

(12) SOLICITUD INTERNACIONAL PUBLICADA EN VIRTUD DEL TRATADO DE COOPERACIÓN EN MATERIA DE PATENTES (PCT)

(19) Organización Mundial de la Propiedad  
Intelectual  
Oficina internacional



(10) Número de Publicación Internacional  
**WO 2010/029204 A1**

(43) Fecha de publicación internacional  
18 de marzo de 2010 (18.03.2010)

(51) Clasificación Internacional de Patentes:  
G01H 1/00 (2006.01) G01M 1/16 (2006.01)

(21) Número de la solicitud internacional:  
PCT/ES2009/070374

(22) Fecha de presentación internacional:  
10 de septiembre de 2009 (10.09.2009)

(25) Idioma de presentación: español

(26) Idioma de publicación: español

(30) Datos relativos a la prioridad:  
P200802614  
15 de septiembre de 2008 (15.09.2008) ES

(71) Solicitante (para todos los Estados designados salvo US): **CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)** [ES/ES]; C/ Serrano, 117, E-28006 Madrid (ES).

(72) Inventores: e

(75) Inventores/Solicitantes (para US solamente): **DEL TORO MATAMOROS, Raúl Mario** [CU/ES]; Instituto De Automática Industrial (IAI), Km. 22,800, Ctra. Madrid-Valencia, E-28500 Arganda del Rey (Madrid) (ES). **SCHMITTDIEL, Michael Charles** [US/ES]; Instituto De Automática Industrial (IAI), Km. 22,800, Ctra. Madrid-Valencia, E-28500 Arganda del Rey (Madrid) (ES). **HABER GUERRA, Rodolfo Elias** [ES/ES]; Instituto De Automática Industrial (IAI), Km.

[Continúa en la página siguiente]

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR DETECTING, IN REAL TIME, THE IMBALANCE OF THE HEAD IN A HIGH-PRECISION ROTARY MECHANISM

(54) Título : PROCEDIMIENTO Y SISTEMA PARA LA DETECCIÓN EN TIEMPO REAL DEL DESBALANCEO DEL CABEZAL EN UN MECANISMO ROTATORIO DE ALTA PRECISIÓN

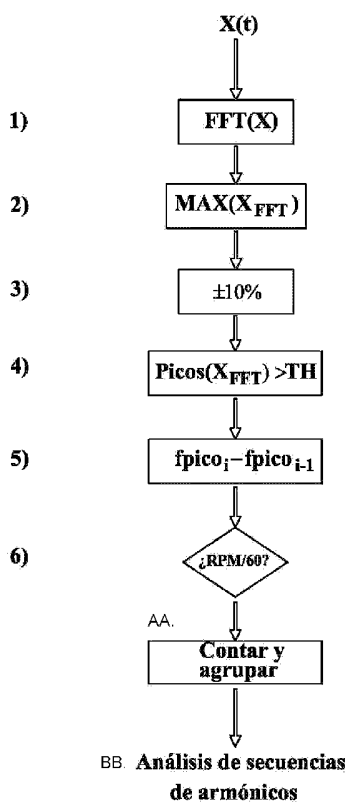


FIG. 1

AA...count and group together

BB... analysis of sequences of harmonics

(57) Abstract: The invention relates to a method for detecting, in real time, an imbalance of the head in a high-precision rotary mechanism, and to the system for carrying out said method. The method comprises the following steps: a) the signal X(t) corresponding to the acceleration of the vibrations of the head is acquired by means of an acquisition means at a sampling rate FS; and b) it is determined, from the signal X(t) obtained, whether the head is imbalanced.

(57) Resumen: El objeto principal de la invención es un procedimiento para detectar en tiempo real un desbalanceo del cabezal en un mecanismo rotatorio de alta precisión, así como el sistema para llevar a cabo el procedimiento. El procedimiento comprende las siguientes operaciones: a) Adquirir, mediante un medio de adquisición a una frecuencia de muestreo FS, la señal X(t) correspondiente a la aceleración de las vibraciones del cabezal; b) Determinar, a partir de la señal X(t) obtenida, si el cabezal está desbalanceado.

WO 2010/029204 A1



22,800, Ctra. Madrid-Valencia, E-28500 Arganda del Rey (Madrid) (ES).

(74) **Mandatario:** PONS ARIÑO, Ángel; Glorieta de Rubén Darío, 4, E-28010 Madrid (ES).

(81) **Estados designados** (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección nacional admisible): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) **Estados designados** (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección regional admisible):

ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europea (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Publicada:**

- con informe de búsqueda internacional (Art. 21(3))
- antes de la expiración del plazo para modificar las reivindicaciones y para ser republicada si se reciben modificaciones (Regla 48.2(h))

**PROCEDIMIENTO Y SISTEMA PARA LA DETECCIÓN EN TIEMPO  
REAL DEL DESBALANCEO DEL CABEZAL EN UN MECANISMO  
ROTATORIO DE ALTA PRECISIÓN**

5

**DESCRIPCIÓN**

**OBJETO DE LA INVENCION**

El objeto principal de la presente invención es un procedimiento para  
10 detectar en tiempo real un desbalanceo del cabezal en un mecanismo  
rotatorio de alta precisión, así como el sistema para llevar a cabo dicho  
procedimiento.

**ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

15

Es conocido que pequeños desbalanceos del cabezal de un  
mecanismo rotatorio de alta precisión puede dar lugar a graves pérdidas de  
calidad en el resultado del proceso en cuestión.

20

Por ejemplo, en el campo del mecanizado de ultra-precisión, en  
ocasiones el objetivo es conseguir superficies con una baja rugosidad,  
adecuadas para aplicaciones en que la calidad superficial es un factor clave.  
Un cabezal desbalanceado produce vibraciones que tienen una influencia  
directa en la precisión del corte, y por lo tanto en la calidad del acabado  
25 superficial. Por tanto, el estudio de las vibraciones en los procesos de  
mecanizado tiene una gran importancia para la detección de anomalías.

30

La monitorización del mecanizado en tiempo real es conocida en la  
técnica. En particular, los documentos US 4131837, US 5917726, US  
6161055, US 6549869 y US 6947800 reivindican dispositivos o métodos para  
la monitorización en tiempo real de diferentes variables o eventos en el

mecanizado convencional empleando diferentes tipos de sensores, ya sean piezoeléctricos u opto-electrónicos. La patente US 7024063 también describe un método y aparato para la monitorización en tiempo real de la operación de pulido de capas de obleas semiconductoras.

5

Las vibraciones en elementos rotatorios de rodamientos mecánicos, bien en máquinas centrífugas o en máquinas herramientas convencionales, también se han estudiado a fondo, desarrollándose diferentes métodos y dispositivos para su detección y posterior análisis. En particular, las patentes  
10 US 3908444, EP 0011101, US 5537182, EP 1140405, US 6323943, US 6694213, US 7043376, US 7073384 y US 7386401 describen diferentes métodos para la medición o detección de vibraciones en los ejes de máquinas rotativas empleando indistintamente sensores opto-electrónicos o piezoeléctricos.

15

La patente US 4432253 describe el diseño de un sistema de auto-compensación del desbalanceo de masas para cabezales de centrífugas y tornos de alta velocidad, entre otros, mediante la inyección automática de fluidos en el sistema de rodamiento del eje.

20

También relacionada con el desbalanceo de cabezales de motores, la solicitud US 2007/0263321 describe un sistema de control del desbalanceo de masas en el cabezal del motor de discos duros.

25

La patente US 5356225 presenta un sistema para controlar el flujo de aire en rodamientos hidrostáticos de mecanismos con un alto nivel de rigidez, manteniendo un bajo nivel de presencia de vibraciones.

