diagnosis existentes en el estado del arte se pueden clasificar en métodos basados en las vibraciones, métodos basados en el análisis modal, y técnicas no tradicionales.

10

En cuanto a los métodos no tradicionales, se incluyen en este campo los métodos que utilizan sistemas inteligentes de clasificación tales como redes neuronales, y lógica borrosa, además de técnicas sofisticadas de procesamiento de señales, como por ejemplo, la transformada wavelet (WT). La transformada wavelet (WT) es de hecho la herramienta más utilizada para el tratamiento de señales. Su uso está reemplazando al de la FFT ya que consigue eliminar las limitaciones de esta técnica clásica al incluir información sobre el dominio del tiempo. debido a esto, la WT es una herramienta muy apropiada para trabajar con señales de tipo no estacionario, cualidad que la hace especialmente indicada para defectología en máquinas; ya que cuando aparece una fisura en un elemento se generan efectos transitorios en la señal que no pueden ser detectados teniendo en cuenta solamente el dominio de la frecuencia. De esta manera, tanto para defectología de ejes y de otros elementos mecánicos importantes como rodamientos, engranajes, e incluso elementos estructurales, la transformada wavelet ha tomado mucho protagonismo en los últimos años.

15

20

Una de las últimas evoluciones de la WT, es la llamada *transformada wavelet packet* o *transformada wavelet de paquetes* (WPT), que está teniendo un gran número de aplicaciones. Esta técnica permite la descomposición de todas las bandas de frecuencia de la señal, permitiendo localizar las diferencias entre elementos sanos y defectuosos, permitiendo además ampliar o reducir la resolución con la que se examina la información. Los coeficientes obtenidos de la WPT se pueden usar directamente como patrones para la detección de defectos, ya que poseen gran sensibilidad a los fallos, pero hay una multitud de alternativas de aplicar esta técnica y usar otros tipos de información relativa a los coeficientes, como parámetros estadísticos de la señal o medidas de energía.

25

30

35

El estado del arte de la diagnosis de defectos en máquinas, está provisto de distintos tipos de clasificadores artificiales. Se ha seguido una evolución desde los enfoques estadísticos clásicos de decisión iniciales (determinísticos y probabilísticos), enfoques sintácticos o árboles de decisión, hasta otros que se han desarrollado recientemente a través de paquetes informáticos y que derivan de los anteriores, como enfoques teóricos de grupos borrosos, algoritmos genéticos y conexionistas (RNA: redes neuronales artificiales); incluyendo versiones híbridas de todos los mencionados anteriormente. En la actualidad, las RNA se han convertido en un sistema de clasificación inteligente de gran interés para la industria.

Las redes de neuronas artificiales son un ejemplo de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora para producir un estímulo de salida. En inteligencia artificial es frecuente referirse a ellas como redes de neuronas o redes neuronales. Las partes fundamentales de una unidad neuronal básica son:

- entrada: es el vector ($\mathbf{p}_j$) que excita a la neurona. Se compone de aquellos datos más representativos (patrones) del fenómeno al que se desea aplicar una RNA.
- pesos: son los valores ($\mathbf{w}_j$) que se asocian a cada una de las conexiones entre neuronas de una red. La variación de éstos determina el proceso de aprendizaje.
- función de activación: se encarga de calcular el nivel o estado de activación de la neurona en función de la entrada total. Es quizás la característica principal de las neuronas, la que mejor define el comportamiento de la misma. Las funciones de activación más populares en las diferentes arquitecturas RNA son: la función sigmoidea para obtener valores en el intervalo $[0,1]$ y la tangente hiperbólica, para obtener valores en el intervalo $[-1,1]$.
- función de red o de propagación: calcula el valor de base o entrada total a la unidad neuronal. Equivale a la combinación de las señales que excitan o inhiben a las neuronas biológicas. Las funciones de red más utilizadas son la lineal y la de segundo orden. La ecuación para la obtención de la salida de la unidad neuronal para una función de red lineal es:

$$a = f \left(\sum_{j=1}^n w_j p_j + u_j \right)$$

- salida: es el valor de salida de la neurona en función de la activación de la misma. En el caso de la utilización de una RNA para el proceso de diagnóstico de fallos, la salida equivale al diagnóstico de la red.

5 Las neuronas se organizan por capas, donde se conectan a través de los pesos. Las RNA básicas tienen al menos tres capas de neuronas: una capa de entrada, una o más capas ocultas, y una capa de salida. Cada capa de la RNA contiene un grupo de unidades de procesamiento, llamadas nodos o neuronas, que envían su propia salida a todos los nodos de la capa siguiente de manera unidireccional.

10

Existen dos fases en la utilización de una RNA convencional: la fase de aprendizaje o entrenamiento y la fase de prueba y/o utilización. En el caso de una RNA con aprendizaje de tipo supervisado, el entrenamiento consiste en la presentación de un conjunto variado de patrones de entrada, cuya salida es conocida. La red ajusta las conexiones entre capas (pesos w_j), en un proceso iterativo de minimización del error, hasta conseguir que dicha red cumpla los requisitos impuestos. Existen diferentes algoritmos de ajuste de pesos que constituyen las diferentes configuraciones de red.

15

Según lo expuesto anteriormente, las invenciones hasta ahora conocidas por el estado de la técnica realizan la función del objeto de invención, pero de una manera poco fiable y poco eficiente debido a que no logran adecuarse de la manera más óptima a su aplicación sobre ejes rotatorios como los de un ferrocarril. El estado del arte demanda por tanto una evolución en estas técnicas que permita realizar un diagnóstico fiable y automático del estado de un eje (detectar si existen fallos/defectos) montado con el resto de elementos que forman parte de un sistema rodante, sin pagar el peaje de tener que desmontar el eje y parar su funcionamiento.

20

25

Descripción de la invención

30 La presente invención se refiere a un método para detectar automáticamente fallos en un eje rotatorio. El método comprende los pasos de:

- a) adquirir, mediante al menos un sensor, una señal de tipo vibratorio del eje rotatorio;

- b) procesar, mediante un procesador, en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, la señal adquirida por el sensor, obteniendo como resultado de dicho procesado, unas medidas de energía de la señal adquirida;
- c) comparar, en el procesador, las medidas de energía con unos patrones de energía previamente establecidos;
- d) determinar si existe algún fallo en el eje rotatorio en base a la comparación entre las medidas de energía y los patrones previamente establecidos.

El procesado del paso b) puede realizarse, según una realización de la presente invención, aplicando una transformada wavelet en paquetes a la señal adquirida. Al aplicar la transformada wavelet en paquetes a la señal adquirida, el método de la invención contempla la posibilidad de escoger un nivel de descomposición para la señal adquirida y una wavelet madre.

Según una realización de la presente invención, los patrones de energía se encuentran distribuidos en paquetes que corresponden a distintas bandas de frecuencia de la señal adquirida.

Opcionalmente, para establecer los patrones de energía, la presente invención contempla en una de sus realizaciones el detectar los cambios de energía en una misma banda de frecuencia entre distintas señales obtenidas previamente del eje rotatorio.

En una de las realizaciones de la presente invención, la comparación de las medidas de energía con los patrones previamente establecidos se realiza mediante una red neuronal. La red neuronal, dependiendo de las distintas realizaciones de la invención, se selecciona entre una red neuronal unidireccional, una red neuronal de reconocimiento de patrones, una red neuronal perceptrón multicapa, una red neuronal de función de base radial o una red neuronal probabilística. Se contempla la posibilidad de añadir una etapa adicional de entrenamiento de la red neuronal donde se utilizan, como entrada de la red neuronal, señales de las que se conoce su resultado de salida. Opcionalmente, en el caso de obtener una tasa de acierto inferior a un cierto umbral, el método puede comprender incrementar el nivel de descomposición de la señal adquirida.

