

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 465 747**

21 Número de solicitud: 201231687

51 Int. Cl.:

G05B 19/4065 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION

B1

22 Fecha de presentación:

06.11.2012

43 Fecha de publicación de la solicitud:

06.06.2014

Fecha de la concesión:

18.03.2015

45 Fecha de publicación de la concesión:

26.03.2015

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2013/070760

73 Titular/es:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (50.0%)
SERRANO, Nº 117
28006 MADRID (Madrid) ES y
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (50.0%)**

72 Inventor/es:

**DEL TORO MATAMOROS, Raúl Mario;
CASTAÑO ROMERO, Fernando y
HABER GUERRA, Rodolfo Elias**

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

54 Título: **PROCEDIMIENTO Y SISTEMA PARA LA MONITORIZACIÓN EN TIEMPO REAL DE UNA OPERACIÓN DE MECANIZADO.**

57 Resumen:

Procedimiento y sistema para la monitorización en tiempo real de una operación de mecanizado.

La presente invención divulga un procedimiento de alta precisión para monitorizar en tiempo real el estado del contacto herramienta-pieza de trabajo en operaciones de mecanizado y la detección de la rotura de la herramienta. Un primer aspecto de la invención describe un procedimiento de monitorización del comportamiento dinámico del proceso de corte de una operación de mecanizado, basado en la medida de la caída de voltaje entre herramienta de corte y pieza. El método es especialmente útil en operaciones de micromecanizado aunque su concepto general es aplicable a operaciones de mecanizado en general. Un segundo aspecto está dirigido a un sistema para la monitorización en tiempo real de operaciones de mecanizado que comprende fundamentalmente: un sensor para determinar la caída de potencial herramienta-pieza de trabajo y unos medios de procesamiento que reciben la señal del sensor y están adaptados para llevar a cabo el procedimiento propuesto en la invención.

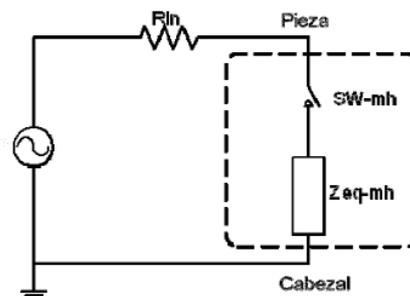


FIG. 2

ES 2 465 747 B1

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y sistema para la monitorización en tiempo real de una operación de mecanizado

OBJETO DE LA INVENCION

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

El objeto principal de la presente invención es un procedimiento de alta precisión para monitorizar, en tiempo real, el estado del contacto herramienta-pieza de trabajo en operaciones de mecanizado, lo que permite detectar la rotura de la herramienta.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

La monitorización en tiempo real de las operaciones de corte en procesos de fabricación es un factor clave para la detección de anomalías o eventos durante estas operaciones y permite poder realizar acciones correctivas, ya sea de manera automática o por operadores humanos, minimizando o limitando de esta forma las posibles afectaciones a los resultados esperados de las operaciones de corte realizadas. Es por ello que se han desarrollado una gran variedad de métodos para la monitorización en tiempo real de diferentes variables o eventos en procesos de fabricación, como es el caso de las operaciones de mecanizado convencional, empleando también un amplio abanico de estrategias de medición y de procesamiento de las señales medidas.

Además, a medida que se reduce la escala de trabajo (macro-meso-micro-nano), la monitorización de los procesos de fabricación se convierte en un factor indispensable, debido a que se dificulta la toma de decisiones por parte de los operadores humanos, al no poder detectar anomalías con el mero uso de sus sentidos naturales (visión o audición). Anomalías del tipo niveles de vibración en las máquinas en la escala de frecuencias audible por encima de su valor esperado, visualización de la rotura de la herramienta, etc., resultan prácticamente imposibles detectar en procesos que se producen en la micro-escala, como es el caso de las operaciones de micro-mecanizado.