30

Finalmente, para tareas de acabado superficial de lentes ópticas mediante mecanizado de ultra-precisión se ha desarrollado en la patente US 5861114 un método para la supresión automática de las vibraciones que se

producen en la herramienta de corte. Las patentes US 7036408 y US 7178433 describen dispositivos para fresado o torneado que utilizan herramientas con punta de diamante para la fabricación de lentes ópticas.

## 5 DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

En el presente documento, el término “mecanismo rotatorio de alta precisión” pretende hacer referencia a todo tipo de procesos donde existe un cabezal que rota a alta velocidad, incluyendo por ejemplo mecanismos rotatorios con rodamientos hidrostáticos. En particular, se hace especial referencia a los procesos de mecanizado de ultra precisión dirigidos a obtener rugosidades superficiales en la nano-escala, y más particularmente al torneado con punta de diamante y otros procesos similares.

Así, a través de una monitorización inteligente del balanceo del cabezal de un mecanismo rotatorio de alta precisión, se puede garantizar que el giro del cabezal se lleve a cabo en las condiciones idóneas y no se produzcan balanceos que afecten a la calidad del proceso en cuestión.

Un primer aspecto de la invención está dirigido a un procedimiento para la detección en tiempo real del desbalanceo del cabezal en un mecanismo rotatorio de alta precisión, donde el cabezal gira a una velocidad RPM, que comprende las siguientes operaciones:

a) Adquirir, mediante un medio de adquisición a una frecuencia de muestreo FS, la señal  $X(t)$  correspondiente a la aceleración de las vibraciones del cabezal.

La señal  $X(t)$  se adquiere utilizando un medio de adquisición adecuado, en particular un acelerómetro conectado a una tarjeta de

adquisición. El acelerómetro se sitúa en cualquier línea radial al eje de giro, preferentemente sobre el eje X del cabezal, ya que cuanto más cerca esté del cabezal mayor será la potencia de la señal obtenida, aunque siempre sin interferir en el proceso en cuestión.

5

b) Determinar, a partir de la señal  $X(t)$  obtenida, si el cabezal está desbalanceado.

En esta segunda operación, se emplean los datos obtenidos en la  
10 operación anterior para determinar si las vibraciones obtenidas se deben a un desbalanceo de dicho cabezal. Para ello, se realizan las siguientes operaciones:

b1) Eliminar la componente de DC de la señal  $X(t)$  y aplicar a  $X(t)$  una  
15 transformación para pasar al dominio de la frecuencia, obteniendo la transformada  $T[X(t)]$ .

La transformada puede ser cualquiera que sirva para pasar los  
20 datos de  $X(t)$  al dominio de la frecuencia. En realizaciones particulares de la invención se emplea el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Además, para calcular la transformada que se aplica a  $X(t)$  se  
25 utiliza un número de puntos proporcional a la relación entre la frecuencia de muestreo FS y la frecuencia de giro del cabezal RPM.

b2) Buscar el máximo de la transformada  $T[X(t)]$  y su frecuencia correspondiente, obteniendo  $MAX(T[X(t)])$  y  $f_{MAX(T[X(t)])}$ .

Una vez se ha pasado la señal de aceleración al dominio de la frecuencia, se busca el pico o armónico de valor máximo del espectro y su frecuencia correspondiente.

- 5 b3) Buscar, dentro del rango de análisis  $(1 \pm p) \cdot f_{MAX(T[X(t)])}$ , aquellos armónicos cuyo valor supera un valor umbral TH.

10 A partir del armónico de valor máximo localizado en la operación anterior, se buscan en sus alrededores los armónicos cuyo valor supere un valor umbral TH. En una realización preferida de la invención, p toma valores entre 0,05 y 0,20, y en una realización aún más preferida de la invención, p toma valores entre 0,08 y 0,12.

15 El valor umbral TH se puede determinar como un porcentaje del valor de ruido en todo el espectro, como un valor porcentual del armónico principal del espectro, como una media geométrica de ambos valores, o como la media aritmética del espectro en todo el rango de frecuencias en análisis. Seleccionando un valor adecuado de este umbral se puede mejorar en gran medida la eficiencia del  
20 procedimiento descrito.

- b4) Buscar, entre los armónicos localizados en la operación anterior, grupos de armónicos separados entre sí por distancias correspondientes a la frecuencia de giro del cabezal.

25 En esta operación se analiza la posición en frecuencia de cada uno de los armónicos localizados en la operación anterior, determinando si existe otro armónico a una distancia aproximadamente equivalente a la frecuencia de giro del cabezal, es decir, a la distancia (RPM/60) Hz. Al decir que los armónicos están separados  
30

una distancia equivalente a la frecuencia de giro del cabezal se entiende que no es necesario que dicha distancia sea exacta, sino que se determina un rango o ventana alrededor de (RPM/60). Al final de esta operación, se descubre si los armónicos son independientes unos de otros, o bien forman grupos separados dicha distancia de aproximadamente (RPM/60) Hz entre sí. Preferentemente, se considera que un grupo mínimo está formado al menos por dos armónicos.

5  
10 b5) Determinar, si existe al menos un grupo de armónicos separados entre sí por distancias correspondientes a la frecuencia de giro del cabezal, que el cabezal está desbalanceado.

15 Por último, si se localiza al menos un grupo de armónicos, entonces se puede determinar que el cabezal está desbalanceado en mayor o menor medida. Es decir, mediante este procedimiento se podrían detectar tanto grandes balanceos perjudiciales para el resultado del proceso en cuestión como pequeños balanceos cuyas consecuencias se podrían despreciar.

20 Adicionalmente, otra realización particular del procedimiento de la invención comprende además la operación de:

25 c) Estimar el grado de desbalanceo del cabezal.

Para estimar el grado de desbalanceo del cabezal se llevan a cabo las siguientes operaciones:

30 c1) Seleccionar, de entre los grupos de armónicos localizados, el grupo principal, que es el grupo que tiene el mayor número de armónicos con mayor potencia.



5 Para cada grupo de armónicos se toma su número total, el de mayor valor y la suma de sus valores, de forma que se tiene una noción del número que lo componen y de la potencia de cada uno de ellos. A continuación, los grupos se ordenan primeramente según la cantidad de armónicos que contienen, y en segundo lugar por la suma de sus valores, seleccionándose como grupo principal el que contiene mayor número de armónicos con mayor potencia.

10 c2) Calcular un parámetro PR que mide la potencia relativa de los armónicos del grupo principal respecto al armónico principal de dicho grupo principal.

15 El parámetro PR se podría calcular de cualquier modo, siempre que fuese fundamentalmente una medida de la relación entre el valor del armónico principal del grupo principal y la suma de los valores de todos los armónicos del grupo. Sin embargo, en una realización particular de la invención, el parámetro PR se define como:

$$PR = 1 - \frac{BPG + BP}{HSPG + BP}$$

20

donde: BPG es la potencia del armónico principal del grupo;  
BP es la componente frecuencial de mayor potencia en el rango del espectro analizado;  
HSPG es la suma de las potencias de los armónicos del grupo principal.

25

c3) Estimar, a partir del parámetro PR, el grado de desbalanceo del cabezal (UL).

La expresión que relaciona el parámetro PR y el grado de desbalanceo del cabezal UL se determina empíricamente a partir de un conjunto de datos experimentales, y por lo tanto se podrían emplear diferentes expresiones para ajustar los datos empíricos obtenidos. La presente solicitud de patente reivindica protección para cualquiera de las expresiones que se utilicen. En una realización particular de la invención, sin embargo, se emplea la siguiente ecuación:

$$UL = \frac{1}{m} \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{PR}{1-PR} \right) - n \right]$$

donde: UL es el grado de desbalanceo del cabezal;  
n y m son coeficientes ajustados experimentalmente.