La presente invención contempla, en una de sus realizaciones, la posibilidad de que el eje rotatorio sea un eje de ferrocarril montado, donde dicho ferrocarril se encuentra en

movimiento.

Es decir, el ferrocarril o sistema rodante comprende un eje rotatorio de ferrocarril o elemento rotatorio montado junto con el resto de elementos que comprende habitualmente dicho ferrocarril o sistema rodante.

Los fallos o defectos detectados en un eje rotatorio por el método de la presente invención, pueden clasificarse en distintos niveles de gravedad de acuerdo a una de las realizaciones de la invención. Por ejemplo, los niveles de gravedad pueden corresponder con la profundidad de las grietas o fisuras detectadas en un eje de ferrocarril.

Un segundo aspecto de la invención se refiere a un sistema para detectar automáticamente fallos en un eje rotatorio. El sistema comprende:

- un sensor configurado para adquirir una señal de tipo vibratorio del eje rotatorio;
- un procesador, en comunicación con el sensor, configurado para analizar señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, obtener medidas de energía de dichas señales, comparar las medidas de energía con unos patrones de energía previamente establecidos y determinar si existe algún fallo en el eje rotatorio de acuerdo a la comparación de las medidas de energía con los patrones previamente establecidos.

Una posible realización del sistema de la invención contempla la posibilidad de que el eje rotatorio sea un eje de ferrocarril.

El sensor utilizado para adquirir señales de tipo vibratorio del eje rotatorio es, según una realización particular de la invención, un acelerómetro. Dicho acelerómetro puede instalarse, por ejemplo, en la caja de grasa vinculada al eje de ferrocarril bajo estudio.

Un último aspecto de la invención se refiere a un programa informático que comprende medios de código de programa adaptados para realizar las etapas del método de la invención, cuando dicho programa se ejecuta en un procesador de propósito general, un procesador de señal digital, una FPGA, un ASIC, un microprocesador, un microcontrolador, o cualquier otra forma de hardware programable.

Así pues, de acuerdo con la invención descrita, el método y sistema que la invención

propone constituye un avance en los métodos de diagnóstico y detección de fallos en ejes rotatorios, principalmente aplicados a ejes de ferrocarril, hasta ahora utilizados. Se resuelve así de manera plenamente satisfactoria la problemática anteriormente expuesta, en la línea de predecir el desgaste de los ejes mediante la detección de fallos en distintos niveles de gravedad sin necesidad de desmontar los ejes ni dejar las máquinas fuera de servicio mientras se inspeccionan, lo cual se realiza de manera automática con la consiguiente mejora en las operaciones asociadas tanto al funcionamiento como al mantenimiento de la máquina y la consiguiente reducción de costes por la optimización y eficiencia del proceso, todo ello sin exigir ninguna habilidad especial de operarios ni dificultad de uso.

Descripción de los dibujos

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características del invento, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica del mismo, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

La **figura 1.-** Muestra un esquema de la invención propuesta.

La **figura 2.-** Muestra un esquema de la aplicación de una transformada wavelet.

La **figura 3.-** Muestra un esquema de la descomposición de una señal al pasarla por filtros de una transformada wavelet discreta.

La **figura 4.-** Muestra el árbol de descomposición de nivel 3 en un análisis mediante paquetes wavelet.

La **figura 5a.-** Muestra el reparto de energías en distintos niveles de descomposición de acuerdo a una señal de un ejemplo particular de la invención.

La **figura 5b.-** Muestra el reparto de energías en el nivel de descomposición 3 para la misma señal utilizada en la figura 5ª.

La **figura 6.-** Muestra un esquema general de las etapas de la invención propuesta.

La **figura 7a.-** Muestra los patrones de energía de los paquetes wavelet de una señal de eje sano a 20 HZ.

La **figura 7b.-** Muestra los patrones de energía de los paquetes wavelet de una señal de eje con defecto a 20 HZ.

Descripción detallada de la invención

A la vista de las figuras reseñadas puede observarse como en una de las posibles

realizaciones de la invención, se plantea un método y un sistema no destructivo de detección de fallos en ejes que giran a bajas revoluciones con su aplicación fundamental al eje de ferrocarril montado. Basándose en la monitorización de estado y contando como ventaja en su aplicación a ejes ferroviarios la no necesidad de desmontar el mismo para su inspección.

Las vibraciones emitidas son monitorizadas de forma continua y procesadas en el dominio del tiempo y en el de la frecuencia, seleccionando los parámetros óptimos que permiten servir de información de entrada a un sistema de clasificación inteligente.

Entre las técnicas basadas en la medida de vibraciones, se encuentran tanto las técnicas en las que las señales se obtienen de forma experimental como de forma analítica. Para la detección de defectos se buscan los fenómenos observados en los análisis dinámicos de estos elementos cuando aparece un defecto, como ciertas inestabilidades observadas en subarmónicos de la velocidad crítica del eje, así como armónicos de la velocidad de giro. Sin embargo, aunque en la teoría estos efectos son transparentes, en la práctica, la detección temprana de un defecto no es una tarea sencilla, y a menudo la tasa de detección no sobrepasa un 25%.

La presente invención sustituye los coeficientes óptimos típicos de un análisis MRA, por el uso de las energías calculadas mediante WPT. De esta manera, la invención propuesta está basada en la obtención de la energía WPT de señales vibratorias obtenidas durante el funcionamiento normal del eje rotatorio bajo estudio sin necesidad de desmontarlo. Los patrones óptimos se escogen para ser clasificados mediante redes neuronales. En la actualidad, la presente invención ha sido probada con éxito en un banco prototipo de laboratorio RTK-01 escala 1/5.

En la figura 1 se muestra un esquema de la invención propuesta donde puede verse su funcionamiento. La invención propuesta, de acuerdo a una realización particular, ofrece un diagnóstico (1) constante del estado de un eje rotatorio parte de un sistema mecánico bajo estudio, un eje de ferrocarril (2) en este caso, con la ventaja de no necesitar desmontarlo, ya que durante su funcionamiento normal se adquieren señales (3) de tipo vibratorio mediante un sensor (4), por ejemplo un acelerómetro, que son recogidas por un sistema de adquisición (5) y enviadas a un procesador de señales (6). Tras procesar las señales y aplicar transformada wavelet en paquetes para obtener una medida de la energía (7) de las

señales, se introducen en una red neuronal (8) entrenada con muestras anteriores para comparar y clasificar las señales dependiendo del estado del eje. Los fallos detectados se identifican automáticamente con unas muy altas tasas de acierto.

5 Para aplicar los métodos de monitorización de engranajes y rodamientos al caso de ejes ferroviarios, que son elementos muy críticos, se han realizado de acuerdo a distintas realizaciones de la presente invención estudios sobre varios funcionales para llegar a la conclusión de cuáles son los indicadores más óptimos de la presencia de un defecto en un eje, como puede ser una grieta o una fisura.

10

Los funcionales habitualmente estudiados en el estado de la técnica son por un lado, parámetros estadísticos (como la media, la mediana, la desviación estándar, el sesgo, la kurtosis, el valor eficaz, el mínimo, el máximo, el valor de pico-pico, el valor de pico, el factor de forma o el factor de cresta) y por otro, representaciones de la señal que permitan estudiarla tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia.

