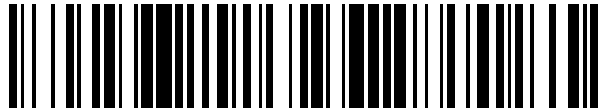


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 470 515**

21 Número de solicitud: 201231643

51 Int. Cl.:

**G06N 7/02** (2006.01)

**G01B 21/30** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION

B1

22 Fecha de presentación:

**25.10.2012**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**23.06.2014**

Fecha de la concesión:

**14.04.2015**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**21.04.2015**

56 Se remite a la solicitud internacional:

**PCT/ES2013/070740**

73 Titular/es:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS (CSIC) (50.0%)**

**SERRANO, 117**

**28006 MADRID (Madrid) ES y**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (50.0%)**

72 Inventor/es:

**DEL TORO MATAMOROS, Raúl Mario;**

**HABER GUERRA, Rodolfo Elias y**

**ALIQUE LÓPEZ, José Ramón**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

54 Título: **MÉTODO PARA MONITORIZAR EN TIEMPO REAL LA RUGOSIDAD DE UNA PIEZA DURANTE UN PROCESO DE MECANIZADO**

57 Resumen:

Método para monitorizar en tiempo real la rugosidad de una pieza durante un proceso de mecanizado.

La presente invención divulga un procedimiento para monitorizar la rugosidad superficial de una pieza en tiempo real durante un proceso de mecanizado llevado a cabo mediante una máquina herramienta. El procedimiento comprende los siguientes pasos: obtener un modelo híbrido incremental representativo del proceso de mecanizado y evaluar el modelo híbrido incremental en tiempo real para obtener la rugosidad superficial. Es un método especialmente útil en procesos de micro-mecanizado, donde el operario no puede comprobar por sí mismo el resultado de las operaciones, aunque también es aplicable a operaciones de mecanizado en general. El método desarrollado es sencillo y fácil de implementar, proporcionando resultados precisos permitiendo a operadores tomar las decisiones adecuadas durante la mecanización. El uso del procedimiento de la invención permite mejorar la calidad de las piezas mecanizadas disminuyendo el tiempo total de fabricación empleado.

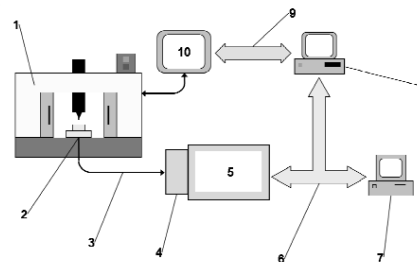


FIG. 1

ES 2 470 515 B1

## DESCRIPCIÓN

5 Método para monitorizar en tiempo real la rugosidad de una pieza durante un proceso de mecanizado

### Objeto de la invención

10 La invención se enmarca dentro del campo de la industria, concretamente en los procesos de mecanizado de piezas mediante máquinas de control numérico (CNC).

El objeto principal de la presente invención es un procedimiento para monitorizar la rugosidad superficial de una pieza en tiempo real durante el propio proceso de mecanizado  
15 de dicha pieza.

### Antecedentes de la invención

La rugosidad superficial de una pieza mecanizada constituye una de las características más  
20 importantes para conocer la calidad de la pieza, constituyendo una evaluación de la efectividad del proceso de fabricación llevado a cabo. El procedimiento empleado para la medición de la rugosidad superficial puede convertirse en un elemento diferenciador en lo que a competitividad se refiere, ya que influye en criterios como el rendimiento y la productividad de las estrategias de fabricación utilizadas para la conformación de piezas.

25 Actualmente, es posible conseguir de modos relativamente sencillos una medida precisa elevada de la rugosidad de piezas mecanizadas a macroescala. Sin embargo, esta precisión y sencillez se reduce a medida que disminuye la escala dimensional a la que se trabaja, llegando a ser crítica en la microescala y la nanoescala. En otras palabras, la determinación  
30 del acabado de piezas pequeñas a microescala es bastante más difícil, siendo especialmente problemática cuando los requerimientos de rugosidad se encuentran entre 0,3 nm y 7,0 nm. Nótese que el ajuste y acabado de micro-piezas puede afectar a la calidad y funcionamiento de ensamblajes a más alto nivel.

35 Aunque no existe un consenso generalizado con relación a la definición de los términos nanomecanizado, micromecanizado y macromecanizado, una definición ampliamente

aceptada para estos términos es su significado literal, es decir, nanomecanizado para el mecanizado de dimensiones entre 1 y 999 nm, micromecanizado para dimensiones entre 1 y 999  $\mu\text{m}$  y macromecanizado para dimensiones mayores de 1 mm. Hay que resaltar que los rangos micro y nano varían en dependencia de factores como el método de mecanizado, el tipo de producto, el material, entre otros. También cabe destacar que para enmarcar la tecnología empleada en una determinada escala, no es necesario que la pieza que se fabrique tenga todas sus dimensiones en esa escala.

Actualmente, los procedimientos con mayor arraigo en la industria para medir de forma precisa la rugosidad superficial de fabricación se llevan a cabo post-proceso, es decir, una vez concluidas las operaciones de fabricación, influyendo por tanto en el tiempo total de fabricación de la pieza. Para ello, normalmente se utilizan los denominados perfilómetros o rugosímetros, que son unos dispositivos dotados de una aguja que toca la superficie cuya rugosidad se desea medir. Las altas variaciones de la superficie son medidas moviendo la aguja (o la superficie). Los movimientos de la aguja se convierten en señales eléctricas que luego son amplificadas, digitalizadas e introducidas al ordenador para analizar los datos.

En el caso microescala, la cabeza del palpador y la aguja son versiones a escala reducida de los perfilómetros de contacto tradicionales. Sin embargo, a diferencia del método de contacto tradicional, la medición se registra cuando se presenta un cambio en el movimiento constante del microsensado (amortiguado). Actualmente se dispone de agujas de tamaños extraordinariamente pequeños, como por ejemplo de 0.125 mm de diámetro y 10 mm de largo. Cuando la punta se acerca al objeto a medir, su micromovimiento es amortiguado por la proximidad a la superficie de la pieza. Este cambio de paso de umbral en el micromovimiento se registra como un punto de medición.

Un inconveniente de la medición de la rugosidad en piezas en la microescala con perfilómetros está relacionado con el posicionamiento de la micropieza para inspeccionarla con el perfilómetro. Debido al tamaño tan reducido de las piezas, es difícil ver físicamente debajo de la cabeza del palpador la posición de la pieza a medir para alinear el movimiento de la aguja con la pieza. Se necesita un sistema de pre-posicionado, usando soportes, calzas, agujeros o algún sistema que permita situar la pieza bajo la cabeza del palpador. En definitiva, se trata de sistemas complejos.

También son conocidos otros procedimientos de medición post-proceso, como los descritos en los documentos US7630086, US6163973 y US5608527. El primero de estos documentos

describe el uso de un emisor láser para detectar defectos de fabricación en la superficie de obleas de silicio, discos magnéticos o sustratos de vidrio transparente, obtenidos mediante operaciones de pulido. Los otros dos documentos emplean un método de medición de la rugosidad superficial sin contacto cuya finalidad es, por una parte, evitar colisiones agresivas del instrumento palpador con la pieza y, por otra, detectar imperfecciones en los rodillos de prensado en la fabricación de planchas de metal, respectivamente.

También son conocidos algunos métodos para la monitorización o medida de diferentes variables o eventos, como la rugosidad, que se llevan a cabo en-proceso, es decir, durante las operaciones de fabricación. Estos métodos están enfocados principalmente a operaciones de mecanizado en la macroescala. Entre tales métodos, se pueden destacar las tecnologías que plantean la monitorización de la rugosidad superficial en-proceso a partir de la medición de variables que caracterizan el comportamiento temporal de las operaciones de corte.

Como ejemplo, se pueden citar los documentos US6626029 y US7463994, que proponen métodos para medir la rugosidad superficial en operaciones de pulido, rectificado cilíndrico o de mecanizado de superficies. En el caso del primer documento, la medición se realiza a partir de la medición de la emisión acústica durante el proceso de corte y empleando un transductor piezoeléctrico de altas frecuencias. El segundo documento utiliza el principio de la fuerza termo-electromotriz que se genera durante el contacto de materiales conductores eléctricos.

Existen también tecnologías que utilizan estrategias de control en bucle cerrado para controlar la rugosidad superficial en tiempo real o introducir acciones de control para conseguir su mejora. El documento US7792604 desarrolla una tecnología que introduce acciones de control en el sistema de control de posición de las máquinas, suavizando los cambios en la velocidad de avance que conlleven a una mejora de la rugosidad superficial. De forma similar, el documento US4926309 describe un controlador adaptativo para ajustar la rugosidad superficial, durante la fabricación en serie de piezas, a partir de su estimación mediante un modelo matemático, que utiliza como entradas la velocidad de avance de la máquina y la rugosidad superficial medida de la última pieza fabricada. De forma similar, el documento US3829750 describe un procedimiento parecido aplicado a procesos de rectificado a partir de la medición de variables del proceso, como par, temperatura y vibraciones. Realiza un ajuste de la velocidad de avance empleando estrategias de optimización estocásticas de una figura de mérito, como es el caso de la tasa de arranque

de material y su relación con la rugosidad superficial deseada.