En un segundo aspecto de la invención, se describe un sistema para la detección en tiempo real del desbalanceo del cabezal en un mecanismo rotatorio de alta precisión, que comprende los siguientes elementos:

- Un acelerómetro, situado sobre el eje X del cabezal, que adquiere la señal correspondiente a las aceleraciones de las vibraciones del cabezal;
- Un medio de procesamiento, conectado al medio de adquisición, que recibe dicha señal y determina si las vibraciones medidas son provocadas por un desbalanceo del cabezal.

## DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto

de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, 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:

Figura 1.- Muestra un diagrama de bloques del procedimiento de acuerdo con la presente invención.

Figuras 2 a 6.- Muestran el espectro en frecuencia de la señal de aceleración del cabezal, para diferentes velocidades de giro y grado de desbalanceo de cabezal. Para cada figura, la gráfica nombrada con la letra a) muestra todo el espectro en frecuencias, mientras que la nombrada con la letra b) muestra un detalle correspondiente al rango de análisis seleccionado.

Figura 7.- Muestra la potencia relativa entre picos contra el grado de desbalanceo del cabezal y la curva de ajuste.

Figura 8.- Muestra los datos experimentales del grado de desbalanceo contra la potencia relativa entre armónicos y la curva correspondiente al modelo inverso desarrollado.

Figura 9.- Muestra el error absoluto relativo, calculado de la aplicación del modelo a los datos experimentales de validación.

## **REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION**

Se describe a continuación un ejemplo de realización del procedimiento descrito dirigido específicamente a un proceso de mecanizado de ultra-precisión, haciendo referencia a las figuras adjuntas.

En este ejemplo, se utiliza un sistema que comprende:

- un acelerómetro piezoeléctrico con resolución de 10 mV/g, amplificador y acondicionador de señal;

5

- un ordenador industrial con tarjeta de adquisición de datos;

- un programa informático embebido en el ordenador para el procesamiento digital de la señal (adquisición y filtrado de datos), implementación del procedimiento de la invención e implementación de la interfaz gráfica de usuario para la muestra de resultados.

10

El procedimiento se basa principalmente en la búsqueda de secuencias de armónicos separados según la frecuencia de giro del cabezal, alrededor de un rango de un  $\pm 10\%$  (es decir,  $p=0,1$ ) de la frecuencia de la componente principal del espectro. Esta componente se puede ajustar automáticamente de antemano, ya que se corresponde con el armónico principal de la señal con el cabezal sin girar. Esto determinado de antemano permite mejorar el tiempo de cálculo del algoritmo. De existir secuencias de componentes de más de un mínimo de elementos se deduce que el cabezal está desbalanceado. La Fig. 1 muestra un algoritmo del procedimiento descrito.

15

20

### **Búsqueda de grupos de armónicos**

25

Como se ha explicado previamente, en una primera parte del procedimiento se buscan grupos de armónicos, que son indicativos de un desbalanceo del cabezal. Los pasos que se siguen son los siguientes:

- 1) De la señal medida se elimina la componente de DC restándole su valor medio. A continuación, en este ejemplo se calcula la Transformada Rápida de Fourier ( $X_{\text{FFT}} = \text{FFT}(X)$ )
- 5 2) Se busca el máximo del espectro ( $\text{MAX}_{X_{\text{FFT}}}$ ) y su frecuencia correspondiente ( $f_{\text{MAX}_{X_{\text{FFT}}}}$ ).
- 3) Se calcula el rango de análisis, que en este ejemplo es de entre 0,9 y 1,1 de  $f_{\text{MAX}_{X_{\text{FFT}}}}$ , ya que  $p=0,1$
- 10 4) Los armónicos se detectan calculando la pendiente del espectro de la señal, de existir cambio de signo de positivo a negativo en la pendiente, existe un máximo en la señal original. Si el valor del espectro en este punto sobrepasa un umbral y además la tendencia de la pendiente antes y después de este punto cambia de signo,
- 15 entonces se considera que el máximo encontrado es un armónico del espectro.
- 5) Se calcula la distancia en frecuencia de los armónicos, buscando aquellos que estén separados una distancia dentro de una ventana centrada en la frecuencia de giro ( $RPM / 60$ )  $\pm$  una tolerancia, que en este caso se obtiene como un porcentaje de la velocidad de giro.
- 20 6) De encontrarse armónicos separados una frecuencia dentro de dicha ventana, entonces se cuentan y se agrupan según el orden de las secuencias que existan.
- 25

Para el cálculo de la transformada de Fourier se debe utilizar un número de puntos ( $N_{\text{fft}}$ ) proporcional a la relación entre la frecuencia de muestreo ( $FS$ ) y la frecuencia de giro del cabezal,

30

$$N_{\_fft} = NxRPM \cdot FS \cdot \frac{60}{RPM}$$

donde,  $NxRPM$  es la cantidad de puntos, en el espectro de la señal, entre armónicos consecutivos de la frecuencia de giro.

5

Además, el valor umbral (TH) para la detección de los armónicos, se puede determinar bien como un valor fijo, o bien a partir del nivel de ruido en el espectro, como un valor porcentual del armónico principal del espectro, como una media geométrica de ambos valores o como la media aritmética del espectro en todo el rango de frecuencias en análisis. Seleccionando un valor adecuado del umbral, se mejorará en gran medida la eficiencia del algoritmo.

10

Así, si se detecta algún grupo de armónicos con más de dos elementos, se puede deducir que el cabezal está desbalanceado. A continuación, se continúa el procedimiento para estimar cuál es el grado de desbalanceo del cabezal.

15

### **Análisis de grupos de armónicos**

20

Por cada grupo de secuencia de armónicos localizado se almacena su número total, el de mayor valor y la suma de sus valores. De tal forma que se tiene una noción del número que lo componen y de la potencia de cada uno ellos.

25

A continuación, los grupos se ordenan primeramente según la cantidad de armónicos que contienen y además por la suma de los valores de estos, quedando como grupo principal el que contiene mayor número de armónicos con mayor potencia. Del grupo principal obtenido se calcula la relación entre el armónico principal y el resto del grupo (Peak Ratio),

30

obteniéndose una medida de la potencia relativa del resto de los armónicos respecto al principal. En este ejemplo, el coeficiente utilizado está definido por la siguiente expresión:

$$PR = 1 - \frac{BPG + BP}{HSPG + BP}$$

donde:

PR – Peak Ratio

10 BPG – Armónico principal del grupo (Biggest Peak in the Group)

BP – Componente frecuencial de mayor potencia en el rango del espectro analizado (Biggest Peak)

HSPG – Suma de las potencias de los armónicos del grupo escogido (Highest Sum Peaks in a Group)

15

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para diferentes velocidades de giro del cabezal, donde UL representa el grado o nivel de desbalance del cabezal medido experimentalmente y el “número de picos” representa el mayor número de picos o armónicos obtenidos en secuencia.

20 El grado de desbalanceo del cabezal se mide empleando la unidad de medida que proporciona el sistema de medición del CNC del torno utilizado pre-proceso de corte. Se mide el desplazamiento en micras que produce el eje de giro debido al desbalanceo del cabezal. Así, se tienen 4 niveles diferentes de desbalanceo y se repitió el experimento tres veces  
25 para cada nivel.