15

Respecto a las representaciones en el dominio de la frecuencia, tradicionalmente han sido utilizadas para examinar los picos de frecuencias en los que se modifica la amplitud o que se ven desplazados por la presencia de un defecto. Esto es debido a que la presencia de una grieta en un elemento estructural, reduce la rigidez del mismo, por lo que las frecuencias naturales se ven reducidas, y cambian los modos de vibración. El estudio de las frecuencias naturales ha sido siempre el primer paso para encontrar un indicador de daño en un elemento mecánico, ya que puede ser medido de forma fácil y rápida y que está poco contaminado por ruido experimental. Realizando un análisis exhaustivo por bandas de frecuencia, se detectan las diferencias de energía en determinadas franjas que indican la presencia de un defecto, pero la principal desventaja que tiene esta técnica, es que cuando aparece un defecto, los cambios en las frecuencias naturales son muy pequeños, y pueden ser tapados debido a errores experimentales.

20

25

30

En la presente invención, sin embargo, no se observan los modos de vibración, sino las señales de respuesta que aparecen durante el movimiento normal de la máquina asociada al eje rotatorio, con lo que se contará con la desventaja del ruido.

35

En cuanto a los funcionales que describen una señal en el dominio del tiempo y la frecuencia destaca la transformada wavelet, que es la elegida por la presente invención.

Este tipo de transformadas constituye una herramienta matemática muy apropiada para detectar defectos en elementos mecánicos. Una de las grandes ventajas es que permite trabajar en un modo multirresolución, lo que permite una localización eficiente de fenómenos locales en señales no estacionarias con transitorios rápidos. De la misma manera que con la transformada de Fourier se obtienen los coeficientes frecuenciales de los componentes sinusoidales de la señal, con la transformada wavelet se obtienen los coeficientes de correlación entre la señal y una función denominada wavelet madre. Dichos coeficientes de correlación además, dependen de la escala y de la posición de la wavelet madre. La wavelet madre es escogida por su morfología, por parecerse más a los efectos que se producen en las señales con la presencia de un defecto.

En los experimentos llevados a cabo por la presente invención, en una de sus realizaciones, se seleccionan un conjunto de wavelet madre para evaluar cuál es la que mejor correlación presenta con los defectos evaluados. Se determina que la familia Daubechies, y en particular la Daubechies 6, es la que mejor se adapta.

La transformada wavelet continua (o sus siglas en ingles CWT), es un operador lineal que asocia cada señal de energía finita con una función particular, denominada wavelet madre (21), elegida convenientemente en función de la señal. Una vez seleccionado el instante y la escala de observación, la CWT permite analizar estructuras de la señal a través de coeficientes de correlación (22), en lugar de analizar la totalidad de la señal (23), como se observa en la figura 2.

La ventaja de la transformada wavelet continua, es que es una herramienta muy útil para detectar, caracterizar y clasificar señales con características espectrales complejas, contenidos transitorios y otras propiedades relacionadas con señales no estacionarias.

La formulación matemática de la transformada wavelet continua es la siguiente:

$$T(a, b) = w(a) \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{Eq 1})$$

Donde $X(t)$ es la señal temporal y ψ una función wavelet madre. $w(a)$ es una función de ponderación. En la ecuación 1, b se relaciona con el posicionamiento y a con la escala. La función de ponderación se utiliza por razones de conservación de la energía (garantiza que los wavelets tendrán la misma energía en cada escala). $T(a, b)$ son los coeficientes wavelets que dependen de cada escala a y del desplazamiento b . El producto de la wavelet conjugada con la señal es integrado durante todo el rango de la señal, lo que se conoce matemáticamente como una convolución.

Partiendo de la definición de la transformada wavelet continua, el trabajar con transformaciones de wavelets discretas es una práctica habitual. Esto se debe a su eficacia computacional y a que normalmente se trabaja con señales de datos discretos. Lo más común a la hora de discretizar la CWT es emplear la rejilla diádica, donde $a = 2^i$. En este caso, la transformada viene dada por:

$$T(2^i, b) = \frac{1}{2^i} \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{2^i}\right) dt \quad (\text{Eq 2})$$

Cada i se denomina octava, y consiste en cada uno de los niveles en los que se descompone la señal. Las escalas bajas tienen en cuenta las frecuencias bajas y las escalas altas, las frecuencias mayores. Cuando se usan wavelets ortonormales, lo habitual es utilizar un procedimiento denominado *diezmado*. Este método consiste en descomponer la señal en un número de coeficientes proporcional a la escala analizada. Esto hace que la señal tenga distinto número de coeficientes en cada escala. Físicamente, refleja el hecho de que las frecuencias menores de una señal necesitan menos coeficientes para ser representadas.

Tanto el análisis multirresolución (MRA) como el análisis de transformada wavelet en paquetes (WPT) son una extensión de la transformada wavelet discreta, donde se procesa una señal discreta X a diferentes bandas de frecuencia y con diferentes resoluciones, al descomponer la señal en una información de aproximación (32) y otra de detalle (33) con filtros recursivos paso alto (34) y paso bajo (35), tal y como se observa en la figura 3.

La aproximación contiene la información de las componentes de alta escala y baja frecuencia, mientras que los detalles contienen la información de baja escala y de alta frecuencia.

La principal diferencia entre los métodos MRA y el análisis mediante WPT, es fundamentalmente que en el análisis MRA se descomponen únicamente los parámetros de aproximación, perdiendo la información del detalle y de los detalles de aproximación, mientras que en el análisis mediante WPT se descomponen tanto detalle como aproximación en cada uno de los niveles.

La figura 4 muestra el árbol de descomposición a nivel 3 de una señal mediante el análisis WPT, en la que sí se tienen en cuenta todas las descomposiciones, tanto de aproximación como de detalle. En dicha figura, los vectores de coeficientes de descomposición se denotan como posiciones nodales de la forma $W(k,j)$, donde k indica el nivel de descomposición (en

este caso de $k=0,1,2,3$) y j la posición del nodo dentro de su nivel de descomposición. El nodo $W(0,0)$ representa la señal original.

En este caso, el algoritmo de descomposición es idéntico al análisis multirresolución, salvo que en este caso se descomponen tanto los coeficientes de aproximación como los de detalle. Por tanto, si cada vector de coeficientes de correlación, $W(k,j)$, tiene la siguiente forma:

$$W(k,j) = \{w_1(k,j), \dots, w_N(k,j)\} = \{w_i(k,j)\} \quad (\text{Eq 3})$$

La recomposición de la señal, en este caso, debe tener en cuenta los ocho vectores de coeficientes (paquetes), $W(3,j)$ correspondientes al nivel 3, según la siguiente ecuación:

$$W(0,0) = \sum_{j=0}^7 |w_i(k,j)|^2 \quad (\text{Eq 4})$$

El concepto de energía utilizado en el análisis wavelet en paquetes está estrechamente ligado a las conocidas nociones derivadas de la Teoría de Fourier. La energía de los paquetes wavelet se obtiene a partir de la suma de los cuadrados de los coeficientes de cada paquete:

$$E_{k,j} = \sum_i |w_i(k,j)|^2 \quad (\text{Eq 5})$$

Para obtener la energía relativa se calcula el total de la energía de la señal antes de la descomposición wavelet:

$$E_{total} = \sum_j E_{k,j} \quad (\text{Eq 6})$$

Finalmente, la energía relativa de cada paquete wavelet j en el nivel de descomposición k , está definida por:

$$e_{k,j} = \frac{E_{k,j}}{E_{total}} \quad \text{donde} \quad \sum_j e_{k,j} = 1 \quad (\text{Eq 7})$$

La figura 5 muestra en porcentajes el reparto de la energía de una señal de ejemplo, en los distintos niveles de descomposición (figura 5a), y en el nivel 3 específicamente (figura 5b), obtenidos mediante análisis WPT.