Otras tecnologías implementan algoritmos de optimización para el ajuste o selección del conjunto de parámetros de mecanizado en procesos de fabricación. Entre ellas puede  
5 destacarse el documento US5903474, que reivindica un método para lograr la selección óptima de los parámetros de mecanizado en operaciones de torneado a partir del desgaste de la herramienta y aplicando estrategias de optimización multi-objetivo.

También resulta de especial interés el documento US6671571, enfocado también a temas  
10 de acabado pero en este caso dimensional, y que desarrolla un procedimiento que introduce de forma automática compensaciones en el programa de la pieza que se fabrica a partir de la medida que se realiza de sus dimensiones geométricas una vez concluidas las operaciones de mecanizado. Con vista también al control del acabado dimensional, el documento US4974165 describe un sistema de control de tiempo real del movimiento de la  
15 herramienta de corte en operaciones de torneado para obtener un perfil de mecanizado adecuado a través de la medición continua del diámetro real de la pieza giratoria.

En definitiva, aunque actualmente existen varios procedimientos que tienen como objetivo la  
20 monitorización de la rugosidad de una pieza en tiempo real durante el proceso de mecanizado, ninguno de ellos consigue obtener resultados completamente satisfactorios.

### **Descripción de la invención**

Los inventores de la presente solicitud han desarrollado un método de monitorización de la  
25 rugosidad superficial en tiempo real relativamente sencillo y fácil de implementar, y que proporciona resultados precisos que permiten al operador tomar las decisiones más oportunas durante el propio proceso de mecanizado. El uso del procedimiento de la invención permite tanto mejorar la calidad de las piezas mecanizadas como disminuir el tiempo total empleado, mejorando así la productividad neta del proceso. Se trata de un  
30 método especialmente útil en procesos de micro-mecanizado, donde el operario no puede comprobar por sí mismo el resultado de las operaciones, aunque es aplicable a cualquier proceso de mecanizado en general. Por ese motivo, en la presente solicitud el término "mecanizado" abarca también "micro-mecanizado".

35 El procedimiento de la invención para monitorizar en tiempo real la rugosidad de una pieza durante un proceso de mecanizado, donde dicho proceso es llevado a cabo por una

máquina dotada de una herramienta de mecanizado, comprende fundamentalmente los siguientes pasos: obtener un modelo híbrido incremental representativo del proceso de mecanizado; y evaluar el modelo híbrido incremental en tiempo real para obtener la rugosidad superficial. A continuación, se describe cada uno de dichos pasos con mayor  
5 detalle:

a) Obtención de un modelo híbrido incremental

En este primer paso, se obtiene un modelo híbrido incremental representativo del proceso  
10 de mecanizado que permite obtener la rugosidad superficial a partir de datos del avance por diente y de la vibración de la máquina en el eje Z. El avance por diente se define como la distancia que avanza cada diente de la herramienta con relación a la pieza por cada vuelta que realiza. Esta información se obtiene a partir de la velocidad de avance de la máquina, su velocidad de giro y la información geométrica de la herramienta, que normalmente se  
15 encuentran disponibles internamente en la máquina, específicamente en su controlador. Por otro lado, la vibración de la máquina en el eje Z se mide utilizando un acelerómetro instalado en la mordaza o mecanismo de sujeción de la pieza.

El modelo híbrido incremental está formado por una función que se obtiene a partir de la  
20 superposición de un modelo global y un modelo local. El modelo global proporciona una primera aproximación general que permite obtener la rugosidad a partir del valor cuadrático de la velocidad de avance por diente y la vibración media cuadrática en el eje Z (eje de desplazamiento vertical de la herramienta de mecanizado), y está formado por un polinomio de dos entradas de orden  $m$ . El modelo local, por su parte, permite aproximar con mayor  
25 precisión aquellas áreas del modelo global que no representan adecuadamente el comportamiento del proceso de mecanizado, y se obtiene empleando la aproximación Fuzzy  $k$ -Nearest Neighbours con un número de vecinos  $k$  y un coeficiente de borrosidad  $p$ .

Este modelo se ajusta partir de un conjunto de datos que comprende el valor cuadrático de  
30 la velocidad de avance por diente de la herramienta, el valor cuadrático medio de la vibración en el eje Z de la herramienta y la rugosidad superficial obtenidos de una pieza de prueba mecanizada previamente por la máquina. En principio, se puede utilizar cualquier número de muestras siempre que sean las suficientes como para caracterizar adecuadamente el comportamiento del proceso, aunque en una realización preferida de la  
35 invención se usan al menos 20 muestras.

Así, en una realización preferida de la invención el modelo híbrido incremental se obtiene implementando los siguientes pasos:

- 5 a) Obtener un conjunto de valores cuadráticos medios de la vibración en el eje Z de la herramienta, de valores cuadráticos de la velocidad de avance por diente y de valores de rugosidad superficial a partir de una pieza de prueba mecanizada previamente por la máquina.
- b) Ajustar, a partir de dicho conjunto de valores, el modelo global mediante un algoritmo de mínimos cuadrados.
- 10 c) Ajustar, a partir de dicho conjunto de valores, los modelos locales de la rugosidad superficial aplicando la técnica Fuzzy k-Nearest Neighbors (F-kNN) y empleando una norma euclídea para el cálculo de la cercanía entre vecinos.
- d) Generar el modelo híbrido incremental a partir de la superposición del modelo global y el modelo local.

15

Los datos o valores empleados (avance por diente cuadrático y vibración media cuadrática en el eje Z) varían entre rangos muy distintos. Como consecuencia, los modelos global y local trabajan en condiciones extremas que podrían llevar a que se descarte alguna de las variables de entrada, perdiéndose información que podría ser relevante. Para evitarlo, en una realización preferida de la invención se lleva a cabo una normalización de los valores cuadráticos medios de vibración el eje Z y de los valores cuadráticos de velocidad de avance por diente previamente al ajuste de los modelos global y local. Preferentemente, los valores cuadráticos medios de vibración en el eje Z se normalizan con relación a su valor máximo dentro del conjunto de datos, y los valores cuadráticos de velocidad de avance por diente se normalizan con relación al radio de la herramienta.

25

Una vez obtenido el modelo híbrido incremental, es posible ajustar el orden  $m$  del polinomio del modelo global, el número de vecinos  $k$  del modelo local y el coeficiente de borrosidad  $p$  del modelo local en base a un algoritmo de temple simulado, mejorando así la precisión de los valores de rugosidad superficial obtenidos.

30

En definitiva, estos pasos se llevan a cabo para cada máquina que se desee caracterizar por medio del procedimiento descrito, siendo el resultado último una función de dos entradas (avance por diente cuadrático y vibración media cuadrática en el eje Z) y una salida (rugosidad superficial).

35

b) Evaluar el modelo híbrido incremental

Una vez calculado el modelo híbrido incremental de la máquina en cuestión de acuerdo con los datos anteriores, únicamente es necesario introducir datos de la velocidad cuadrática de avance por diente de la herramienta y datos o valores cuadráticos medios de vibración en el eje Z de la herramienta obtenidos en tiempo real durante un proceso de micromecanizado para obtener la rugosidad superficial instantánea en ese momento.

Preferentemente, la evaluación del modelo híbrido incremental comprende a su vez los siguientes pasos:

a) Adquirir datos de la velocidad cuadrática de avance por diente de la herramienta y datos de la vibración en el eje Z de la herramienta durante una ventana temporal cuya duración es proporcional al período de rotación de la herramienta, preferentemente 10 veces dicho período de rotación.

b) Calcular el valor medio cuadrático de los datos de vibración en el eje Z durante dicha ventana temporal y normalizarlo con relación al valor máximo de la vibración dentro de la misma ventana de datos.

c) Normalizar los datos de la velocidad cuadrática de avance por diente con relación al radio de la herramienta.

d) Introducir los valores normalizados de la velocidad cuadrática de avance por diente y los valores cuadráticos medios de vibración en el eje Z de la herramienta en el modelo híbrido incremental para obtener la rugosidad superficial instantánea.

En una realización preferida de la invención, antes de comenzar la adquisición de datos se detecta el inicio efectivo del mecanizado teniendo en cuenta el momento en que la herramienta contacta con la pieza, preferentemente en función de la conductividad del conjunto máquina-herramienta-pieza (en caso de materiales conductores de electricidad). Esta operación evita que se produzcan errores relacionados con el inicio de la toma de medidas antes de que haya comenzado realmente el proceso de mecanizado.

En otra realización preferida de la invención, los datos de vibración en el eje Z adquiridos son filtrados para eliminar los armónicos de frecuencias por debajo de la frecuencia de giro de la herramienta. Este filtrado se puede llevar a cabo de diferentes modos, aunque en una realización preferida de la invención se emplea un filtro digital de respuesta infinita al impulso (IIR) de Butterworth pasa-alto, de 6º orden y cuya frecuencia de corte es igual a la



mitad de la frecuencia de giro de la herramienta.