30

RPM	Número de picos <sup>(2)</sup>	PR	UL [ $\mu\text{m}$ ]
1000	4	0,028	0,013
	5	0,024	0,016
	4	0,038	0,021
	4	0,038	0,044
2000	2	0,060	0,015
	3	0,065	0,040
	3	0,064	0,049
	3	0,079	0,149
3000	2	0,011	0,018
	3	0,021	0,077
	3	0,049	0,098
	5	0,141	0,304
4000	2	0,007	0,017
	3	0,014	0,057
	3	0,096	0,155
	6	0,279	0,478
5000	2	0,035	0,019
	3	0,054	0,114
	3	0,091	0,215
	11	0,410	0,665

Para el cálculo de la transformada de Fourier se utilizaron 20 puntos (NxRPM) entre armónicos de la frecuencia de giro. La frecuencia de muestreo utilizada es de 50 kHz.

En las Figs. 2, 3, 4, 5 y 6 se muestran los espectros de algunos de los experimentos:



Fig. 2a y 2b: 1000RPM y grado de desbalanceo 0,044  $\mu\text{m}$

Fig. 3a y 3b: 2000RPM y grado de desbalanceo 0,149  $\mu\text{m}$

Fig. 4a y 4b: 3000RPM y grado de desbalanceo 0,304  $\mu\text{m}$

Fig. 5a y 5b: 4000RPM y grado de desbalanceo 0,478  $\mu\text{m}$

5 Fig. 6a y 6b: 5000RPM y grado de desbalanceo 0,665  $\mu\text{m}$

En ellas se aprecian los picos detectados y los umbrales TH utilizados. En línea discontinua se muestra el umbral calculado para los armónicos, que en este ejemplo se determinó como la media aritmética del espectro en todo el rango de frecuencias en análisis.

### Obtención de la relación entre el PR y el desbalanceo del cabezal UL

A partir de los datos experimentales obtenidos, se obtiene el comportamiento del Peak Ratio para cada experimento según el nivel de balanceo del cabezal (Fig. 7), y se observa también que con el incremento del balanceo del cabezal aumenta también la potencia relativa entre los picos.

La Fig. 7 ilustra también una curva de ajuste para la que se ha utilizado, en este ejemplo, una función matemática tangente hiperbólica obtenida mediante técnicas de regresión lineal con un coeficiente de correlación  $R^2$  igual a 0,98. La forma general de la ecuación de la curva ajustada es la siguiente:

25

$$PR = \frac{1}{2} [\tanh(m \cdot UL + n) + 1]$$

donde:

30 PR es el Peak Ratio;

UL es el grado de desbalance del cabezal (Unbalance Level);

m, n son coeficientes de ajuste lineal.

5 Los coeficientes m y n están ajustados, inicialmente, en 2,220126 y -  
1,59696, respectivamente.

Una vez que se ha obtenido el modelo matemático que relaciona el nivel de desbalanceo del cabezal, mediante mediciones previas a la operación de corte, y el Peak Ratio o razón de potencia entre armónicos,  
10 es posible desarrollar un modelo inverso, que estime el grado de desbalanceo del cabezal a partir del PR. Este modelo inverso permite estimar el desbalanceo del cabezal, tanto antes del corte como durante la operación del corte, midiendo solamente las vibraciones en el cabezal. De este modo, se pueden detectar en tiempo real posibles vibraciones  
15 dañinas para el cabezal o que puedan afectar la calidad del corte.

A partir del modelo directo, descrito previamente, es posible obtener el modelo inverso, que tiene en este ejemplo la siguiente ecuación general:

$$20 \quad UL = \frac{1}{m} \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{PR}{1-PR} \right) - n \right]$$

El modelo planteado anteriormente debe cumplir la condición de que UL sea mayor que 0, por lo que PR debe cumplir lo siguiente:

$$25 \quad PR > \frac{1}{2} [\tanh(n) + 1]$$

Pero independientemente de esta última condición, es posible definir una condición de valor mínimo para UL ( $UL_{\min}$ ) de carácter práctico. Según los experimentos realizados, en los que se ha basado el modelo

desarrollado, podemos fijar este valor mínimo, inicialmente, en 0,010  $\mu\text{m}$ . Dado el valor de  $UL_{\min}$  fijado, entonces la ecuación general para el cálculo de  $UL$ , será la siguiente:

$$5 \quad UL = \begin{cases} UL_{\min}, & PR \leq PR_{\min} \\ \frac{1}{m} \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{PR}{1-PR} \right) - n \right], & PR > PR_{\min} \end{cases}; \quad PR_{\min} = \frac{1}{2} [\tanh(m \cdot UL_{\min} + n) + 1]$$

En la Fig. 8 se ilustran los datos experimentales de  $UL$  vs.  $PR$  y además los valores de  $UL$  obtenidos del modelo inverso, para los mismos valores de potencia relativa entre armónicos o picos.

10

#### **Análisis de los errores del procedimiento descrito.**

La siguiente tabla muestra el resultado de la evaluación del procedimiento descrito empleando otro conjunto de datos experimentales.

15

<b>RPM</b>	<b>Armónicos en secuencia</b>	<b><math>UL_E</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b><math>UL_M</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Error [%]</b>
2000	4	0,149	0,162	9
3000	4	0,077	0,078	1
4000	6	0,478	0,491	3
5000	11	0,665	0,670	1

20

Al evaluar el procedimiento según el nuevo conjunto de datos de  $PR$ , se obtuvo el error absoluto entre el grado de desbalance del cabezal modelado y el experimental. En la Fig. 9 se puede observar como el error disminuye drásticamente a medida que se incrementa el  $PR$ , lo que significa que el modelo es más preciso a medida que se incrementa el desbalance del cabezal.

**Toma de decisiones para la detección de vibraciones en el cabezal debido a su grado de desbalanceo.**

5           Teniendo en cuenta el análisis realizado en la sección anterior, es posible tomar decisiones respecto a la influencia del grado de desbalanceo en la aparición de vibraciones que puedan dañar el cabezal de la máquina o la calidad del corte durante la propia operación de corte. Si se define un valor límite mínimo para PR ( $PR_{LIM}$ ), que, dado los datos obtenidos  
10           experimentalmente, puede ajustarse inicialmente en 0,055, el sistema de monitorización puede tomar las siguientes decisiones:

          Si  $PR < PR_{LIM}$ , entonces: NO SE DETECTAN VIBRACIONES DAÑINAS EN EL CABEZAL DEBIDO A SU DESBALANCE.

15

          En caso contrario: SE DETECTAN VIBRACIONES EN EL CABEZAL QUE PUEDEN DAÑAR LA CALIDAD DEL CORTE

          A pesar también de que las realizaciones descritas de la invención con referencia a los dibujos comprenden sistemas de computación y procesos realizados en sistemas de computación, la invención también se  
20           extiende a programas de ordenador, más particularmente a programas de ordenador en o sobre unos medios portadores, adaptados para poner la invención en práctica. El programa de ordenador puede estar en forma de código fuente, de código objeto o en un código intermedio entre código  
25           fuente y código objeto, tal como en forma parcialmente compilada, o en cualquier otra forma adecuada para usar en la implementación de los procesos de acuerdo con la invención. El medio portador puede ser cualquier entidad o dispositivo capaz de portar el programa.

30           Por ejemplo, el medio portador puede comprender un medio de

almacenamiento, tal como una *ROM*, por ejemplo un *CD ROM* o una *ROM* semiconductor, o un medio de grabación magnético, por ejemplo un *floppy disc* o un disco duro. Además, el medio portador puede ser un medio portador transmisible tal como una señal eléctrica u óptica que  
5 puede transmitirse vía cable eléctrico u óptico o mediante radio u otros medios.