De acuerdo a distintos ensayos de la presente invención, las señales se obtienen de ejes ferroviarios a escala 1/8, ensayados en un banco de ensayos llamado ROTOKIT. Las señales estudiadas, obtenidas con acelerómetros, provienen tanto de ejes sanos como de ejes con varios niveles de defecto (por ejemplo 16%, 33% y 50% del diámetro), y a distintas velocidades de ensayo (20Hz, 40Hz y 60Hz). La primera aproximación es tenida en cuenta como funcional óptimo para el sistema de clasificación la energía de los paquetes Wavelet ya que se ha determinado que es el de mayor relevancia para el estudio de defectos en elementos mecánicos y que permite reducir el número de datos a introducir en el sistema de

clasificación sin perder información relevante.

La figura 6 representa un esquema completo del método propuesto por la presente invención. En él pueden verse las siguientes etapas:

- 5 • Entrada (61): correspondiente a la adquisición de información del sistema a monitorizar (por ejemplo se usa el sistema Rotokit o sistema real). Se realiza la adquisición de señal de tipo vibratoria por medio de un sensor o más específicamente un acelerómetro.
- 10 • Procesamiento de la señal (62): Donde se trata de extraer la información relevante del estado del eje. En esta etapa se realizarán filtrado y acondicionamiento de señal, así como la extracción de los patrones de energía de la señal adquirida.
- 15 • Sistema clasificador (63): Que involucra a la selección del sistema más prometedor así como la configuración más adecuada.

La salida (64) del sistema genera un diagnóstico que se corresponde con el estado real de funcionamiento del eje. En primera aproximación se trabaja con las condiciones eje sano/eje defectuoso y, a medida que se obtenga mayor información en la entrada mediante el

20 entrenamiento del sistema, se realiza una discriminación de las condiciones de fallo que irían de leves a graves, según los distintos niveles de gravedad establecidos previamente.

Como ya ha sido explicado anteriormente, el funcional óptimo escogido para realizar comparaciones y/o clasificaciones es la energía de los paquetes wavelet. Visualmente es muy sencillo comprobar las diferencias entre patrones de energía, tal y como muestran las

25 figuras 7a y 7b. Dichas figuras se corresponden con los valores medios de energía de los paquetes, que son resultado de procesar las señales obtenidas en dos experimentos con el sistema girando a 20Hz con eje sano y eje con profundidad de defecto inferior al 33% del radio. En cuanto a la descomposición Wavelet, se ha realizado una descomposición de nivel 3 con wavelet madre Daubechies 6. En este ejemplo puede apreciarse que, en el caso de un

30 eje sin defecto, la energía de la señal se concentra fundamentalmente en los paquetes 2 y 4. A medida que aparece un defecto en el eje, dicha energía se reparte en el resto de los paquetes.

Para las tareas de clasificación y comparación con patrones se ha optado en la presente

35 invención por utilizar una arquitectura de red neuronal artificial (RNA). De entre todas las

posibilidades se han hecho distintas pruebas para comprobar cuál es la más adecuada para el caso particular de detección de fallos en ejes mediante la ejecución de distintos ensayos.

En los casos de prueba, de acuerdo a una realización de la invención, se han utilizado como patrones la energía de los paquetes wavelet obtenidos a partir de una wavelet madre Daubechies 6 y con un nivel de descomposición igual a 3. Es decir, se presentan a la red neuronal como entrada 8 niveles de energía correspondientes a los 8 paquetes (2^3), como los representados en la Fig. 7.

Se han realizado pruebas con dos tipos de RNA multicapa integradas en la toolbox de MATLABTM de fácil aplicación, que permitirán estudiar la aplicabilidad de este tipo de sistema de clasificación al caso particular de ejes de ferrocarril. Estas son la red de tipo FeedForward y la red de reconocimiento de patrones (pattern recognition):

- **La RNA Feed Forward (unidireccional)** se trata de una red neuronal multicapa con funciones de activación en su capa oculta de tipo sigmoidea. Se denomina Feed-Forward porque la información se propaga hacia delante y no hay ningún tipo de realimentación.

Se entrena esta red neuronal con los 8 valores de energía de los paquetes wavelet de las señales obtenidas con el sistema (patrones). En los ejemplos concretos que se muestran a continuación, se ha trabajado con 1000 señales, correspondientes con ejes sanos y ejes con defecto (el 16% profundidad de fisura respecto del diámetro del eje). El 75% de dichas señales se han utilizado para el entrenamiento de la red y el 25% (400 vectores patrón de dimensión 8) restante se le ha presentado a la red ya entrenada como sistema de validación. En esta configuración de red, se han utilizado 8 neuronas en la capa de entrada (correspondiente a la dimensión del vector patrón), 5 neuronas en la capa oculta y una neurona en la capa de salida correspondiente al resultado de la clasificación. En esta primera aproximación se ha elegido como respuesta: 0 para eje sano y 1 para eje con defecto.

En los resultados experimentales puede comprobarse la convergencia del error. En 26 iteraciones el algoritmo converge al valor establecido, sin embargo, el mejor valor de validación previa se consigue en la iteración 20 con un error de 0,0158. En cambio, una vez la red ya ha sido entrenada, al presentar nuevos patrones a clasificar se obtiene una tasa de éxito del 84,25%. Además el algoritmo presentado tiene una tasa de acierto del 100% cuando se le presenta

un eje con defecto.

- **RNA de reconocimiento de patrones (pattern recognition):** Este tipo de red tiene la misma arquitectura que la anterior, la diferencia estriba en el tipo de función de activación utilizada, el algoritmo de entrenamiento y la posibilidad que ofrece la herramienta de MATLABTM en personalizar la propia red. Ante las mismas condiciones en entrenamiento y validación (mismas señales utilizadas), los resultados obtenidos son de una tasa de acierto en la clasificación del 79.5%

Los buenos resultados obtenidos con el entrenamiento de las dos configuraciones de RNA sencillas presentadas anteriormente hacen un paso evidente el aplicar los mismos conceptos a otras redes más complejas y flexibles de gran aplicación en el campo de la clasificación como son: Perceptrón Multicapa (MLP), red de Función de base radial (RBF) y red probabilística PNN.

REIVINDICACIONES

1.- Método para detectar automáticamente fallos en un eje rotatorio, el método está caracterizado por que comprende los pasos de:

- 5 a) adquirir, mediante al menos un sensor, una señal de tipo vibratorio del eje rotatorio;
- b) procesar, mediante un procesador, en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, la señal adquirida por el sensor, obteniendo como resultado de dicho procesado, unas medidas de energía de la señal adquirida;
- 10 c) comparar, en el procesador, las medidas de energía con unos patrones de energía previamente establecidos;
- d) determinar si existe algún fallo en el eje rotatorio en base a la comparación entre las medidas de energía y los patrones previamente establecidos.

2.- Método de acuerdo a la reivindicación 1 donde el procesado del paso b) comprende aplicar una transformada wavelet en paquetes a la señal adquirida.

3.- Método de acuerdo a la reivindicación 2, donde el aplicar la transformada wavelet a la señal adquirida comprende además escoger un nivel de descomposición para la señal adquirida y una wavelet madre.