Normalmente, este método será codificado como un programa de ordenador e implementado, en su versión más simple, por medio de un ordenador conectado a la máquina, para obtener el avance por diente, y a un sensor de vibración que permite obtener la vibración en el eje Z. En consecuencia, la invención se extiende igualmente a los programas de ordenador, particularmente los programas de ordenador dispuestos sobre o dentro de una portadora, adaptados para llevar a la práctica la invención. El programa puede tener la forma de código fuente, código objeto, una fuente intermedia de código y código objeto, por ejemplo, en forma parcialmente compilada, o en cualquier otra forma adecuada para uso en la puesta en práctica del procedimiento de la invención.

La portadora puede ser cualquier entidad o dispositivo capaz de soportar el programa. Por ejemplo, la portadora podría incluir un medio de almacenamiento, como una memoria ROM, una memoria CD ROM, una memoria ROM de semiconductor, un soporte de grabación magnética, un disco flexible o un disco duro.

Además, la portadora puede ser una portadora transmisible, por ejemplo, una señal eléctrica u óptica que podría transportarse a través de cable eléctrico u óptico, por radio o por cualesquiera otros medios. Cuando el programa está incorporado en una señal que puede ser transportada directamente por un cable u otro dispositivo o medio, la portadora puede estar constituida por dicho cable u otro dispositivo o medio.

Como variante, la portadora podría ser un circuito integrado en el que está incluido el programa, estando el circuito integrado adaptado para ejecutar, o para ser utilizado en la ejecución de los procesos correspondientes.

### **Breve descripción de las figuras**

La Fig. 1 muestra el sistema de adquisición y procesamiento utilizado para adquirir los datos necesarios para llevar a cabo el procedimiento de la invención.

La Fig. 2 muestra el comportamiento de la rugosidad real frente a la estimada considerando los datos de entrenamiento correspondientes a un proceso de micromecanizado.

La Fig. 3 muestra el comportamiento de la rugosidad real frente a la estimada durante unas

operaciones de microfresado (validación en proceso).

La Fig. 4 muestra el comportamiento del error en proceso durante las operaciones de microfresado de la Fig. 3.

5

### Realización preferida de la invención

Se describe a continuación con mayor detalle un ejemplo de realización de la invención donde se explica el proceso llevado a cabo para elegir las variables y los algoritmos utilizados en la invención. En este ejemplo concreto, el cálculo del modelo híbrido se ha aplicado a un proceso de micromecanizado.

Elección de variables representativas del proceso de micromecanizado

15 La rugosidad superficial y específicamente la Ra es uno de los indicadores industriales más utilizado para evaluar la calidad superficial de una pieza mecanizada. La Ra se define:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1)$$

20 La rugosidad se expresa normalmente en micras, o en nuestro caso en nanómetros, y se define la Ra como la media aritmética de los valores absolutos de los puntos con distancia  $y_i$  con respecto a la línea media del perfil de rugosidad medido.

Sin embargo en la literatura no están claros cuales son las variables que mayor influencia tienen en la rugosidad superficial, al menos en la microescala. Por ello, se ha llevado a cabo un estudio experimental de las diferentes variables implicadas en el proceso de mecanizado para determinar cuáles de ellas son las más adecuadas para predecir la rugosidad de la pieza en tiempo real. Las consecuencias del estudio realizado permiten concluir que las variaciones en la rugosidad superficial con la velocidad de corte tienen diferentes comportamientos para diferentes valores de avance por diente.

30

Además, en general un aumento en la velocidad de corte conduce a una reducción en la rugosidad. Esto se produce fundamentalmente por los siguientes motivos:

- El mecanismo de rugosidad de la superficie a bajas velocidades de corte incluye no sólo las consideraciones geométricas, sino también los efectos del espesor de la viruta mínimo, la recuperación elástica, y la acción de arrastre.

5 - El aumento de la tasa de desgaste a bajas velocidades dará lugar a una tensión no uniforme sobre la herramienta y a una rápida propagación del desgaste, que afectará significativamente las características de la superficie.

- El efecto de la microestructura de la pieza de trabajo, cuando el espesor de la viruta es en el orden o menor que el promedio tamaño de grano.

- La tasa de aumento de la tensión superficial debido al efecto de tamaño y el efecto de flujo de plástico (similar al arrastre) que depende de la combinación pieza-herramienta.

15 Las observaciones experimentales revelaron que la interacción de la velocidad de corte y la carga de viruta (velocidad de avance por diente) es un criterio fundamental para decidir la rugosidad de micro-canales en operaciones de micro-fresado. Las observaciones experimentales mostraron también que los niveles de avance por diente y la interacción de la velocidad de corte y carga de viruta son factores cruciales en la operación micro-fresado.

20 La variación drástica de la presión específica de corte y las fuerzas de corte a menores avances por diente indica claramente el efecto del espesor mínimo de la viruta en el micro-mecanizado. Por tanto, una de las variables elegidas para la estimación de la rugosidad superficial en esta invención ha sido la velocidad de avance por diente, señal que puede obtenerse a partir de señales internas de la máquina.

25 Sin embargo una sola variable es insuficiente para hacer una buena predicción de la rugosidad superficial en tiempo real. Es necesario utilizar otra variable medida que sea capaz de capturar de forma sistemática y en tiempo real la influencia de aspectos como el run-out, la geometría de la herramienta y el efecto del tamaño con vistas a capturar de forma

30 más realista el mecanismo de eliminación de material en la micro-escala y su influencia en la rugosidad.

De todas las variables analizadas, la que ofrece mejor relación señal ruido y cuyo coste del sensor es más económico es la señal de vibración procedente de un acelerómetro.

35 Ciertamente se trata de un sensor relativamente poco invasivo al proceso, robusto y cuyo coste y procesamiento de señales no es tan costoso con los sensores de emisión acústica ni

tan invasivos como los sensores de fuerza.

En definitiva, en la presente invención las variables utilizadas para modelar y caracterizar el acabado superficial son la velocidad cuadrática de avance por diente y la vibración media cuadrática en el eje Z de la máquina.

#### Experimentos realizados

Se realizaron más de 200 experimentos con el objetivo de estudiar y analizar el comportamiento de las variables en procesos de microtaladrado y microfresado. A modo de ejemplo, se pueden mencionar los experimentos realizados en Wolframio (WCu), utilizando fresas y brocas de 0,2 mm, 0,5 mm, 1 mm y 1,8 mm de diámetro, que permiten estudiar una zona muy amplia y potencialmente muy importantes desde el punto de vista comercial y de la eficiencia de los procesos de micromecanizado. Se analizó un rango de velocidades de giro entre las 8000 rpm y las 45000 rpm, y se midieron acabados superficiales desde los 70nm hasta los 500nm.

#### Selección del modelo representativo del proceso de micromecanizado

En la actualidad se han producido grandes progresos en las técnicas y métodos para el modelado de sistemas complejos y de gran escala. Sólo a través de un modelo o una representación similar se puede llegar a comprender, evaluar, controlar y optimizar de forma efectiva un sistema. La tarea de modelado de un proceso consiste en obtener una representación del comportamiento del mismo por medio de representaciones matemáticas (ecuaciones diferenciales, ecuaciones integrales, etc.). La complejidad y no linealidad de algunos procesos, convierten a la tarea del modelado por medio de técnicas clásicas en una labor difícil y costosa.

En general, uno de los principales inconvenientes a la hora de seleccionar un modelo para un sistema es que se necesita saber previamente la estructura del modelo (modelo paramétrico) antes de realizar cualquier aproximación. Desafortunadamente, en la mayoría de los problemas reales, la definición de la estructura o forma funcional del modelo no es un problema que pueda ser fácilmente resuelto y, cualquier decisión a este respecto podría influir muy subjetivamente en la naturaleza del problema. Por esta razón, se han desarrollado técnicas no paramétricas o de modelo libre, que se basan en el uso de un modelo genérico simple que se va ajustando iterativamente.

De entre los distintos métodos de modelo libre propuestos en la literatura, destacan los modelos incrementales propuestos por Pedrycz, donde el eje del diseño del modelo explota el principio de incrementalidad. Siguiendo este principio, cualquier modelo debe comenzar por su forma más genérica y por la forma más simple que uno pudiera imaginar. Sin embargo, no es necesario detener el diseño en este paso, ya que si es necesario, el modelo se refina (ajusta) de forma iterativa mediante la invocación de alguna técnica más refinada (y localizada) para modelar algunas regiones en particular del espacio de entrada. La presente invención toma como base este principio, proponiendo el desarrollo de un modelo híbrido incremental. El modelo básico o global tiene que ser lo más simple posible, por lo que las técnicas de regresión lineal se presentan como una solución viable, debido a que son fáciles de desarrollar. Después de construir el modelo básico, los modelos híbridos adicionales necesitan ser refinados con una contraparte incremental como, por ejemplo, el algoritmo de agrupamiento borroso Fuzzy k-Nearest Neighbors.