Aunque no existe un consenso generalizado con relación a la definición de los términos nano-mecanizado, micro-mecanizado y macro-mecanizado, una definición ampliamente aceptada para estos términos es su significado literal, es decir, nano-mecanizado para el mecanizado de dimensiones entre 1 y 999 nm, micro-mecanizado para dimensiones entre 1 y 999 μm y macro-mecanizado 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.

Con el fin de abordar la problemática descrita, se han descrito diferentes tecnologías que han tenido como objetivo común la monitorización del estado de las herramientas de corte durante las operaciones de mecanizado y su interacción con las piezas a mecanizar, en diferentes operaciones de fabricación. Entre ellas, se pueden destacar las tecnologías que emplean el principio físico de la conductancia eléctrica entre la herramienta de corte y materiales conductores.

Los documentos US 3,476,013 y US 6,481,939 proponen el desarrollo de un aparato para determinar cuando se produce el contacto entre la punta de la herramienta y la pieza de trabajo. También utilizando este principio físico puede citarse la patente US 5,030,920, que describe un método para determinar el desgaste de la herramienta durante operaciones de torneado midiendo el valor de la resistencia de contacto o resistencia de difusión entre la herramienta de corte y la pieza. Utilizando este mismo principio, el documento ES 2308927 propone un sistema de monitorización y control de la herramienta y el cabezal para operaciones de micro-mecanizado similar al desarrollado en la patente EP 1888299.

Por otro lado, empleando principios físicos basados en la detección de ondas electromagnéticas, el documento US 5,940,787 desarrolla un aparato y método para monitorizar el estado de las herramientas de corte y las piezas en operaciones de taladrado durante la fabricación de circuitos impresos. El documento US 5,387,061 va un poco más allá, al proponer el desarrollo de un sistema de compensación de los errores que se producen en el sistema de posicionamiento en operaciones de mecanizado debido a los cambios de temperatura durante las operaciones de corte. De forma similar, el documento US 4,620,281 propone también una tecnología para compensación de los errores en el sistema de posicionamiento, pero debidos en este caso al desgaste de la herramienta.

Finalmente, en lo que respecta a detección de rotura de herramientas en procesos de fabricación, empleando también el principio físico de la conductividad eléctrica de los materiales, el documento US 5,584,216 reivindica el desarrollo de un sistema de detección de roturas de la herramienta, en este caso la punta del punzón, durante operaciones de estampado. También el documento US 4,246,577 reivindica un aparato que detecta la rotura de la

herramienta al comparar la distancia, desde una posición concreta, que debería existir entre la punta de la herramienta y la pieza, y la distancia real, en operaciones de taladrado. Por otro lado el documento US 7,052,215 describe el método de producir una herramienta que disponga de un circuito sensor para detectar el final de la vida útil de la herramienta durante el mecanizado de materiales semiconductores.

Varios de los trabajos mencionados se centran en determinar si existe o no conducción eléctrica entre herramienta y pieza, determinándose únicamente si el proceso está en estado de corte o no, información que resulta insuficiente para una monitorización adecuada del proceso. Además en estos trabajos sólo se utilizan operaciones de filtrado y rectificado para muy bajas frecuencias de las señales eléctricas, lo que provoca una reducción de la capacidad de alta velocidad de respuesta, y por tanto de la precisión, del sistema de monitorización.

Por ejemplo, detectar la rotura de la herramienta de corte solamente a partir del estado actual del contacto herramienta-pieza resulta poco efectivo dada la complejidad de las operaciones de mecanizado (ej., no uniformidad en la superficie de las piezas, discontinuidad en operaciones de corte como el fresado, cambio del diámetro y longitud de la herramienta debido a los cambios de temperatura durante el corte, etc.). Se hace necesario conocer el comportamiento de la dinámica o la evolución temporal del contacto herramienta-pieza durante las operaciones de mecanizado para tomar decisiones de forma efectiva sobre el estado de la herramienta. Utilizando para ello tanto información de las señales a baja frecuencia (ej, amplitud, valores medios o eficaces de las señales) como a la frecuencia en la que se produce el proceso de corte.