4.- Método de acuerdo a cualquiera de las reivindicaciones anteriores donde los patrones de energía se encuentran distribuidos en paquetes que corresponden a distintas bandas de frecuencia de la señal adquirida.

5.- Método de acuerdo a cualquiera de las reivindicaciones anteriores donde además comprende, para establecer los patrones de energía, detectar los cambios de energía en una misma banda de frecuencia entre distintas señales obtenidas previamente del eje rotatorio.

6.- Método de acuerdo a cualquiera de las reivindicaciones anteriores donde la comparación de las medidas de energía con los patrones previamente establecidos se realiza mediante una red neuronal.

7.- Método de acuerdo a la reivindicación 6 donde la red neuronal se selecciona entre una red neuronal unidireccional, una red neuronal de reconocimiento de patrones, una red neuronal perceptrón multicapa, una red neuronal de función de base radial o una red neuronal probabilística.

8.- Método de acuerdo a la reivindicación 7 que además comprende una etapa de entrenamiento de la red neuronal donde se utilizan, como entrada de la red neuronal, señales de las que se conoce su resultado de salida.

9.- Método de acuerdo a la reivindicación 8 donde, durante la etapa de entrenamiento, en el caso de obtener una tasa de acierto inferior a un cierto umbral, el método además comprende incrementar el nivel de descomposición de la señal adquirida.

10.- Método de acuerdo a cualquiera de las reivindicaciones anteriores donde el eje rotatorio es un eje de ferrocarril montado, donde dicho ferrocarril se encuentra en movimiento.

11.- Método de acuerdo a cualquiera de las reivindicaciones anteriores que además comprende clasificar los fallos detectados en el eje rotatorio en distintos niveles de gravedad.

12.- Sistema para detectar automáticamente fallos en un eje rotatorio, el sistema está caracterizado por que comprende:

- un sensor configurado para adquirir una señal de tipo vibratorio del eje rotatorio;
- un procesador, en comunicación con el sensor, configurado para analizar señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, obtener medidas de energía de dichas señales, comparar las medidas de energía con unos patrones de energía previamente establecidos y determinar si existe algún fallo en el eje rotatorio de acuerdo a la comparación de las medidas de energía con los patrones previamente establecidos.

13.- Sistema de acuerdo a la reivindicación 12 donde el sensor es un acelerómetro.

14.- Sistema de acuerdo a cualquiera de las reivindicaciones 13, 14 donde el eje rotatorio es un eje de ferrocarril.

15.- Programa informático que comprende medios de código de programa adaptados para realizar las etapas del procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1-11, cuando dicho programa se ejecuta en un procesador de propósito general, un procesador de señal digital, una FPGA, un ASIC, un microprocesador, un microcontrolador, o cualquier otra forma de hardware programable.