En definitiva, para modelar el proceso de micromecanizado la presente invención emplea una técnica no paramétrica denominada modelo híbrido incremental, que fue desarrollado por W. Pedrycz y K.C. Kwak en "The development of incremental models". IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2007. 15(3): p. 507-518. Esta técnica emplea un modelo básico o global que captura el comportamiento general del sistema y le superpone un modelo local que captura el comportamiento local del mismo. Adicionalmente, con el objeto de suavizar las transiciones entre el modelo global y el modelo local, se utiliza una estrategia de suavizado local basada en el algoritmo de agrupamiento borroso descrito por S. B. Roh, T.C. Ahn y W. Pedrycz en "The refinement of models with the aid of the fuzzy k-nearest neighbors approach". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010. 59(3): p. 604-615.

#### Modelo global

Cuando no se dispone de un conocimiento previo del sistema a modelar, la utilización de modelos genéricos tales como regresiones lineales o polinomios de segundo orden son, en general, buenas opciones para representar el comportamiento global del sistema. En nuestro caso en particular, el modelo global del sistema a modelar se obtiene ajustando un polinomio de grado  $m$  mediante el algoritmo de mínimos cuadrados. La salida del modelo global tendría, por tanto, la siguiente expresión:

$$\hat{y}_B(x_i) = f_B(x_i, t(x_i)) \quad (2)$$

siendo  $x_i$  el i-ésimo punto de entrada y  $t(x_i)$  el valor de salida del punto  $x_i$ .

- 5 El procedimiento para la obtención del modelo global consiste en calcular y almacenar los parámetros de la función a ajustar (en nuestro caso el polinomio). La evaluación del algoritmo en un punto objetivo que consiste en evaluar la función en ese punto con los parámetros obtenidos durante el entrenamiento, es decir, los valores de velocidad cuadrática de avance por diente y de vibración media cuadrática en el eje Z obtenidos en  
10 los experimentos descritos.

#### Modelo local

El procedimiento elegido para la obtención del modelo local en el modelado híbrido  
15 incremental es la aproximación Fuzzy k-Nearest Neighbors (F-kNN). F-kNN es la versión borrosa de kNN, que consiste en promediar el valor de los puntos más cercanos al punto objetivo. El algoritmo kNN asume, por tanto, que puntos cercanos tienen un valor similar. Para calcular la cercanía se utilizará la norma euclídea, aunque utilizando la normalización que más adelante se describirá, veremos que equivale a utilizar otra norma.

20

El aprendizaje de F-kNN es perezoso, por lo que en esta fase sólo necesitamos almacenar los datos conocidos (puntos de entrada y valores). A la hora de promediar el valor de los puntos más cercanos al punto objetivo, a partir de un punto objetivo  $q$ , obtenemos el siguiente conjunto:

25

$$N = \{d_i \in D\} \quad (3)$$

siendo  $D$  el conjunto de puntos de entrada para el algoritmo y  $d_i$  uno de los  $k$  vecinos más próximos a  $q$ .

30

La similitud entre los puntos de  $N$  y  $q$  se calcula de la siguiente forma:

$$S(n_i, q) = \begin{cases} 1, & \text{si } \|n_i - q\| = 0 \\ \left[ \|n_i - q\|^{\frac{2}{p-1}} \cdot \sum_{j=1}^k \left( \frac{1}{\|n_j - q\|} \right)^{\frac{2}{p-1}} \right]^{-1} & \text{si } \|n_i - q\| \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

donde  $n_i$  es el  $i$ -ésimo vecino del punto objetivo  $q$ , y  $p$  es el coeficiente de borrosidad.

- 5 Podemos ahora calcular el valor del punto objetivo  $q$  utilizando la media de los valores objetivos de los puntos del conjunto  $N$  ponderada por la similitud  $S$ :

$$\hat{t}(q) = \sum_{i=0}^k S(n_i, q) \cdot t(n_i) \quad (5)$$

10 **Modelo híbrido incremental**

El modelo incremental se encarga de engranar los dos modelos descritos anteriormente.

- El entrenamiento del modelo básico consiste en realizar el entrenamiento de los modelos básico e incremental. Así pues, sea  $\hat{y}_B(x)$  la función que evalúa el modelo básico. Entonces podemos calcular el error de la predicción del modelo básico de la siguiente forma:

$$\varepsilon(x) = t(x) - \hat{y}_B(x) \quad (6)$$

- 20 Estos errores constituyen el conjunto  $D$ , entrada del modelo local donde se calculan los vecinos de  $q$  utilizando (6), y son memorizados en su entrenamiento.

- El cálculo del modelo híbrido incremental, en un punto  $q$  por parte del modelo incremental se obtiene añadiendo a la salida del modelo básico el término compensatorio calculado por el modelo local siguiendo la ecuación (7), es decir:

$$\hat{y}(q) = \hat{y}_B(q) + \hat{t}(q) \quad (7)$$

En la presente invención se trabaja con datos (rugosidad, velocidad cuadrática de avance

por diente y vibración media cuadrática en el eje Z) cuyos valores varían en rangos muy distintos. Esto hace que tanto el algoritmo global como local trabajen en condiciones extremas en las que pueden descartar alguna de las variables de entrada y sólo dar peso a la que tenga un dominio más amplio. Por ejemplo, en el modelo local, la selección de  
 5 vecinos descartará las variables con rangos cortos, pues influyen poco en la norma.

Para evitar este problema, se pueden normalizar los datos. Si denotamos por  $x_i^j$  la variable j del punto de entrada i, podemos obtener los puntos normalizados de la siguiente forma:

$$z_i^j = \frac{x_i^j - \mu(j)}{\sigma(j)} \quad (8)$$

$$\mu(j) = \frac{\sum_{i=0}^n x_i^j}{n} \quad (9)$$

$$\sigma(j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i^j - \mu)^2}{n}} \quad (10)$$

donde  $\mu(j)$  es la media de la variable j-ésima,  $\sigma(j)$  es su desviación típica y n es el  
 15 número de puntos de entrada.

A continuación, se resumen todos los pasos del algoritmo para la obtención del modelo incremental. Primeramente se realiza la parte del entrenamiento del modelo a partir de los datos objetivo, para posteriormente evaluar el modelo obtenido con los nuevos datos a  
 20 considerar, es decir calcular el modelo obtenido para los nuevos datos a considerar.

Entrenamiento:

1. Obtención de los parámetros de entrenamiento:
  - 25 (a) Parámetros del modelo global básico (el orden del polinomio m).
  - (b) Parámetros del modelo local (k y p, aunque no son necesarios durante el entrenamiento).

(c) Datos de entrada y valores de salida ( $x_i$  y  $t(x_i)$ ).

- 30 2. Normalización de  $x_i$  y  $t(x_i)$  mediante (8).



3. Entrenamiento del modelo global:

(a) Cálculo de los coeficientes del polinomio.

5 4. Cálculo de los errores utilizando la ecuación (7)

5. Entrenamiento del modelo local utilizando los errores:

(a) Memorización de los datos de entrada y los errores correspondientes

10 Cálculo del modelo híbrido incremental:

1. Obtención de los puntos de evaluación (velocidad cuadrática de avance por diente y vibración media cuadrática en el eje Z)

15 2. Normalización de los puntos de evaluación con (8), pero con  $\mu$  y  $\sigma$  del entrenamiento

3. Cálculo del modelo global en cada punto de evaluación

20 4. Cálculo del modelo local en cada punto de evaluación con (7)

5. Cálculo del modelo híbrido incremental en cada punto de evaluación con (6)

6. Desnormalización de los datos usando la inversa de (8)

25

Optimización de los parámetros del modelo híbrido incremental en base al algoritmo de temple simulado.

30 Por último, se puede utilizar el algoritmo del temple simulado para optimizar los parámetros del modelo híbrido obtenido en los pasos anteriores. El temple simulado (SA, Simulated Annealing) es un método de búsqueda meta-heurística para la resolución de problemas de optimización global que simula el proceso físico de templado de materiales, el cual consiste en el calentamiento de estos materiales y luego su lento enfriamiento para aumentar el tamaño de sus cristales y reducir sus defectos, y de esa forma minimizar la energía de todo  
35 el sistema.

El método fue propuesto de forma independiente por S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt y M. P. Vecchi, del "IBM Thomas J. Watson Research Center", in 1983 y por Vlado Černý, del Instituto de Física y Biofísica de la Universidad de Comenius (Bratislava), in 1985. El algoritmo es una adaptación del algoritmo de Metropolis-Hastings, que es un método de tipo Monte Carlo para generar muestras de estados de un sistema termodinámico.

Básicamente, en cada iteración el algoritmo genera un punto de forma aleatoria y calcula la distancia entre el nuevo punto y el anterior mediante una distribución de probabilidad con una escala proporcional a la temperatura. El algoritmo acepta todos los puntos nuevos que reducen el objetivo deseado, pero además, también acepta los puntos que lo incrementan con una cierta probabilidad. Al aceptar los puntos que incrementan el objetivo, el algoritmo evita quedarse atrapado en mínimos locales, y permite una mayor exploración del espacio de búsqueda por más posibles soluciones. El algoritmo, según su avance, selecciona una planificación del templado para sistemáticamente disminuir la temperatura. Con el decremento de la temperatura, el algoritmo reduce el espacio de búsqueda hasta converger a un mínimo.

El método de temple simulado consiste principalmente en tres relaciones:

$g_T(x)$ : Densidad de probabilidad del espacio de estado de  $D$  parámetros  $x = \{x^i; i = 1, \dots, D\}$ , refiriéndose a  $T$ , como la temperatura.