Cuando el programa de ordenador está contenido en una señal que puede transmitirse directamente mediante un cable u otro dispositivo o  
10 medio, el medio portador puede estar constituido por dicho cable u otro dispositivo o medio.

Alternativamente, el medio portador puede ser un circuito integrado en el que está encapsulado (*embedded*) el programa de ordenador, estando adaptado dicho circuito integrado para realizar, o para usarse en  
15 la realización de, los procesos relevantes.

## **REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para la detección en tiempo real del desbalanceo del cabezal en un mecanismo rotatorio de ultra precisión, donde el cabezal  
5 gira a una velocidad RPM, caracterizado porque comprende las siguientes operaciones:
- a) Adquirir, mediante un medio de adquisición a una frecuencia de muestreo FS, la señal  $X(t)$  correspondiente a la aceleración de las  
10 vibraciones del cabezal;
- b) Determinar, a partir de la señal  $X(t)$  obtenida, si el cabezal está desbalanceado.
- 15 2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque además comprende la operación de:
- c) Estimar el grado de desbalanceo del cabezal.
- 20 3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque el medio de adquisición que adquiere la señal  $X(t)$  se coloca sobre el eje X del cabezal.
4. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado  
25 porque la operación de determinar si el cabezal está desbalanceado comprende las siguientes operaciones:
- b1) Eliminar la componente de DC de la señal  $X(t)$  y aplicar a  
 $X(t)$  una transformación para pasar al dominio de la frecuencia,  
30 obteniendo la transformada  $T[X(t)]$ .

b2) Buscar el máximo de la transformada  $T[X(t)]$  y su frecuencia correspondiente, obteniendo  $MAX(T[X(t)])$  y  $f_{MAX(T[X(t)])}$ .

5 b3) Buscar, dentro del rango de análisis  $(1 \pm p) \cdot f_{MAX(T[X(t)])}$ , aquellos armónicos cuyo valor supera un valor umbral TH.

b4) Buscar, entre los armónicos localizados en la operación anterior, grupos de armónicos separados entre sí por distancias correspondientes a la frecuencia de giro del cabezal.

10

b5) Determinar, si existe al menos un grupo de dichos armónicos separados entre sí por distancias correspondientes a la frecuencia de giro del cabezal, que el cabezal está desbalanceado.

15 5. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado porque el parámetro  $p$  está dentro del rango  $[0,05, 0,20]$ .

6. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 5, caracterizado porque el parámetro  $p$  está dentro del rango  $[0,08, 0,12]$ .

20

7. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado porque la transformación que se aplica a  $X(t)$  es la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

25 8. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado porque el número de puntos utilizado para calcular la transformada que se aplica a  $X(t)$  es proporcional a la relación entre la frecuencia de muestreo FS y la frecuencia de giro del cabezal RPM.

9. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado porque el valor umbral TH es proporcional a la media aritmética del espectro en el rango de análisis.
- 5 10. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado porque el valor umbral TH es proporcional a la media geométrica del nivel de ruido del espectro y el nivel del armónico principal del espectro.
11. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado  
10 porque el valor umbral TH es proporcional al armónico principal dentro del rango en análisis.
12. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado  
15 porque el valor umbral TH es fijo.
13. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque la operación de estimar el grado de desbalanceo del cabezal comprende las siguientes operaciones:
- 20 c1) Seleccionar, de entre los grupos de armónicos localizados, el grupo principal que tiene el mayor número de armónicos con mayor potencia.
- c2) Calcular un parámetro PR que mide la potencia relativa de  
25 los armónicos del grupo principal respecto al armónico principal de dicho grupo principal.
- c3) Estimar, a partir del parámetro PR, el grado de desbalanceo del cabezal.



14. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 13, caracterizado porque el parámetro PR se calcula mediante la siguiente expresión:

$$PR = 1 - \frac{BPG + BP}{HSPG + BP}$$

5

donde: BPG es la potencia del armónico principal del grupo;  
BP es la componente frecuencial de mayor potencia en el rango de de análisis;  
HSPG es la suma de las potencias de los armónicos del grupo principal.

10

15. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 13, caracterizado porque la operación de estimar el grado de desbalanceo del cabezal se realiza mediante la siguiente ecuación:

15

$$UL = \frac{1}{m} \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{PR}{1-PR} \right) - n \right]$$

donde: UL es el grado de desbalanceo del cabezal;  
n y m son coeficientes que se ajustan experimentalmente.

20

16. Programa de ordenador caracterizado porque comprende instrucciones de programa para provocar que un sistema de computación realice el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15.

25

17. Programa de ordenador según la reivindicación 16, caracterizado porque está almacenado en unos medios de grabación.

18. Programa de ordenador según la reivindicación 16, caracterizado porque es portado por una señal portadora eléctrica.

19. Sistema para la detección en tiempo real del desbalanceo del cabezal en un mecanismo rotatorio de alta precisión mediante el procedimiento descrito en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende los siguientes elementos:

5

- Un acelerómetro, situado sobre el eje X del cabezal, que adquiere la señal correspondiente a las aceleraciones de las vibraciones del cabezal;

10

- Un medio de procesamiento, conectado al medio de adquisición, que recibe dicha señal y determina si las vibraciones medidas son provocadas por un desbalanceo del cabezal.