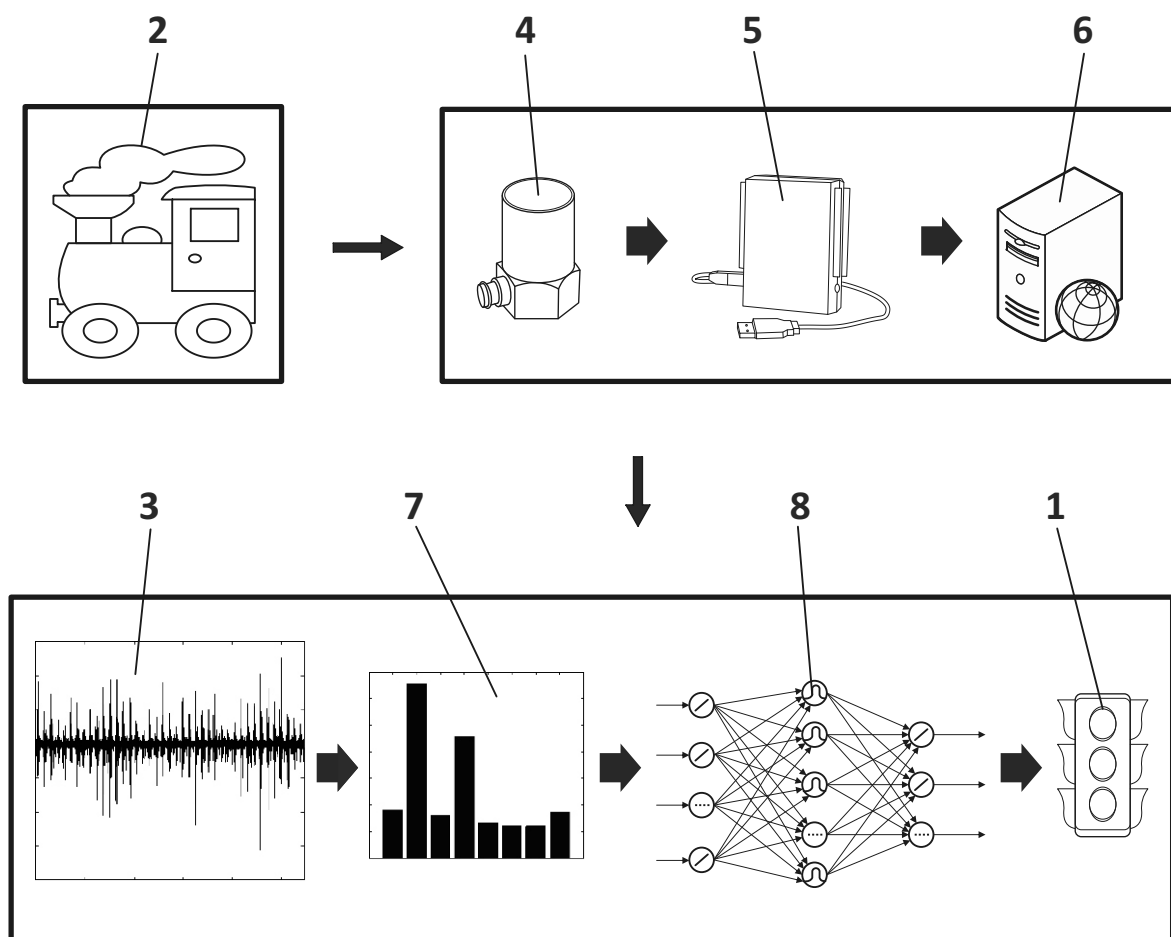


FIG. 1

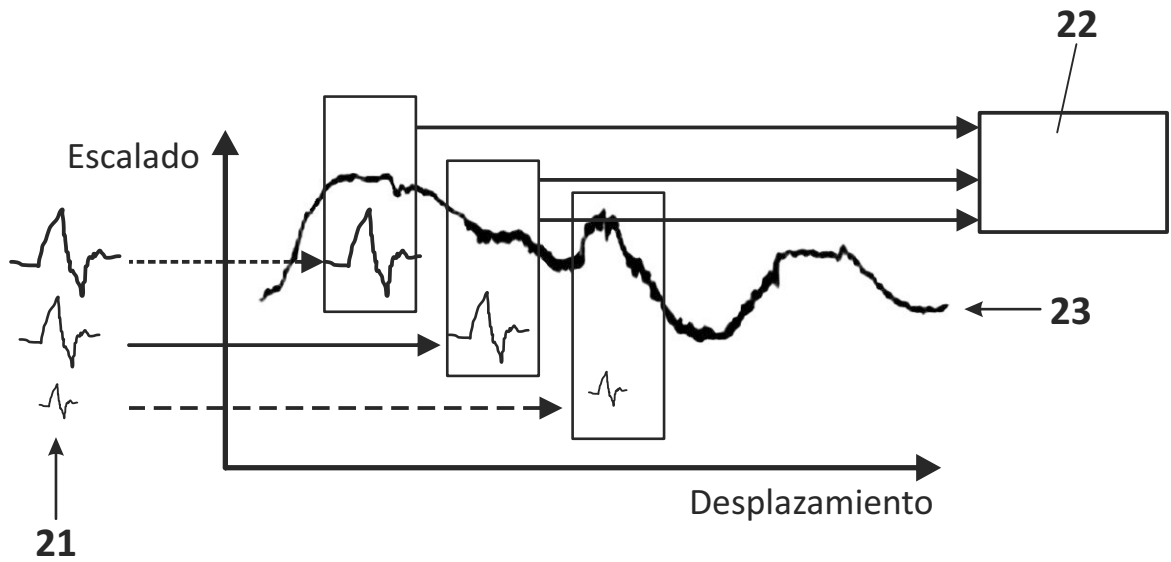


FIG. 2

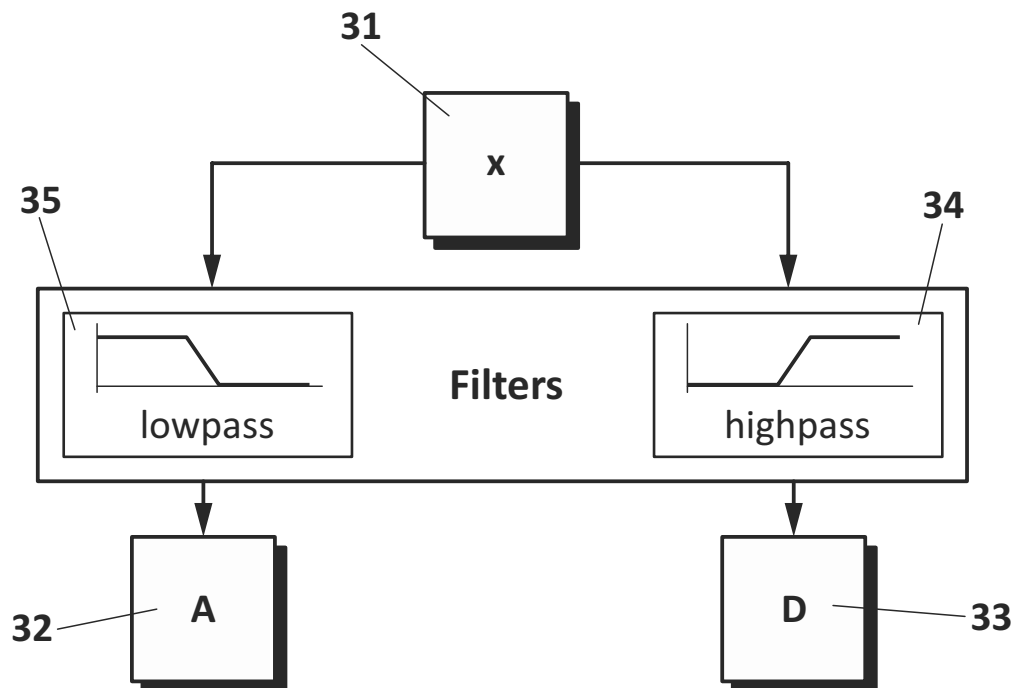