$h(\Delta E)$ : A partir de la variación de la energía, obtenida como la diferencia entre el valor actual y el anterior, calcular la probabilidad de aceptación de una nueva función de coste.

$T(k)$ : Planificación de la "temperatura de templado"  $T$  en  $k$  pasos de tiempo de templado.

La probabilidad de aceptación está basada en la oportunidad de un nuevo estado con "energía"  $E_{k+1}$ , relativo al estado previo con "energía"  $E_k$ ,

$$h(\Delta E) = \frac{e^{-E_{k+1}/T}}{e^{-E_{k+1}/T} + e^{-E_k/T}} = \frac{1}{1 + e^{\Delta E/T}} \approx e^{-\Delta E/T}; \quad \Delta E = E_{k+1} - E_k \quad (11)$$

La ecuación anterior no es más que la distribución de Boltzmann, siendo  $\Delta E$  la diferencia de energía entre los estados consecutivos y el valor de energía en cada instante, se determina mediante la función de coste a minimizar.

- 5 Considerando el conjunto de estados  $x$ , con una energía  $e(x)$ , un conjunto de distribuciones de probabilidad  $p(x)$  y la distribución de energía por estado  $d(e(x))$ , el algoritmo también puede ser descrito a partir de la energía total  $E$ :

$$E = \sum_x p(x)d(e(x)) \quad (12)$$

- 10 A partir de un estado de referencia  $\bar{x}$ , el valor máximo de entropía  $S$  del sistema puede obtenerse como,

$$S = -\sum_x p(x)\ln(p(x)/p(\bar{x})) \quad (13)$$

- 15 El empleo de multiplicadores de Lagrange para limitar la energía al valor medio  $T$ , conduce a la distribución más probable de Gibbs  $G(x)$  normalizada:

$$G(x) = \frac{1}{Z} e^{-H(x)/T}; \quad Z = \sum_x e^{-H(x)/T} \quad (14)$$

- 20 donde  $Z$  es la función de partición y  $H$  es el operador Hamiltoniano utilizado como función de energía.

Para las distribuciones de los estados (13), introducidas anteriormente, y probabilidades de aceptación del tipo como la definida en (14), se mantiene el principio de equilibrio del

- 25 balance detallado. Por ejemplo, dada las distribuciones de estados consecutivos  $G(x_k)$  y  $G(x_{k+1})$ , aplicando el criterio de aceptación,  $h(\Delta E) = h(E_{k+1} - E_k)$ , resultan iguales:

$$G(x_k)h(\Delta E(x)) = G(x_{k+1}) \quad (15)$$

- 30 Lo anterior es suficiente para establecer que todos los estados del sistema pueden ser

muestreados. Sin embargo, la planificación del templado interrumpe el equilibrio cada vez que la temperatura cambia, y de esta forma, en el mejor de los casos, esto debe realizarse cuidadosamente y de forma gradual.

- 5 Un aspecto importante en el algoritmo de temple simulado, es la selección del rango de los parámetros a ser buscados. En la práctica, el cálculo de sistemas continuos requiere de su discretización, por lo que podemos asumir que el espacio de trabajo puede ser discretizado sin mucha pérdida de información. Existen, además, ciertas restricciones necesarias cuando se utilizan funciones de coste con valores integrales. En varias aplicaciones se suelen  
 10 utilizar técnicas para reducir el espacio inicial a medida que progresa la búsqueda. Por ejemplo, para muchos sistemas físicos es posible escoger como función de densidad de probabilidad del espacio de estado de los parámetros, la siguiente distribución de Boltzmann:

$$15 \quad g(\Delta x) = (2\pi T)^{-D/2} e^{-\Delta x^2/(2T)}; \Delta x = x - x_0 \quad (16)$$

tomándose  $\Delta x$  en la práctica como la desviación entre dos estados consecutivos, y siendo además  $T$ , una medida de las fluctuaciones de la distribución  $g$  en el espacio de dimensión  $D$  de  $x$ . A partir de  $g(\Delta x)$ , se ha demostrado que basta con obtener un mínimo global de  
 20 la energía  $E(x)$  si selecciona  $T$  que varíe de la forma:

$$T(k) = T_0 / \ln k \quad (17)$$

siendo  $T_0$  la temperatura inicial y se escoge lo suficientemente grande. Usualmente,  
 25 también suele realizarse la planificación de la temperatura de forma exponencial, es decir:

$$T(k) = T_0 e^{(\alpha-1)k} \quad ; \quad 0 < \alpha < 1$$

$$T(k+1) \approx \alpha T(k) \quad (18)$$

donde  $\alpha$  es una constante de reducción cuyos valores típicos se ajustan entre 0,8 y 0,99.  
 30 Por otra parte, para una variación rápida de la temperatura  $T$ , también se utiliza con frecuencia

$$T(k) = T_0 / k \quad (19)$$

En aplicaciones prácticas del algoritmo, a partir del cálculo de la variación de energía  $\Delta E$  y a partir de la probabilidad de aceptación  $h(\Delta E)$  definida en (16), se utilizan criterios de aceptación-rechazo del estado actual  $X_k$ , empleando el algoritmo de Metrópolis. Según este criterio, la probabilidad de aceptación se compara con un número  $R$  entre 0 y 1, generado de forma aleatoria mediante una distribución uniforme, evitando de esta manera que ocurra una convergencia prematura hacia un mínimo local y poder continuar la búsqueda del mínimo global.

El algoritmo de temple simulado se ejecuta de forma iterativa, generando nuevos estados  $X$  que minimicen la energía  $E$  del sistema (función objetivo), su ejecución terminará teniendo en cuenta varias condiciones diferentes:

- a) El nivel de energía  $E$  es menor o igual que cierto valor prefijado límite.
- b) Se ha alcanzado el nivel de tolerancia preconcebido para la variación de energía  $\Delta E$ .
- c) Se alcanza un máximo número de iteraciones predeterminadas.
- d) Se ha sobrepasado el tiempo máximo permitido de ejecución del algoritmo.

En el caso concreto descrito en el presente documento, el algoritmo de temple simulado comienza su ejecución con valores iniciales de los parámetros del modelo híbrido incremental  $K_{HIM} = [m_0, k_0, p_0]$ , donde  $m_0$  es el orden inicial del modelo, el número inicial de vecinos es  $k_0$  y  $p_0$  es el valor inicial del coeficiente de borrosidad y se evalúa el índice de comportamiento MAE (error absoluto medio), como función objetivo o de "energía del sistema", mediante las expresiones (20) y (21):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_N \frac{|Y - Y'|}{Y} \cdot 100 \quad (20)$$

$$K_{HIM} = [m, k, p]_{OPT} = \arg \min (MAE) \quad (21)$$

Como paso siguiente en la ejecución del algoritmo, de forma iterativa los parámetros  $K_{HIM}$

de modelado actuales son perturbados para generar otro  $K_{HIM_{NEW}}$  y se vuelve a evaluar el índice MAE. El criterio de aceptación o de rechazo está basado en el algoritmo de Metropolis. El algoritmo de temple simulado simula, de forma iterativa, el proceso de templado de metales a medida que busca una solución. Se genera una perturbación

5 aleatoria sobre las variables de diseño  $m, k, p$  que, a su vez, genera un cambio en la función objetivo, es decir, el índice de comportamiento MAE. Estas perturbaciones dependen de un índice de temperatura,  $T$  y una tasa de reducción de temperatura ( $\alpha = [0.5, 0.99]$ ). En el trabajo de D. Y. Sun and P. M. Lin en "The solution of time optimal control problems by simulated annealing," Journal of Chemical Engineering of Japan, vol. 39, pp.

10 753-766, 2006, se puede encontrar una descripción detallada de este parámetro de control de la temperatura.

El índice de temperatura disminuye en cada iteración del algoritmo, reduciendo así el tamaño de la perturbación a medida que progresa la búsqueda. Cada conjunto de

15 parámetros del modelo obtenidos por este método se sustituye en las ecuaciones del modelo híbrido incremental y se evalúa la precisión del modelo con cada uno de los datos de entrenamiento. El índice de rendimiento MAE se evalúa comparando las respuestas simuladas con las respuestas deseadas.

20 Si el índice de rendimiento es menor que el índice de rendimiento anterior, entonces los nuevos parámetros toman el lugar de los parámetros anteriores. En caso contrario, los nuevos parámetros del modelo no se descartan inmediatamente, sino que se someten a un proceso de evaluación de probabilidad donde se calcula la probabilidad  $P$  del coste de los nuevos parámetros ( $MAE_{NEW}$ ) con relación al mejor coste anterior ( $MAE_{PREV}$ ), utilizando la

25 ecuación de Boltzmann:

$$P = e^{\frac{(MAE_{PREV} - MAE_{NEW})}{T}} \quad (22)$$

Se compara entonces la probabilidad  $P$  con un valor umbral  $n$  (que es un valor entre 0 y 1

30 generado mediante una distribución uniforme). Si  $P > n$ , entonces se aceptan los nuevos parámetros del modelo como si  $MAE_{NEW} < MAE_{PREV}$  y se rechazan si  $P < n$ . Este mecanismo evita una convergencia prematura a un mínimo local y permite acercarse al mínimo global. Después de esta etapa, se reduce el índice de temperatura por medio de una

planificación del templado utilizando la constante de reducción  $\alpha = [0.5, 0.99]$ .