El método propuesto en la patente US 5,030,920, que utiliza la medición y el estudio de la resistencia de contacto eléctrico para determinar el posible desgaste de la herramienta, propone una monitorización de la resistencia del contacto herramienta-pieza. El método se describe aplicado a operaciones de torneado, pero su aplicación a otras operaciones de mecanizado más complejas, como es el caso del fresado debido a la intermitencia en el contacto herramienta-pieza, no es sencilla y requieren el desarrollo de procedimientos que permitan caracterizar el comportamiento dinámico de estos procesos de forma más efectiva.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

Un primer aspecto de la presente invención describe un procedimiento de monitorización del comportamiento dinámico del proceso de corte de una operación de mecanizado, basado en la medida de la caída de voltaje entre herramienta de corte y pieza, que da la posibilidad de caracterizar cada una de las diferentes fases del proceso de corte, lo que permite al operador de la máquina saber en tiempo real cuál es el estado de la operación de mecanizado. Se trata de un método especialmente útil en operaciones de micro-mecanizado aunque el concepto general del mismo es aplicable a cualquier operación de mecanizado en general. Nótese que es precisamente en las operaciones de micro-mecanizado donde el operario no puede comprobar por medio de sus sentidos el estado de las operaciones de corte que se llevan a cabo y, además, los requerimientos de precisión son mucho más altos, así como la velocidad de respuesta ante anomalía en el proceso. Por ese motivo, en la presente solicitud el término "mecanizado" abarca también "micro-mecanizado".

Para medir la caída de voltaje herramienta de corte-pieza, normalmente se utiliza un sensor, por ejemplo un sensor de conductancia, que se instala entre el mecanismo de sujeción de la herramienta de corte (por ejemplo, el cabezal de la máquina en operaciones de fresado y taladrado) y la pieza de trabajo. La pieza de trabajo debe estar aislada eléctricamente de la máquina, por lo que en caso de que el sistema de sujeción de la misma sea de un material conductor es necesario aplicar un material aislante entre ambas, preferentemente un material que comprende mica.

Para realizar la medida, preferentemente se aplica un voltaje de excitación de entre 5 Vpp (amplitud pico a pico de la señal) y 15 Vpp a una frecuencia mucho mayor que la frecuencia a la que se produce el corte de material, preferentemente al menos 5 veces mayor. Por otro lado, de forma general el valor máximo de la frecuencia de excitación estará limitado por el tipo de material aislante utilizado y sus dimensiones, de tal forma que este no se convierta en un elemento capacitivo, por lo que la frecuencia suele estar entre 5 kHz y 20 kHz. Por otro lado, para evitar daños en la máquina y proteger al operario, normalmente se limita la corriente máxima de excitación a menos de 2 mApp.

Se obtiene así una señal analógica correspondiente a la caída de voltaje de alterna entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo y se determina el estado de la operación de mecanizado (i.e., estado del contacto herramienta-pieza de trabajo) en función de la amplitud de dicha señal analógica medida, de tal modo que:

a) Cuando el voltaje medido mantiene un primer nivel de amplitud de manera continua, se determina que la herramienta de corte no está en contacto con la pieza de trabajo.

b) Cuando el voltaje medido mantiene un segundo nivel de amplitud de manera continua, se determina que la herramienta de corte está introducida dentro de la pieza de trabajo.

c) Cuando la amplitud del voltaje medido cambia de forma intermitente entre el primer nivel y el segundo nivel de amplitud (arranque de material de forma discontinua como es el caso de operaciones de fresado y micro-fresado) o adquiere valores de transición entre estos dos niveles (arranque de material de forma continua, como ocurre en otras operaciones de mecanizado), se determina que la herramienta de corte está introduciéndose en la pieza de trabajo, si anteriormente la herramienta de corte no estaba en contacto con la pieza de trabajo, o saliendo de la pieza de trabajo, si anteriormente la herramienta de corte estaba introducida dentro de la pieza de trabajo.