FIG. 3

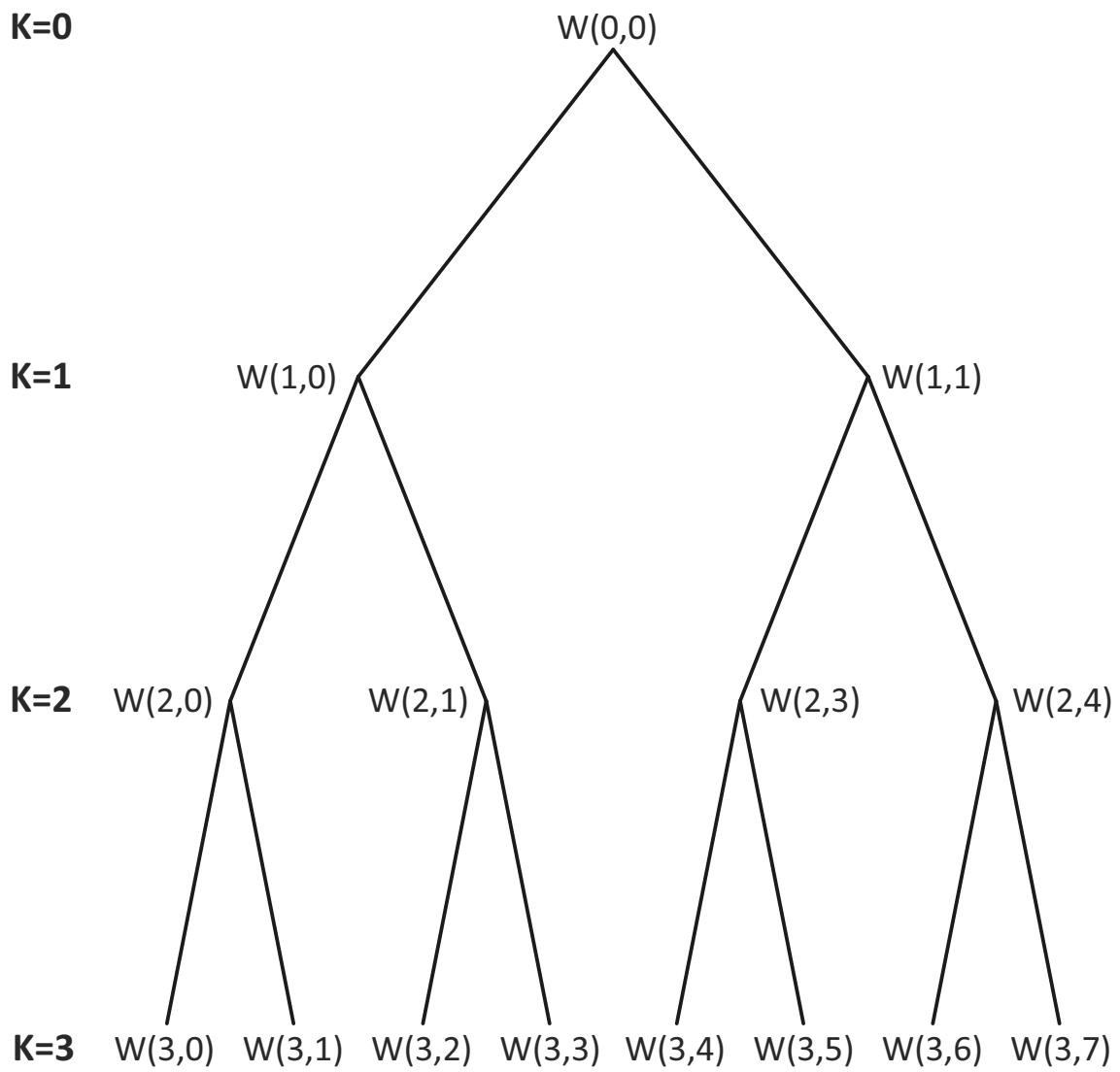
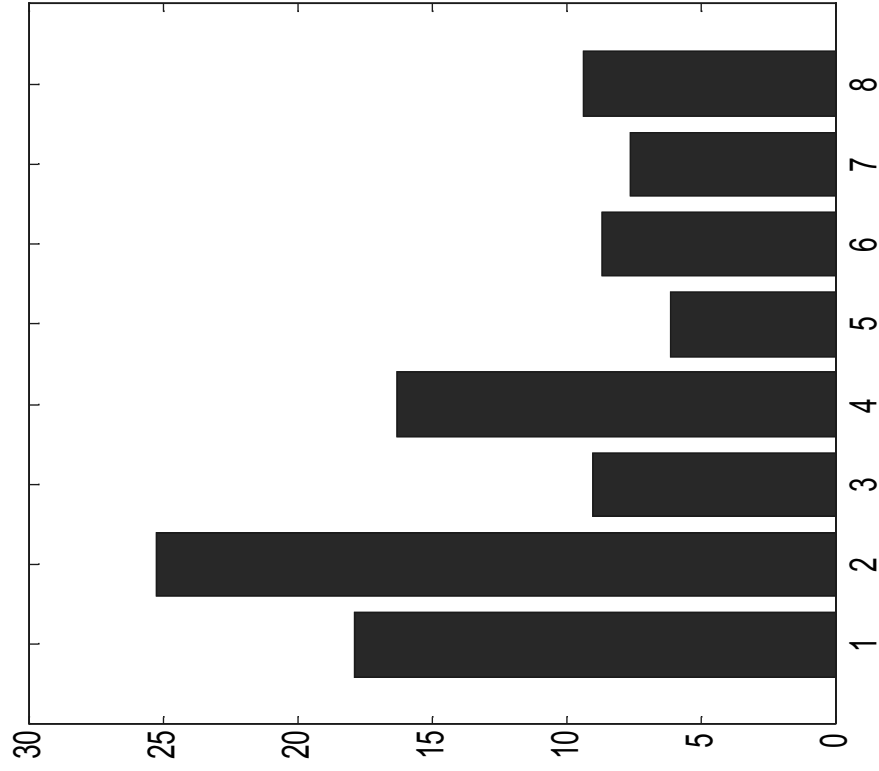
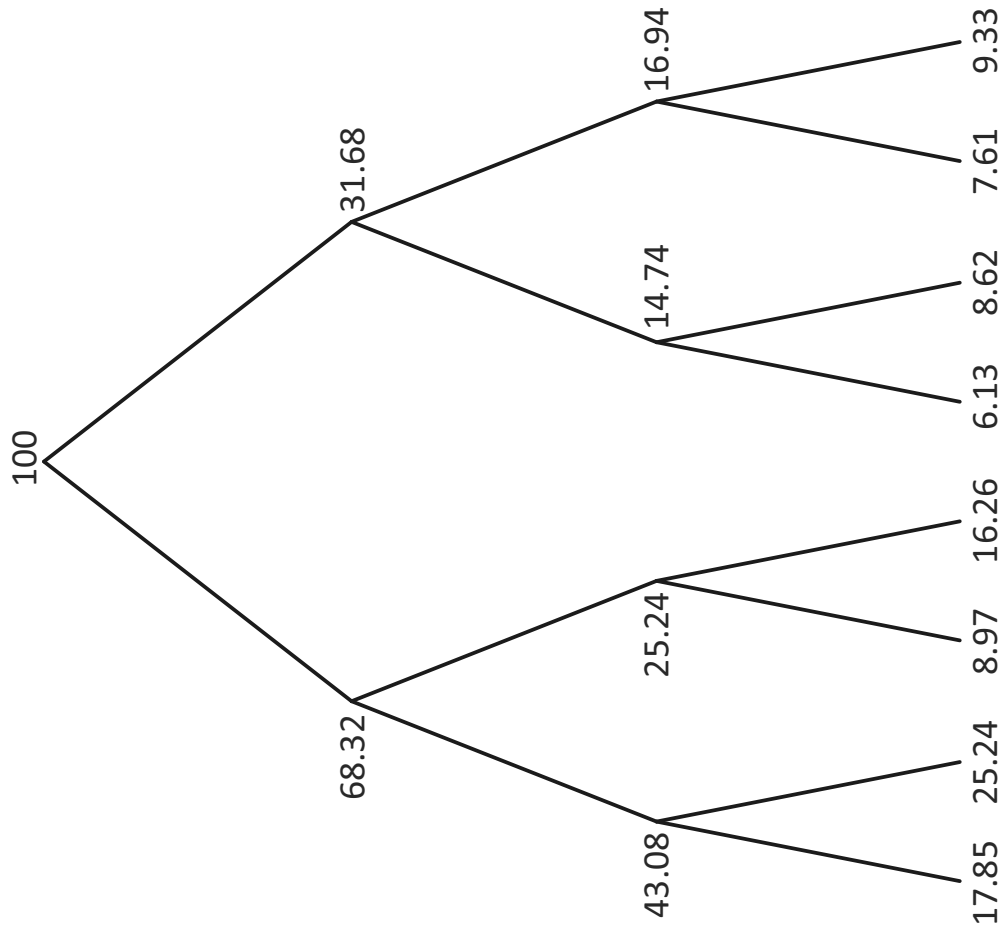