5 Todo este proceso se repite hasta que bien el índice de rendimiento MAE haya alcanzado un nivel mínimo aceptable o hasta que el valor de la temperatura haya alcanzado un valor demasiado bajo como para perturbar los parámetros. El objetivo principal es obtener un modelado óptimo de los parámetros que sirvan para conseguir un modelo rápido y preciso a través de la minimización del error medio absoluto (MAE) como índice de rendimiento. El ajuste óptimo de los parámetros de modelado se realiza off-line utilizando el método de temple simulado, obteniéndose un modelo híbrido incremental capaz de representar con  
10 muy buena precisión el comportamiento real del proceso.

En definitiva, el procedimiento de la invención presenta dos fases claramente diferenciadas: en primer lugar, entrenamiento de un modelo representativo del proceso de micromecanizado; y en segundo lugar, cálculo de la rugosidad a partir del modelo obtenido  
15 en la fase anterior. La fase de entrenamiento del modelo sólo se lleva a cabo una vez para cada máquina concreta, pudiendo posteriormente utilizarse el modelo híbrido obtenido para estimar la rugosidad en tiempo real durante el mecanizado de una pieza tantas veces como sea necesario.

20 La Fig. 1 muestra el montaje experimental empleado para la adquisición y procesamiento de datos. Se observa el sensor de vibración (2) instalado en la mordaza o mecanismo de sujeción de la pieza para medir la vibración de la máquina herramienta (1) en el eje Z. La señal analógica del sensor (3) es adquirida mediante tarjetas de adquisición (4) y se procesa mediante un programa de adquisición y procesamiento de tiempo real embebido en un  
25 dispositivo de cómputo de alto rendimiento (5). Los datos adquiridos y procesados se ponen a disposición en una red local (6), pudiéndose acceder a ella a través de un cliente web remoto (7). La información necesaria para el cálculo del avance por diente, como la velocidad de avance de la máquina, la velocidad de giro y la información geométrica de la herramienta, se pone a disposición también en la red local (6) a través de un servidor de  
30 datos de tiempo real (8) del control numérico (CNC) de la máquina (10). Ambos dispositivos de cómputo se encuentran interconectados a través del bus de campo (9).

La Tabla 1 muestra el conjunto de 21 datos obtenidos experimentalmente que se han utilizado en este ejemplo para llevar a cabo el ajuste del modelo híbrido incremental  
35 descrito. Se presentan en esta tabla no sólo los datos de avance por diente, vibración en el eje Z y rugosidad superficial, sino también un gran número de datos auxiliares:

	PosY:	Posición en el eje Y de la punta de la herramienta, respecto al origen de la pieza [mm].
5	PosX:	Posición en el eje X de la punta de la herramienta, respecto al origen de la pieza [mm].
	f:	Velocidad de avance [mm/min].
	n:	Velocidad de giro [1/min].
	fz:	Avance por diente [um].r: Radio de la herramienta [mm].
	Accel_rms:	Valor medio cuadrático de las vibraciones en el intervalo de datos [g].
10	Accel_max:	Valor máximo de las vibraciones en el intervalo de datos [g].
	Ra:	Rugosidad media absoluta de la superficie en el intervalo [nm].
	Rq:	Rugosidad media cuadrática de la superficie en el intervalo [nm].
	Rv:	Máxima profundidad del valle de la superficie en el intervalo [nm].
	Rp:	Altura máxima del pico de la superficie en el intervalo [nm].
15	Muestras/Intervalo:	Total de muestras en el intervalo para la medición de rugosidad.



ES 2 470 515 B1

PosY [mm]	PosX [mm]	f [mm/min]	n [1/min]	Fz [µm]	r [mm]	Accel_mms [g]	Accel_max [g]	Ra [mm]	Rq [mm]	Rv [mm]	Rp [mm]	Muestras / Intervalo
12	8,25	80	45000	0,88889	0,25	0,0262	0,10257	102,75	134,44	-657,52	297,88	7333
12	25,917	100	45000	1,1111	0,25	0,028317	0,15561	91,362	120,85	-849,45	279,26	7333
13	13,583	120	45000	1,3333	0,25	0,050049	0,19443	95,604	148,18	-1635	285,08	7333
18	15,917	200	45000	2,2222	0,25	0,014867	0,085213	88,538	136,29	-1513,5	255,97	7333
18	28,25	160	45000	1,7778	0,25	0,016169	0,099085	81,747	122,62	-844,75	238,91	7333
21	23,583	360	45000	4	0,25	0,011993	0,054595	156,96	225,07	-1345,6	506,88	7333
22	25,917	300	45000	3,3333	0,25	0,012071	0,057455	148,45	213,53	-1556	373,91	7333
20	8	80	40000	1	0,50	1,3386	5,6295	178,89	226,37	-924,07	862,73	5333
20	15,667	100	40000	1,25	0,50	2,2783	6,2525	167,59	212,65	-990,41	630,99	5333
20	23,333	120	40000	1,5	0,50	0,95401	3,2482	171,03	217,4	-936,59	494,49	5333
23,5	13,333	240	40000	3	0,50	1,3564	3,8861	249,49	308,83	-1217,8	880,4	5333
23,5	18	160	40000	2	0,50	1,3838	3,9785	237,64	300,21	-1069	795,96	5333
30	23,333	360	40000	4,5	0,50	0,1164	0,24094	295,01	373,28	-1884,9	818,45	5333
31,5	5,6666	300	40000	3,75	0,50	0,10185	0,29414	226,29	287,24	-1251,4	918,73	5333
14,5	27,6	80	15000	2,6667	0,90	1,2441	1,9268	337,62	430,38	-1344,9	1089,5	2133
17	5,2667	100	15000	3,3333	0,90	1,077	1,6353	325,4	441,53	-1350,8	2645,2	2133
17	17,6	80	15000	2,6667	0,90	1,0435	1,6196	316,3	391,07	-1008,2	1042,7	2133
17	22,933	120	15000	4	0,90	1,1453	1,6907	392,32	488,63	-1251,5	1546,7	2133
33,5	7,6	40	15000	1,3333	0,90	0,09464	0,22397	288,62	359,42	-1202,9	1172,4	2133
33,5	15,267	50	15000	1,6667	0,90	0,093389	0,228	294,8	357,55	-844,93	1169,8	2133
33,5	22,933	60	15000	2	0,90	0,093431	0,22928	287,54	353,84	-999,87	845,74	2133

Tabla 1: Datos experimentales utilizados para la elaboración del modelo híbrido incremental

Empleando este conjunto de datos como datos de partida, el modelo híbrido incremental correspondiente a la máquina utilizada en este ejemplo queda ajustado de la siguiente forma:

Orden del modelo:	$m = 1$
Número de vecinos:	$k = 8$
Coefficiente de borrosidad:	$p = 2.712$

5

El modelo tiene como salida la rugosidad superficial media absoluta ( $R_a$ ), expresada en nanómetros (nm) y como entradas el valor cuadrático del avance por diente ( $f_z^2$ ) normalizado con relación al radio de la herramienta ( $r$ ), ambos expresados en nanómetros (nm), y la vibración media cuadrática en el eje Z ( $A_{rms}$ ) normalizada con relación a su valor máximo ( $A_{max}$ ) durante una ventana temporal. Matemáticamente, se puede representar como:

$$R_a = f \left( \frac{f_z^2}{r}, \frac{A_{rms}}{A_{max}} \right) \quad (23)$$

15 Por último, las Figs. 2-4 muestran gráficamente los resultados de la estimación de la rugosidad superficial de algunos procesos utilizando el modelo obtenido. Concretamente, la Fig. 2 muestra los valores de rugosidad superficial estimados cuando se introducen en el modelo obtenido los propios datos de la Tabla 1 empleados para calcularlo. Evidentemente, el resultado es que los valores reales y estimados coinciden, por lo que el error es el 0%.

20

La Fig. 3 muestra un ejemplo de predicción de la rugosidad superficial con datos nuevos correspondientes a un proceso de microfresado. Se han representado los valores de rugosidad estimados y los valores de rugosidad reales, que fueron medidos con posterioridad con un perfilómetro. Como se aprecia visualmente, el método de monitorización empleado sigue con bastante precisión el comportamiento de la rugosidad real en la mayoría de los casos. Para comprobarlo, la Fig. 4 ilustra el comportamiento del error en la estimación de la rugosidad correspondiente a la Fig. 3, observándose que el error medio absoluto entre todas las pruebas realizadas es de un 10.9%.