Normalmente, el primer nivel corresponde a un nivel alto de voltaje y el segundo nivel corresponde a un nivel bajo de voltaje, como se describirá en el ejemplo de realización que se describe más adelante en este documento. Sin embargo, nótese que también sería posible diseñar un circuito de medida para que ocurriese lo contrario, es decir, para que el primer nivel correspondiese a un nivel bajo y el segundo nivel correspondiese a un nivel alto. Por ello, la siguiente descripción se lleva a cabo haciendo referencia de manera general a un primer nivel y un segundo nivel.

En efecto, el voltaje presenta el primer valor, normalmente alto, mientras la herramienta de corte no toca aún la pieza de trabajo. Cuando se comienza a producir el contacto entre la herramienta de corte y la pieza, el valor de la señal puede cambiar de manera intermitente entre dicho primer valor y un segundo valor, o bien tomar valores intermedios o de transición entre ambos ya que, durante ese intervalo de transición, el contacto depende de la posición del filo de los dientes de la herramienta de corte en cada momento, por lo que el establecimiento de contacto puede producirse de forma alternativa según la frecuencia a la que se produce el arranque de material y la geometría de la herramienta. Una vez la herramienta está completamente dentro de la pieza, el contacto es continuo, ya que siempre hay al menos alguna sección del filo de la herramienta de trabajo que toca la pieza, por lo que el valor del voltaje adopta el segundo valor, normalmente bajo. Por último, la cuando herramienta de corte está saliendo de la pieza, de nuevo se pasa por un intervalo de transición durante el cual el contacto puede ser alternativo, y como consecuencia el voltaje también alterna entre los valores alto y bajo, o bien toma valores intermedios entre ambos. Por último, cuando la herramienta sale completamente de la pieza se vuelve al estado inicial sin contacto, y por tanto el voltaje adopta el nivel alto.

Aunque la información acerca del estado de una operación de mecanizado se encuentra implícita en la señal analógica de caída de voltaje obtenida, es necesario procesar adecuadamente dicha señal para obtener su amplitud y determinar de una manera concreta los estados del proceso de corte. Ello se podría hacer de diferentes modos, aunque a continuación se describe una realización preferida de la presente invención diseñada específicamente para procesos de micro-fresado. En el caso de operaciones de micro-fresado, se ha descubierto que el voltaje en las etapas de transición (entrada y salida de la pieza) alterna entre los dos valores mencionados. Por ello, en esta realización se aplican a la señal analógica de caída de voltaje dos filtros paso-bajo con dos frecuencias de corte determinadas (media y muy baja), obteniéndose como resultado dos señales analógicas cuya combinación permite determinar el estado del proceso de corte.

En efecto, la señal de frecuencias medias (o señal rápida) adopta el segundo valor (normalmente bajo) casi inmediatamente cuando se produce contacto entre la herramienta de corte y la pieza, y el primer valor (normalmente alto) cuando se pierde el contacto. Como consecuencia, esta señal rápida presenta el primer valor (normalmente alto) cuando la herramienta de corte está fuera de la pieza. Cuando la herramienta de corte está entrando en, o saliendo de, la pieza de trabajo, el valor de la señal en el caso concreto de micro-fresado cambia de manera intermitente entre los valores primero y segundo (alto y bajo). En tercer lugar, cuando la herramienta de corte está completamente dentro de la pieza, el contacto entre ambos es continuo, ya que siempre hay al menos alguna sección del filo de la herramienta de trabajo que toca la pieza, por lo que el valor de la señal presenta un segundo valor (normalmente bajo) de manera continua.