FIG. 4



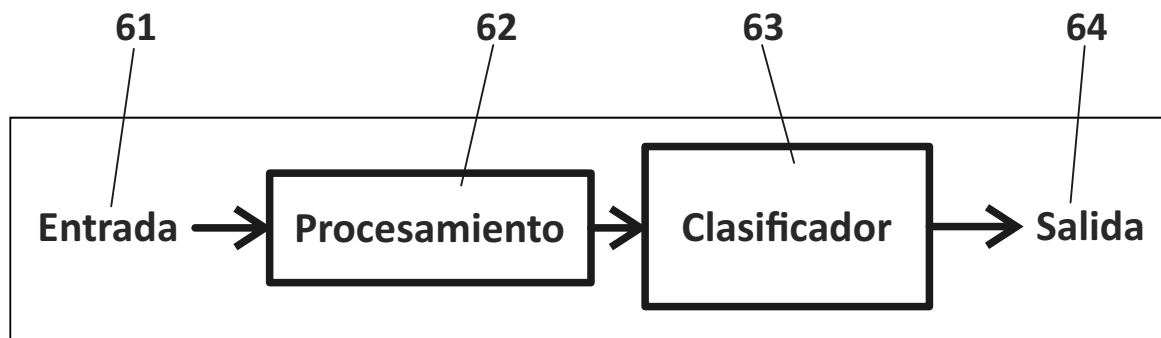


FIG. 6

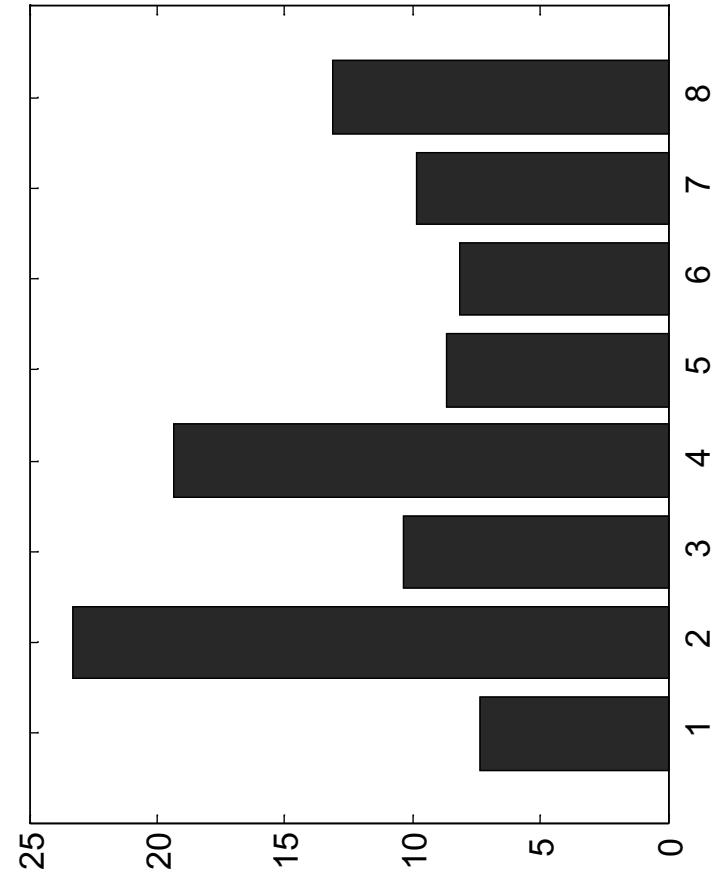


FIG. 7b

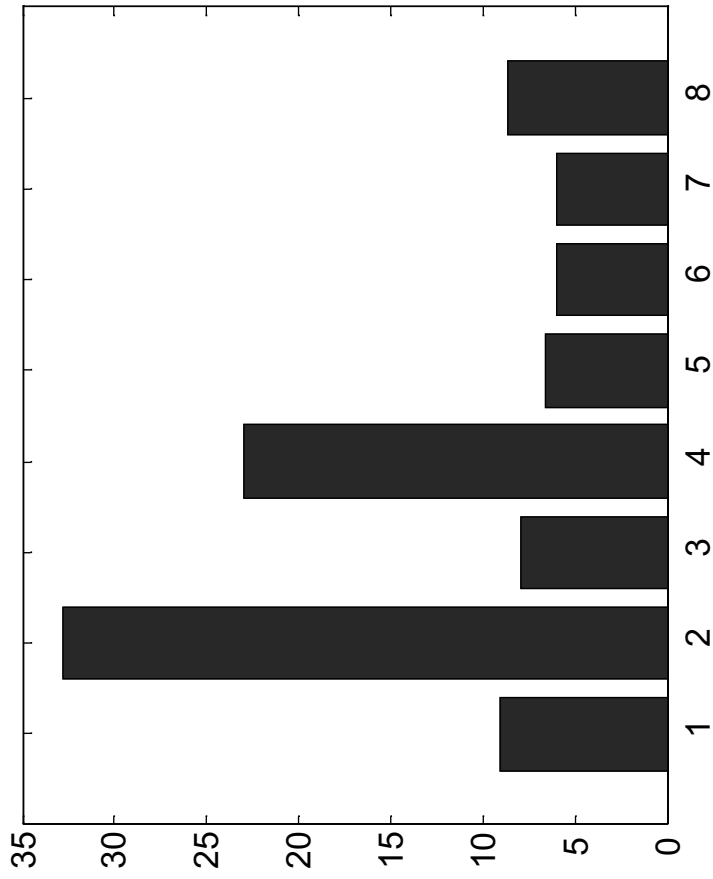


FIG. 7a



- ②① N.º solicitud: 201430606
②② Fecha de presentación de la solicitud: 24.04.2014
③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: **G06F17/14** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	US 6382029 B1 (SHOURESHI RAHMAT A et al.) 07.05.2002, resumen; Descripción: columna 8, líneas 16-25.	1-15
A	US 2011023610 A1 (UME IFEANYI CHARLES et al.) 03.02.2011, descripción: párrafos [0065]-[0075]; reivindicaciones.	1-15
A	WO 2005031502 A2 (HYEUNG-YUN KIM) 07.04.2005, todo el documento.	1-15
A	US 2002194159 A1 (KAMATH CHANDRIKA et al.) 19.12.2002, todo el documento.	1-15
A	US 6857553 B1 (HARTMAN DANIEL A et al.) 22.02.2005, todo el documento.	1-15
A	US 2006069520 A1 (GORINEVSKY DIMITRY et al.) 30.03.2006, todo el documento.	1-15
A	US 2004022436 A1 (PATTI PAUL et al.) 05.02.2004, todo el documento.	1-15

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones

☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
08.05.2015

Examinador
M. Muñoz Sánchez

Página
1/4

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G06F

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 08.05.2015

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones 1-15	SI
	Reivindicaciones	NO
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)	Reivindicaciones	SI
	Reivindicaciones 1-15	NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	US 6382029 B1 (SHOURESHI RAHMAT A et al.)	07.05.2002
D02	US 2011023610 A1 (UME IFEANYI CHARLES et al.)	03.02.2011
D03	WO 2005031502 A2 (HYEUNG-YUN KIM)	07.04.2005
D04	US 2002194159 A1 (KAMATH CHANDRIKA et al.)	19.12.2002
D05	US 6857553 B1 (HARTMAN DANIEL A et al.)	22.02.2005
D06	US 2006069520 A1 (GORINEVSKY DIMITRY et al.)	30.03.2006
D07	US 2004022436 A1 (PATTI PAUL et al.)	05.02.2004

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

Se considera D01 el documento más próximo del estado de la técnica al objeto de la solicitud.

Reivindicaciones independientes

Reivindicación 1: El documento D01, divulga un método y un sistema de identificación de daños en un conductor en servicio. El sistema implementa un método que consiste en:

- ☐ aplicar una señal transmitida y recibir una señal de retorno
- ☐ extraer unas características de la señal de retorno
- ☐ clasificar dichas características

En el documento D01 se plantea que la extracción de características se haga mediante un análisis wavelet (paquetes de ondas) de la energía de la señal de retorno y que la clasificación se haga mediante una red neuronal (Resumen).

Las características extraídas se comparan con unos patrones almacenados previamente que definen el tipo de daño (columna 8, línea 16 – columna 8, línea 25).

La diferencia entre el documento D01 y la reivindicación 1 es la pieza a la que se aplica el método siendo éste, sin embargo, esencialmente el mismo y no requiriendo una adaptación mayor que la de elegir por tanteos o de la experiencia ya acumulada los patrones de daños siendo esta adaptación, en conclusión, evidente para el experto en la materia. A modo de ejemplo se cita el documento D02 ilustra la aplicabilidad general del método reivindicado (en este caso para análisis no destructivo de soldaduras), (párrafos [0065]-[0075], reivindicaciones). Por tanto, el documento D01 afecta a la actividad inventiva de la reivindicación 1 según el art. 8.1 de la Ley 11/86 de Patentes.

Reivindicación 12: del análisis de la reivindicación 1 se concluye también que el documento D01 afecta a la actividad inventiva de la reivindicación 12 según el art. 8.1 de la Ley 11/86 de Patentes.

Reivindicación 15: el programa reivindicado implementa estrictamente el procedimiento de la reivindicación 1 sin precisar características técnicas de su gestión de memoria, procesador u otros ejecutándose secuencialmente, de forma evidente las etapas de dicho procedimiento. Así, el documento D01 también afecta a la actividad inventiva de la reivindicación 15 según el art. 8.1 de la Ley 11/86 de Patentes.

Reivindicaciones dependientes

Reivindicaciones 2-11 y 13-14: las alternativas incluidas en estas reivindicaciones son comúnmente conocidas en el campo técnico de la solicitud. A efectos ilustrativos se citan, además de los documentos D01 y D02, ya mencionados, los documentos D03, D04, D05, D06 y D07.

Así, el documento D01 también afecta a la actividad inventiva de las reivindicaciones 2-11 y 13-14 según el art. 8.1 de la Ley 11/86 de Patentes.