30

## REIVINDICACIONES

1.- Procedimiento para monitorizar en tiempo real la rugosidad de una pieza durante un proceso de mecanizado, donde el procedimiento es llevado a cabo por una máquina dotada de un cabezal al que está acoplada una herramienta de mecanizado, caracterizado porque comprende los siguientes pasos:

a) calcular un modelo híbrido incremental del proceso de mecanizado mediante la superposición de un modelo global y un modelo local, donde el modelo global está formado por un polinomio de dos entradas de orden  $m$  y el modelo local se obtiene empleando la aproximación Fuzzy k-Nearest Neighbours con un número de vecinos  $k$  y un coeficiente de borrosidad  $p$  y donde se introducen unos primeros valores de velocidad cuadrática de avance por diente de la máquina, unos primeros valores de vibración media cuadrática en el eje Z de la herramienta y unos valores de rugosidad superficial de una pieza de prueba adquiridos durante un proceso de mecanizado de la pieza de prueba por la máquina;

b) adquirir unos segundos valores cuadráticos de velocidad de avance por diente y unos segundos valores de vibración media cuadrática en el eje Z en tiempo real durante el proceso de mecanizado de la pieza; y

c) calcular la rugosidad de la pieza mediante la introducción de los segundos valores cuadráticos de velocidad de avance por diente y los segundos valores de vibración media cuadrática en el eje Z en el modelo híbrido incremental del proceso de mecanizado calculado en el paso a).

2.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde los primeros valores de velocidad cuadrática de avance por diente de la máquina, los primeros valores de vibración media cuadrática en el eje Z de la herramienta y los valores de rugosidad superficial de la pieza de prueba empleados para calcular el modelo híbrido incremental son al menos 20 valores.

3.- Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, donde el paso de obtención del modelo híbrido incremental comprende:

- adquirir un conjunto de valores de la vibración media cuadrática en el eje Z, de valores de la velocidad cuadrática de avance por diente y de valores de rugosidad superficial a partir del mecanizado de la pieza de prueba por la máquina;

- ajustar, a partir de dicho conjunto de valores, el modelo global mediante un

algoritmo de mínimos cuadrados;

- ajustar, a partir de dicho conjunto de valores, los modelos locales de la rugosidad superficial aplicando la técnica Fuzzy k-Nearest Neighbors (F-kNN) y aplicar una norma euclídea para el cálculo de la cercanía entre vecinos; y

5 - generar el modelo híbrido incremental a partir de la superposición del modelo global y del modelo local.

4.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3, que comprende normalizar los valores de vibración media cuadrática en el eje Z y los valores de la velocidad cuadrática de avance por diente previamente al ajuste del modelo global y del modelo local.

5.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, donde los valores de la vibración media cuadrática en el eje Z se normaliza con relación a su valor máximo dentro del conjunto de valores, y los valores de la velocidad cuadrática de avance por diente se normalizan con relación al diámetro de la herramienta.

6.- Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, que además comprende ajustar el orden  $m$  del polinomio del modelo global, el número de vecinos  $k$  del modelo local y el coeficiente de borrosidad  $p$  del modelo local en base a un algoritmo de temple simulado.

7.- Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el paso del cálculo de la rugosidad de la pieza comprende:

a) adquirir los valores de la velocidad cuadrática de avance por diente y los valores de la vibración en el eje Z de la herramienta durante una ventana temporal cuya duración es proporcional a un período de rotación de la herramienta;

b) calcular el valor medio cuadrático de la vibración en el eje Z y normalizar con relación a su valor máximo durante dicha ventana temporal;

c) normalizar los valores de la velocidad cuadrática de avance por diente con relación al radio de la herramienta;

d) introducir los valores normalizados de la vibración media cuadrática en el eje Z y de la velocidad cuadrática de avance por diente en el modelo híbrido incremental para calcular la rugosidad superficial instantánea de la pieza.

8.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 7, donde la ventana temporal tiene una duración correspondiente a 10 veces el período de rotación de la herramienta.

5 9.- Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 o 8, que comprende, como fase previa a la adquisición de los valores de la velocidad cuadrática y de la vibración en el eje Z, detectar un inicio efectivo del mecanizado mediante la detección del instante en el que la herramienta contacta con la pieza.

10 10.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 9, donde la detección del instante en que la herramienta contacta con la pieza se determina en función de la conductividad del conjunto máquina-herramienta-pieza.

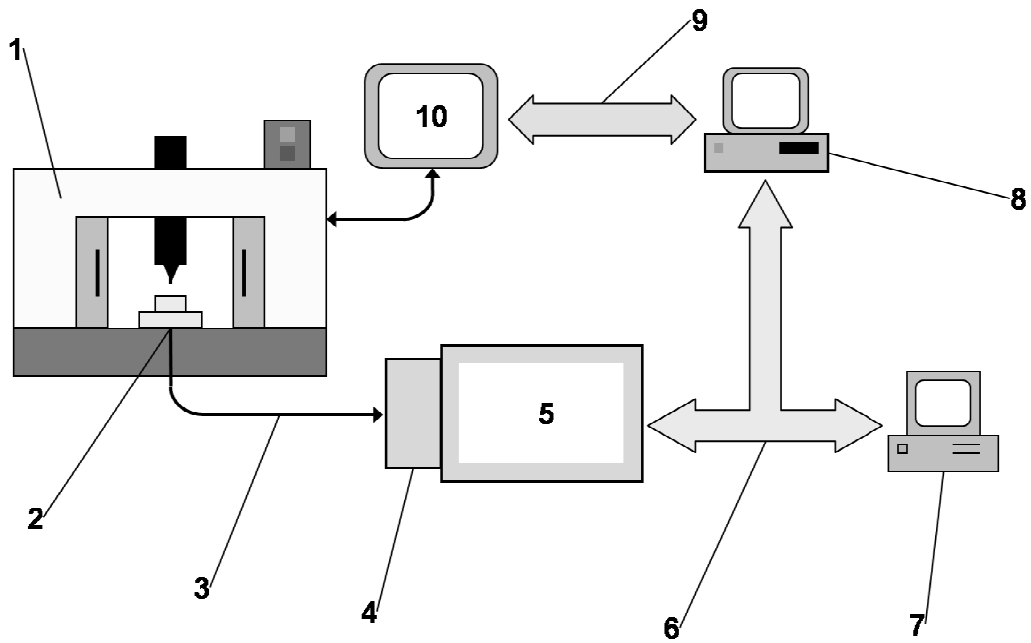
11.- Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10, que además comprende un filtrado de los valores de vibración en el eje Z adquiridos.

15 12.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 11, donde el filtrado se lleva a cabo mediante un filtro digital de respuesta infinita al impulso (IIR) de Butterworth pasa-alto de 6º orden cuya frecuencia de corte es igual a la mitad de la frecuencia de giro de la herramienta.

20 13.- Programa de ordenador que comprende instrucciones de programa para hacer que un ordenador lleve a la práctica el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.

14.- Programa de ordenador según la reivindicación 13, incorporado en medios de almacenamiento.

25 15.- Programa de ordenador según la reivindicación 13, soportado en una señal portadora.