Los cambios de nivel de la señal de frecuencias bajas (o señal lenta), por el contrario, presentan un retraso, por lo que ésta sólo adopta el segundo valor (normalmente bajo) cuando la herramienta de corte está completamente dentro de la pieza de trabajo, adoptando el primer valor (normalmente alto) el resto del tiempo

En esta realización preferida de la invención, se utiliza la información que aportan la señal lenta y la señal rápida para determinar el estado de la operación de corte en cada momento. Más concretamente, esta realización preferida comprende los siguientes pasos:

- Obtener dos señales analógicas de la caída de voltaje entre el cabezal y la pieza de trabajo con componentes respectivamente de frecuencias medias y de frecuencias muy bajas. Preferentemente, las frecuencias medias están entre los 300 Hz y los 1000 Hz, mientras que las frecuencias muy bajas están entre los 0 Hz y los 25 Hz.

- Procesar dichas señales analógicas para obtener dos señales digitales que alternan entre un valor 1 correspondiente al primer valor analógico (normalmente alto) y un valor 0 correspondiente al segundo valor analógico (normalmente bajo). La señal digital rápida, por tanto, alternará entre 0 y 1 durante las etapas de transición (entrada y salida de la herramienta), mientras que la señal digital lenta únicamente adoptará el valor 1

cuando la herramienta de corte está completamente dentro de la pieza. Como consecuencia, se puede determinar lo siguiente.

5 - Cuando ambas señales digitales rápida y lenta adoptan el valor 0, la herramienta de corte no está en contacto con la pieza de trabajo.

- Cuando ambas señales digitales rápida y lenta adoptan el valor 1, la herramienta de corte está introducida dentro de la pieza de trabajo.

10 - Cuando la señal digital lenta adopta el valor 0 y la señal digital rápida cambia intermitentemente entre 0 y 1, y además inmediatamente antes la no había contacto entre la herramienta de trabajo y la pieza (es decir, ambas señales presentaban el valor 0), la herramienta de corte está introduciéndose en la pieza de trabajo.

15 - Cuando la señal digital lenta adopta el valor 0 y la señal digital rápida cambia intermitentemente entre 0 y 1, y además inmediatamente antes la herramienta de corte estaba introducida dentro de la pieza de trabajo (es decir, ambas señales presentaban el valor 1), que la herramienta de corte está saliendo de la pieza de trabajo.

20 En otra realización preferida, se utilizan las señales digitales rápida y lenta para obtener dos variables lógicas derivadas que permiten determinar con mayor precisión el estado del proceso de corte. La obtención de las variables lógicas derivadas se puede llevar a cabo a través de una herramienta de software, como se describe en el ejemplo particular de realización de la presente invención, o bien pueden obtenerse físicamente a través de un tratamiento digital adecuado a partir de las mencionadas señales digitales rápida y lenta. El término "variable lógica derivada", por tanto, hace referencia a ambas posibilidades, que son equivalentes desde el punto de vista de la implementación del método de la presente invención.

25 En efecto, se genera una primera variable lógica derivada a partir de la combinación de la señal digital rápida y la señal digital lenta, adoptando esta primera variable lógica derivada un valor 0 siempre que no existe ningún contacto entre la herramienta y la pieza y un valor 1 siempre que existe algún contacto entre herramienta y pieza, ya sea este contacto continuo o intermitente.

30 Por otro lado, se crea una variable que representa el ancho de los pulsos de la señal digital rápida. Cuando más anchos son los pulsos, mayor es el tiempo de contacto entre la herramienta y la pieza. Si se determina un umbral de anchura de pulsos a partir del cual se considera que el contacto es continuo, se puede generar una segunda variable lógica derivada que adopta el valor 0 siempre que no hay contacto continuo, y el valor 1 siempre que hay contacto continuo.

35 Estas dos nuevas variables lógicas derivadas permiten determinar el estado del contacto herramienta-pieza de trabajo durante la operación de micro-mecanizado como sigue:

40 - Cuando la segunda variable lógica derivada adopta el valor 1 o presenta un flanco de subida, la herramienta de corte está introducida dentro de la pieza de trabajo.

45 - Cuando la segunda variable lógica derivada adopta el valor 0 o presenta un flanco de bajada, y además la primera variable lógica derivada adopta el valor 0 o presenta un flanco de bajada, la herramienta de corte no está en contacto con la pieza de trabajo.