15

20

25

30

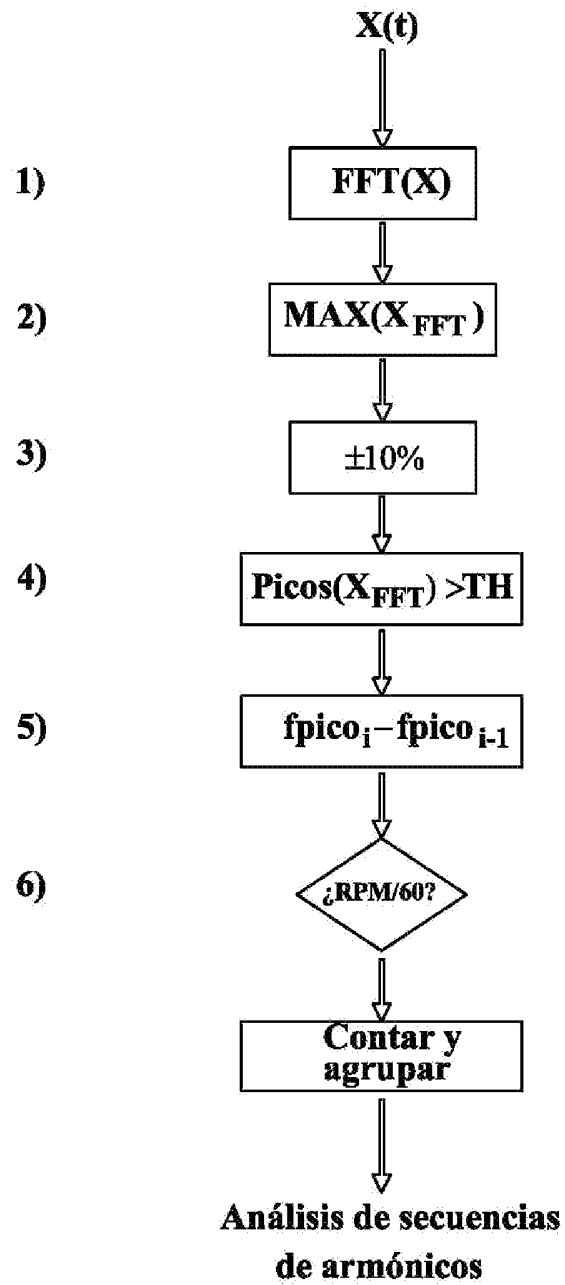


FIG. 1

FIG. 2a

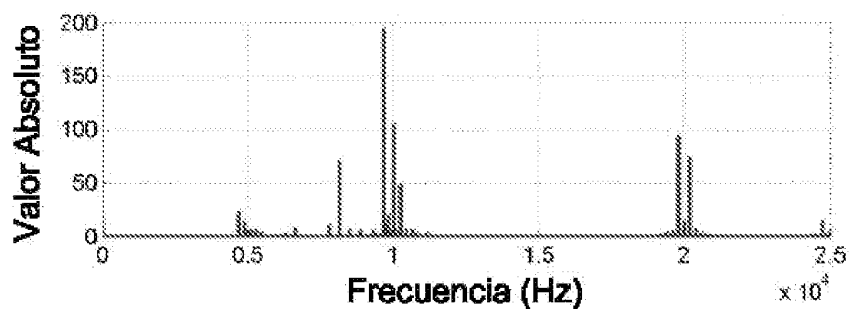


FIG. 2b

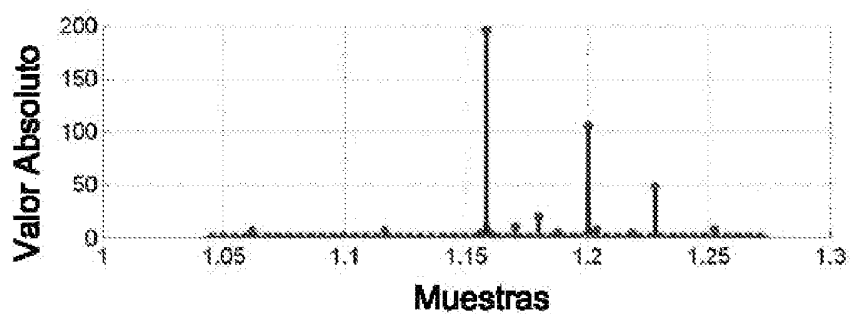


FIG. 3a

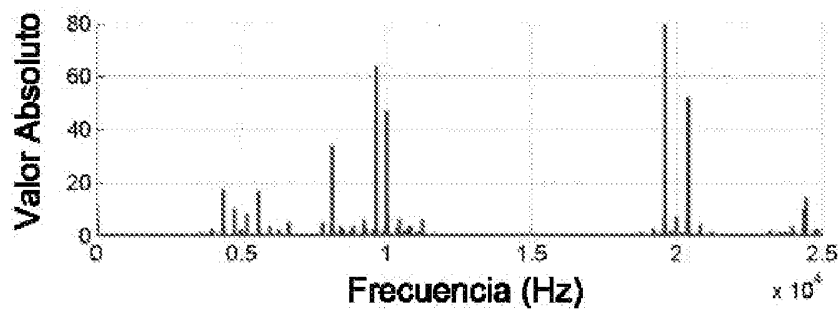


FIG. 3b

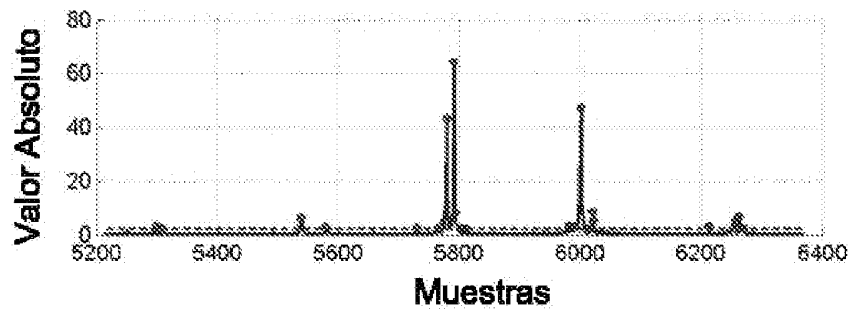


FIG. 4a

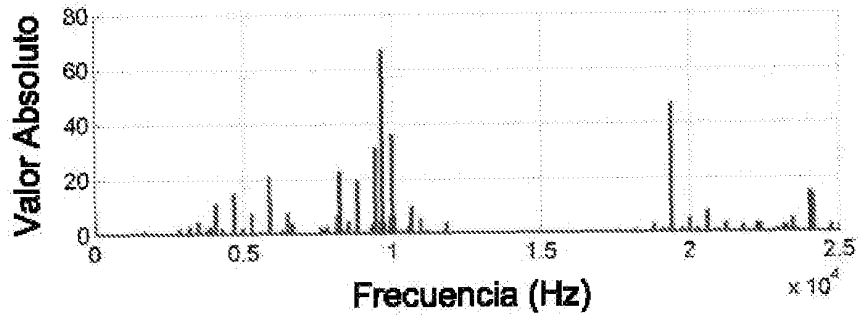


FIG. 4b

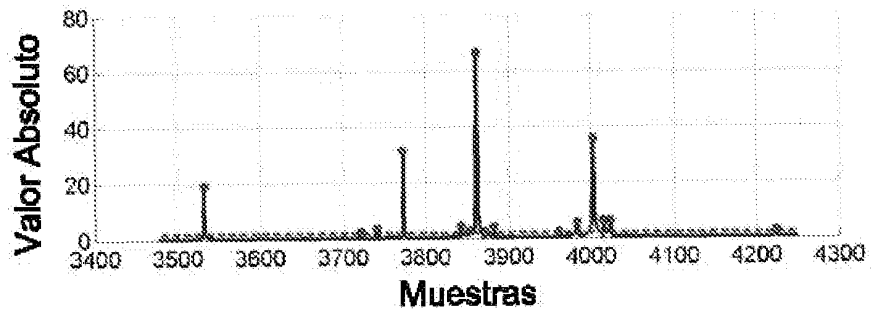


FIG. 5a

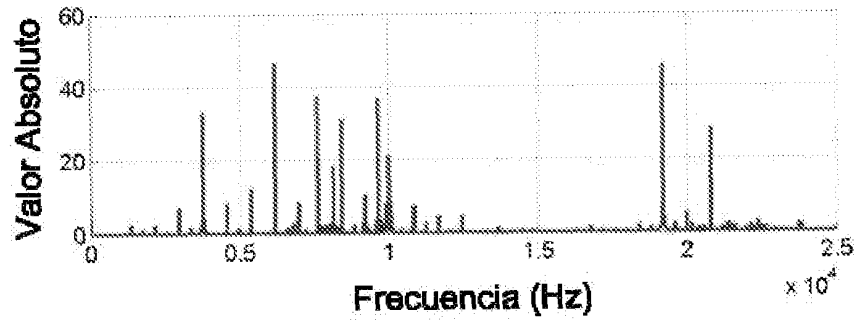


FIG. 5b

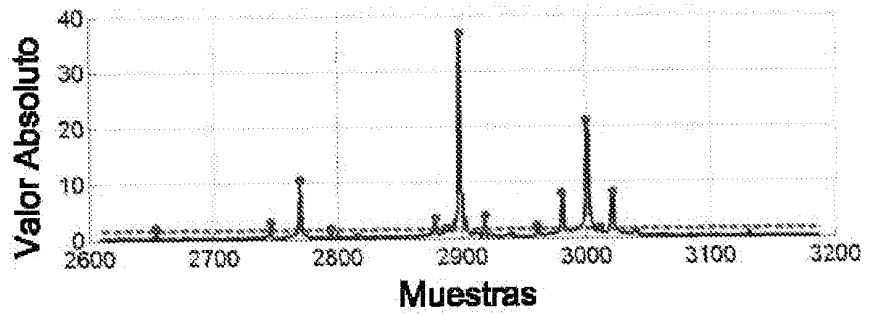


FIG. 6a

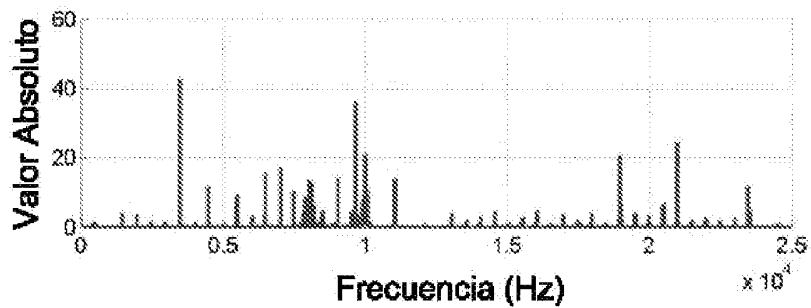
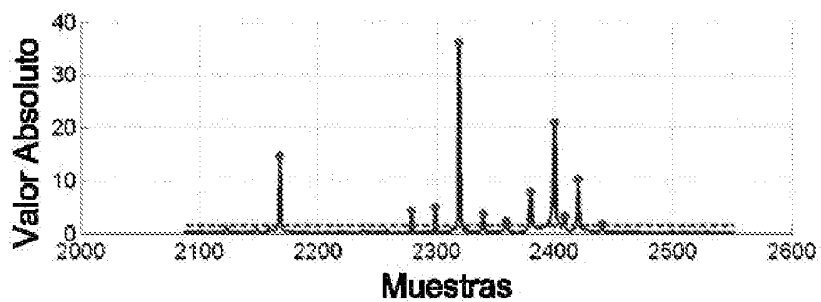