**FIG. 1**

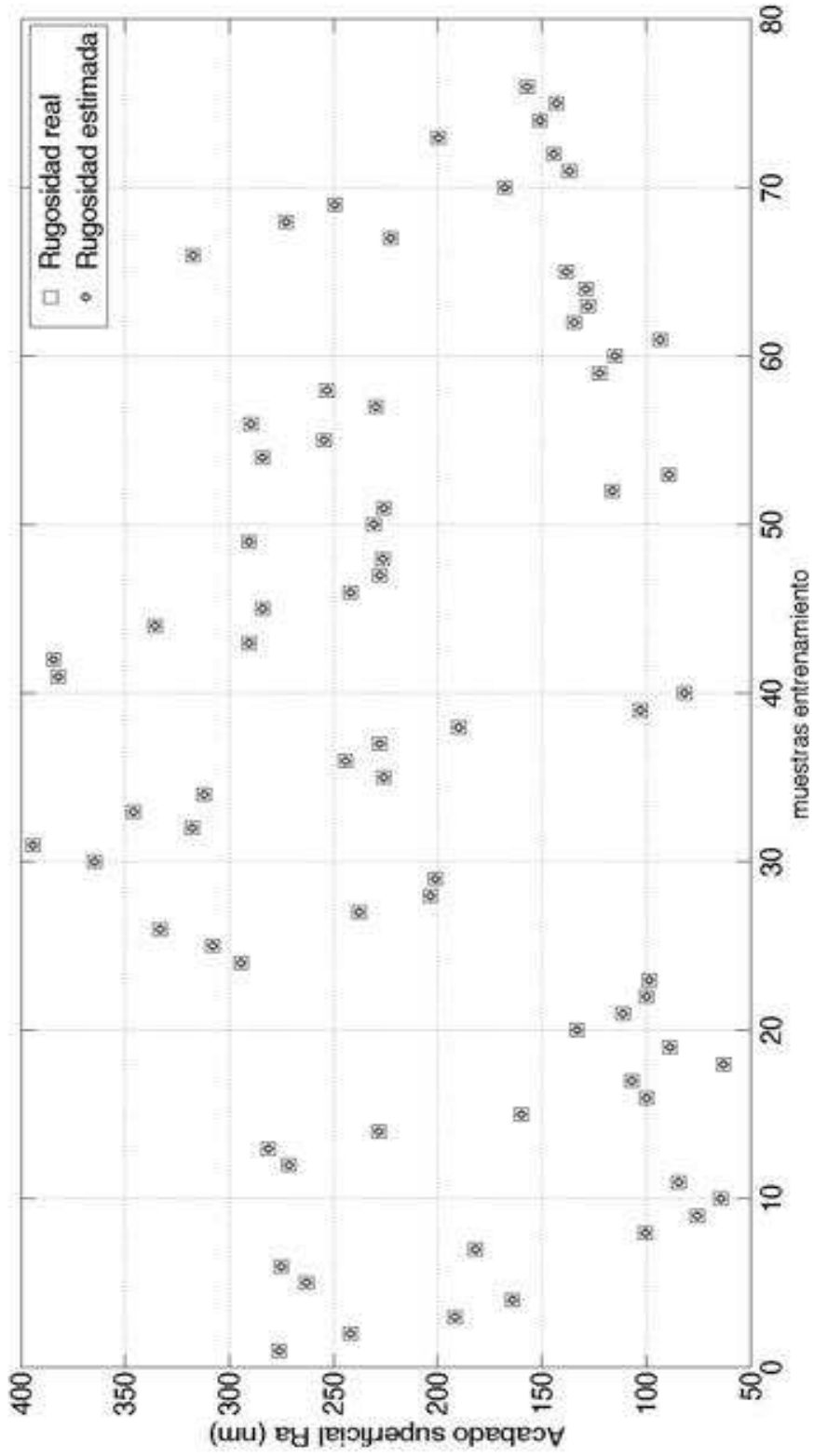


FIG. 2

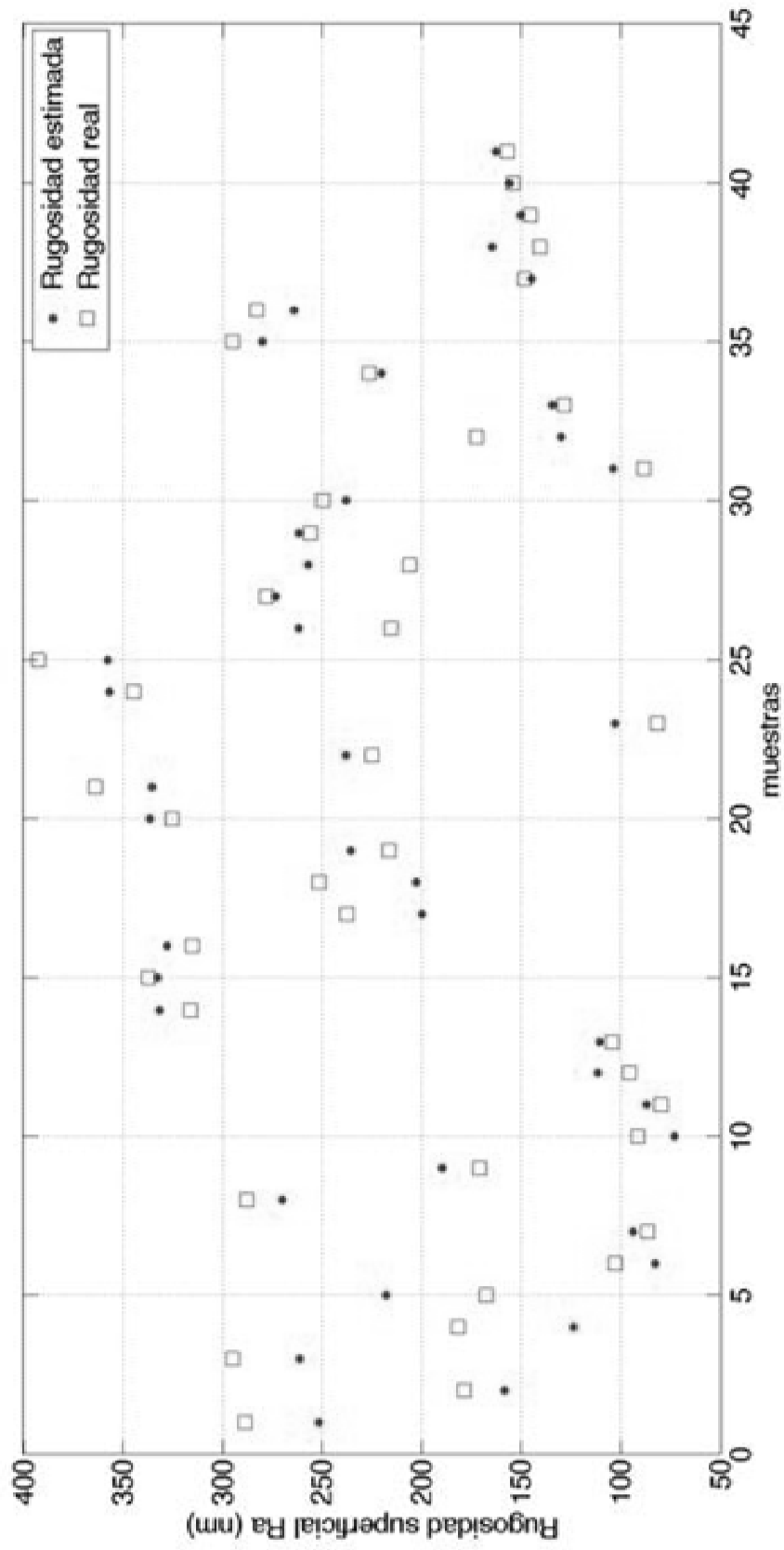


FIG. 3



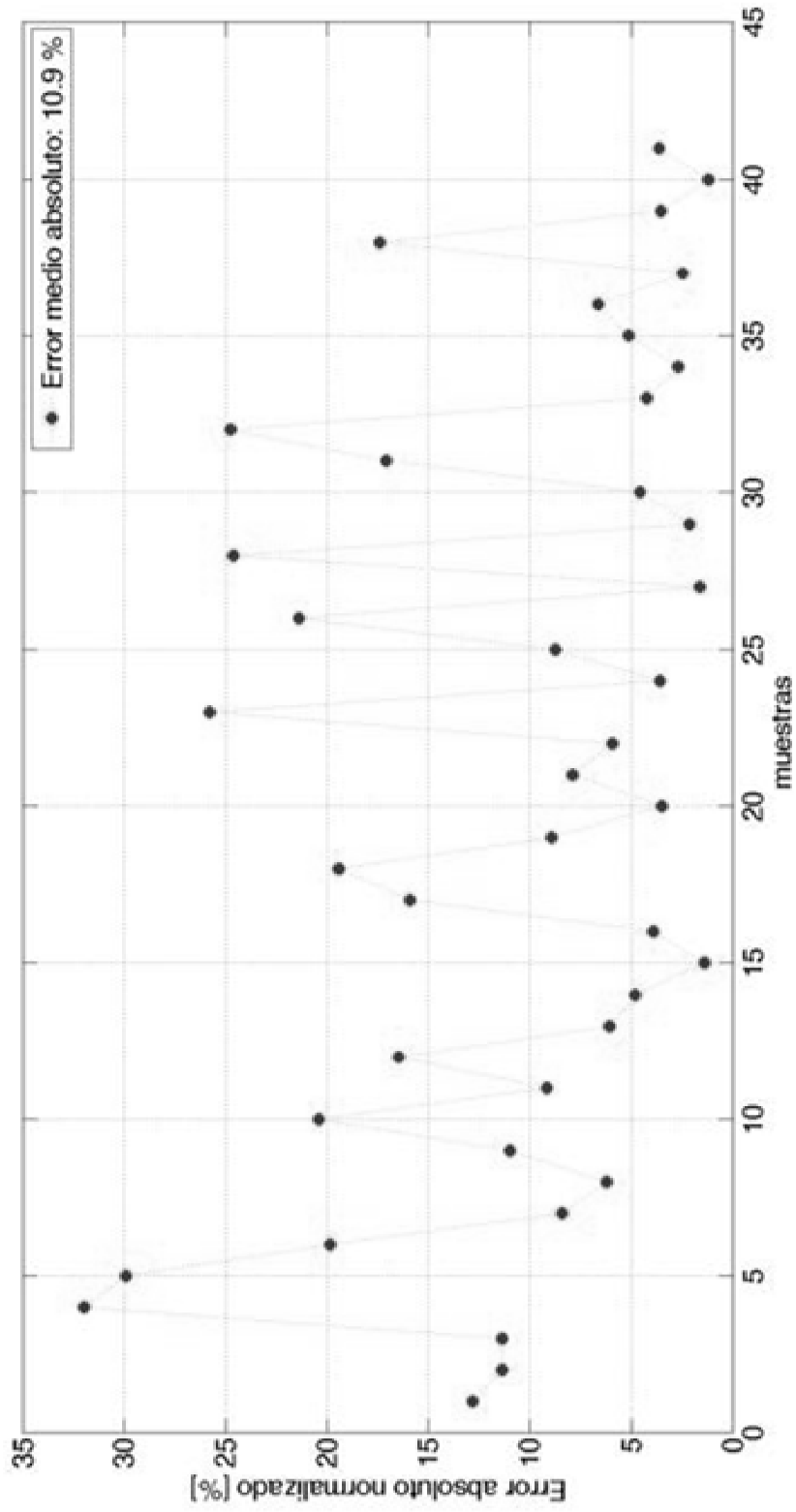


FIG. 4