- Cuando la primera variable lógica derivada presenta un flanco de subida y la segunda variable lógica derivada adopta el valor 0, la herramienta de corte está introduciéndose en la pieza de trabajo.

50 - Cuando la primera variable lógica derivada adopta el valor 1 y la segunda variable lógica derivada presenta un flanco de bajada, la herramienta de corte está saliendo de la pieza de trabajo.

55 - Cuando la primera variable lógica derivada adopta un valor 1 y la segunda variable lógica derivada adopta un valor 0, y además inmediatamente antes la herramienta de corte estaba saliendo de la pieza de trabajo, la herramienta de corte sigue saliendo de la pieza de trabajo.

- Cuando la primera variable lógica derivada adopta un valor 1 y la segunda variable lógica derivada adopta un valor 0, y además inmediatamente antes la herramienta de corte estaba entrando en la pieza de trabajo, la herramienta de corte sigue entrando en la pieza de trabajo.

60 - Cuando la primera variable lógica derivada presenta un flanco de subida y la segunda variable lógica derivada presenta un flanco de bajada, se ha producido un evento inesperado en las señales.

Se consigue así proporcionar al operario de la máquina una herramienta que le permitirá tomar las decisiones más adecuadas en función del estado del proceso en cada momento. Además, los inventores de la presente solicitud han

descubierto que, en condiciones normales, la distancia que recorre la herramienta de corte al entrar completamente en la pieza de trabajo es del mismo orden de magnitud a la distancia que recorre al salir de ella. En el caso particular de que las velocidades de avance de la máquina a la entrada y a la salida sean similares (caso muy común), la distancia recorrida es equivalente al intervalo de tiempo que dura la entrada o la salida, que por tanto también son similares en condiciones normales. Sin embargo, una rotura de la pieza de trabajo se identifica en las señales descritas hasta el momento como una salida extremadamente rápida. En consecuencia, para determinar si se ha producido una rotura de la herramienta, o dicho de manera más general, una interrupción de la operación de corte, preferentemente se llevan a cabo las siguientes operaciones:

- 5
- 10 - Medir el intervalo de tiempo que tarda la herramienta o la distancia que recorre para salir de la pieza de trabajo.
- Comparar dicho intervalo de tiempo con un umbral calculado en función del tiempo que ha tardado o la distancia que ha recorrido la herramienta para entrar a la pieza de trabajo.
- 15 - Si dicho intervalo de tiempo es menor que dicho umbral, determinar que se ha producido una interrupción de la operación de corte.

Un segundo aspecto de la invención está dirigido a un sistema para la monitorización en tiempo real de operaciones de corte en procesos de mecanizado que comprende fundamentalmente los siguientes elementos:

a) Un sensor dispuesto entre la herramienta de corte, normalmente a través del mecanismo de sujeción de la herramienta de corte, y la pieza de trabajo para determinar la caída de potencial entre ambos. Por ejemplo, puede ser un sensor de conductancia.

b) Unos medios de procesamiento que reciben la señal del sensor y están adaptados para llevar a cabo el método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores. Estos medios de procesamiento pueden implementarse de diferentes modos, como por ejemplo mediante un microcontrolador, un microprocesador, un DSP, una FPGA, un programa de ordenador, etc. Sin embargo, como se verá más adelante en este documento, los inventores de la presente solicitud han desarrollado una tarjeta electrónica dedicada.

Además, se entiende que en caso de que el elemento de sujeción de las piezas de trabajo en la máquina herramienta esté hecho de un material conductor, será necesario disponer un elemento de aislamiento entre la pieza de trabajo y dicho medio de sujeción, por ejemplo un medio de aislamiento hecho de un material de mica.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Las Figs. 1a, 1b y 1c muestran los ángulos de inmersión radial de inicio y fin de corte, ϕ_{st} y ϕ_{ex} , para diferentes posiciones de la herramienta respecto a la pieza respectivamente para una operación de ranurado $a_e = D$, una operación de planeado $a_e < D$, y una operación de contorneado.