FIG. 6b



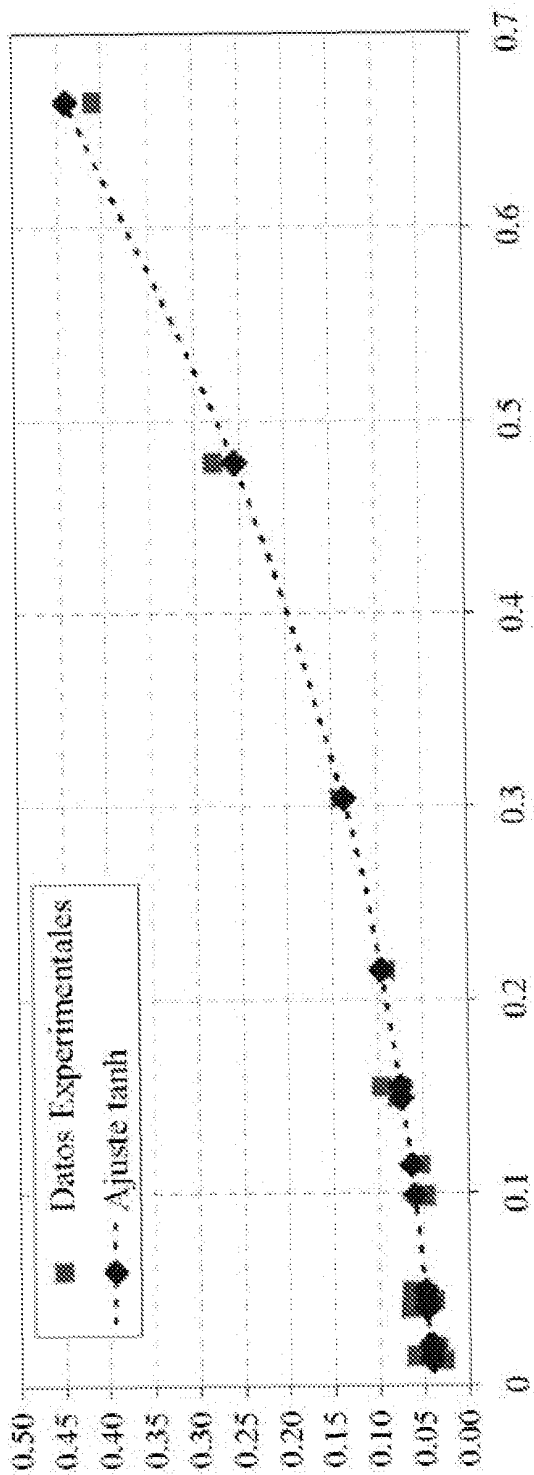


FIG. 7

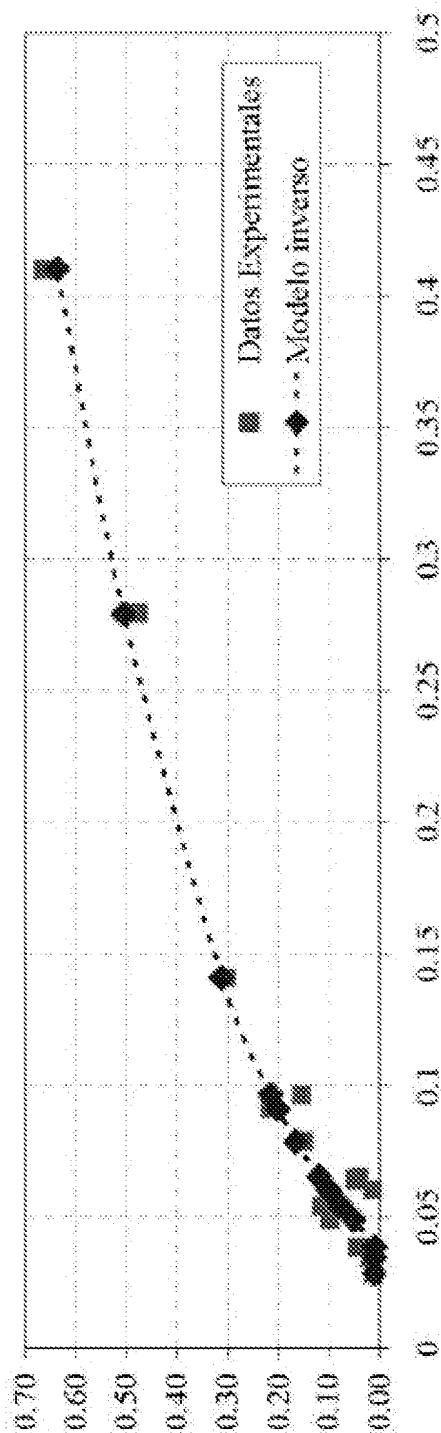


FIG. 8



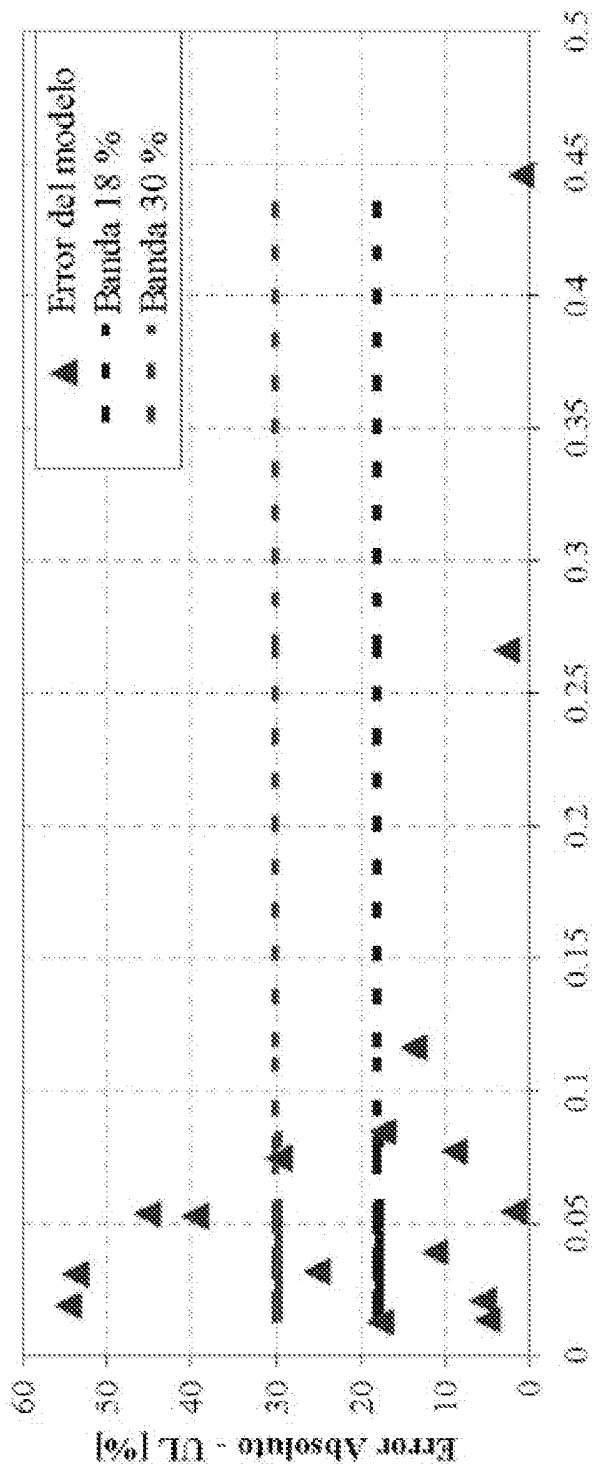


FIG. 9

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/ES 2009/070374

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

see extra sheet

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01H+,G01M+

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

INVENES,EPODOC,PAJ,WPI

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	US 5895857 A (ROBINSON et al.) 20.04.0199, column 5, line 44 - column 13, line 63; figure 1.	1,2,16-19 3-15
X A	US 4435770 A (SHIOHATA et al.) 06.03.1984, column 2, line 60 - column 11, line 14; figures.	1,16-19 2-15
X A	US 4010637 A (HARWELL et al.) 08.03.1977, column 3, line 46 - column 7, line 45; figures.	1,2,19 3-18
A	US 5109700 A (HICHO) 05.05.1992, column 5, line 25 - column 10, line 11; figures 2-9.	1-19
A	US 2001037180 A1 (KOMURA et al.) 01.11.2001, paragraphs [0031-0094]; figures.	1-19

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents:		later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance.	“T”	
“E” earlier document but published on or after the international filing date		
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“X”	document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“O” document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means	“Y”	document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
	“&”	document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

28.December.2009 (28.12.2009)

Date of mailing of the international search report

**(07/01/2010)**

Name and mailing address of the ISA/

O.E.P.M.

Paseo de la Castellana, 75 28071 Madrid, España.

Facsimile No. 34 91 3495304

Authorized officer

Telephone No. +34 91 349 54 96

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

Information on patent family members

International application No.

PCT/ ES 2009/070374

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5895857 A	20.04.1999	NONE	-----
US 4435770 A	06.03.1984	JP 56130634 A JP 63017167 B JP 1472944 C CA 1159562 A	13.10.1981 12.04.1988 27.12.1988 27.12.1983 27.12.1983 27.12.1983
US 4010637 A	08.03.1977	NONE	-----
US 5109700 A	05.05.1992	US 5115671 A	26.05.1992 26.05.1992 26.05.1992
US 2001037180 A	01.11.2001	DE 10119209 A JP 2001304954 A JP 3609982 B US 6629058 B	25.10.2001 31.10.2001 12.01.2005 30.09.2003 30.09.2003

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ ES 2009/070374

## CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

**G01H 1/00** (2006.01)

**G01M 1/16** (2006.01)

# INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional N°  
PCT/ES 2009/070374

## A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

### Ver hoja adicional

De acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o según la clasificación nacional y CIP.

## B. SECTORES COMPRENDIDOS POR LA BÚSQUEDA

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

G01H+,G01M+

Otra documentación consultada, además de la documentación mínima, en la medida en que tales documentos formen parte de los sectores comprendidos por la búsqueda

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

INVENES,EPODOC,PAJ,WPI

## C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones N°
X A	US 5895857 A (ROBINSON et al.) 20.04.0199, columna 5, línea 44 - columna 13, línea 63; figura 1.	1,2,16-19 3-15
X A	US 4435770 A (SHIOHATA et al.) 06.03.1984, columna 2, línea 60 - columna 11, línea 14; figuras.	1,16-19 2-15
X A	US 4010637 A (HARWELL et al.) 08.03.1977, columna 3, línea 46 - columna 7, línea 45; figuras.	1,2,19 3-18
A	US 5109700 A (HICHO) 05.05.1992, columna 5, línea 25 - columna 10, línea 11; figuras 2-9.	1-19
A	US 2001037180 A1 (KOMURA et al.) 01.11.2001, párrafos [0031-0094]; figuras.	1-19

En la continuación del Recuadro C se relacionan otros documentos  Los documentos de familias de patentes se indican en el Anexo

* Categorías especiales de documentos citados:	"T"	documento ulterior publicado con posterioridad a la fecha de presentación internacional o de prioridad que no pertenece al estado de la técnica pertinente pero que se cita por permitir la comprensión del principio o teoría que constituye la base de la invención.
"A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.	"X"	documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.
"E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.	"Y"	documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse que implique una actividad inventiva cuando el documento se asocia a otro u otros documentos de la misma naturaleza, cuya combinación resulta evidente para un experto en la materia.
"L" documento que puede plantear dudas sobre una reivindicación de prioridad o que se cita para determinar la fecha de publicación de otra cita o por una razón especial (como la indicada).	"&"	documento que forma parte de la misma familia de patentes.
"O" documento que se refiere a una divulgación oral, a una utilización, a una exposición o a cualquier otro medio.		
"P" documento publicado antes de la fecha de presentación internacional pero con posterioridad a la fecha de prioridad reivindicada.		

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.

28.Diciembre.2009 (28.12.2009)

Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional

**07-ENERO-2010 (07/01/2010)**

Nombre y dirección postal de la Administración encargada de la búsqueda internacional  
O.E.P.M.

Paseo de la Castellana, 75 28071 Madrid, España.  
N° de fax 34 91 3495304

Funcionario autorizado

N° de teléfono +34 91 349 54 96

# INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Información relativa a miembros de familias de patentes

Solicitud internacional N°

PCT/ES 2009/070374

Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de Publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de Publicación
US 5895857 A	20.04.1999	NINGUNO	-----
US 4435770 A	06.03.1984	JP 56130634 A JP 63017167 B JP 1472944 C CA 1159562 A	13.10.1981 12.04.1988 27.12.1988 27.12.1983 27.12.1983 27.12.1983
US 4010637 A	08.03.1977	NINGUNO	-----
US 5109700 A	05.05.1992	US 5115671 A	26.05.1992 26.05.1992 26.05.1992
US 2001037180 A	01.11.2001	DE 10119209 A JP 2001304954 A JP 3609982 B US 6629058 B	25.10.2001 31.10.2001 12.01.2005 30.09.2003 30.09.2003

# INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional N°

PCT/ ES 2009/070374

## CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

**G01H 1/00** (2006.01)

**G01M 1/16** (2006.01)