La Fig. 2 muestra un esquema equivalente al principio de funcionamiento del circuito de detección de la conductancia entre la pieza y la herramienta de corte.

Las Figs. 3a, 3b, 3c y 3d muestran los resultados obtenidos para diferentes voltajes y frecuencia de excitación.

La Fig. 4 muestra un esquema equivalente del sistema de la invención, donde sólo se representa el circuito de excitación, la etapa de rectificado y un filtro paso bajo RC.

La Fig. 5 muestra la señal filtrada para cada configuración RC paralelo en una operación de micro-fresado de una ranura de 7 mm con una herramienta de $d = 0.4$ mm, $n = 24000$ rpm y $f = 100$ mm/min. Las Figs. 5a y 5b muestran sendos detalles de la entrada y de la salida del material, respectivamente.

Las Figs. 6a, 6b y 6c muestran el comportamiento de las señales digitales obtenidas por el sensor durante una operación de ranurado, $N_f = 2$, $D = 0.4$ mm, $n = 24000$ rpm, $f = 100$ mm/min, $ap = 0.1$ mm y $ae = 0.4$ mm, respectivamente en todo el perfil de la pieza en la Fig. 6a, durante la entrada de la herramienta al material en la Fig. 6b, y durante la salida del material en la Fig. 6c.

Las Figs. 7a, 7b y 7c muestran el comportamiento de las señales digitales durante una operación de contorneado, $N_f = 2$, $D = 0.4$ mm, $n = 24000$ rpm, $f = 100$ mm/min, $ap = 0.1$ mm y $ae = 0.1$ mm, respectivamente en

todo el perfil de la pieza en la Fig. 7a, durante la entrada de la herramienta al material en la Fig. 7b, y durante la salida del material en la Fig. 7c.

Las Figs. 8a y 8b muestran unos histogramas del tiempo de contacto, $N_f = 2$, $D = 0.4$ mm, $n = 24000$ rpm, $f = 100$ mm/min, $ap = 0.1$ mm respectivamente correspondientes a una operación de ranurado con $ae = 0.4$ mm en la Fig. 8a, y a una operación de contorneado con $ae = 0.1$ mm en la Fig. 8b.

La Fig. 9 muestra los estados del proceso de micro-fresado, operación de ranurado.

La Fig. 10 muestra el comportamiento de las señales digitales rápida y lenta y de las variables lógicas derivadas durante una operación de ranurado, $N_f = 2$, $D = 0.4$ mm, $n = 24000$ rpm, $f = 100$ mm/min, $ap = 0.1$ mm y $ae = 0.4$ mm.

La Fig. 11 muestra el comportamiento de la señal analógica rápida durante una operación de ranurado, $N_f = 2$, $D = 0.2$ mm, $n = 40000$ rpm, $f = 96$ mm/min, $ap = 0.05$ mm y $ae = 0.2$ mm, respectivamente durante toda la operación en la Fig. 11a, durante la entrada de la herramienta al material en la Fig. 11b, y durante una rotura y salida abrupta del material en la Fig. 11c.

La Fig. 12 muestra un diagrama del comportamiento esperado de las variables lógicas derivadas durante los estados del proceso de corte.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

Se describe a continuación con mayor detalle un ejemplo de realización particular de la invención haciendo referencia a las figuras adjuntas. Estos ejemplos particulares están referidos a operaciones de micro-fresado, incluyendo ranurado, planeado y contorneado.

Fundamentación teórica de la resistencia de contacto

La resistividad eléctrica, también conocida como resistencia específica de un material, constituye una medida del grado de oposición de un material al paso de la corriente eléctrica. Una baja resistividad indica que el material permite fácilmente el paso de cargas eléctricas a través de él.

A partir de la magnitud E ($V m^{-1}$) de un campo eléctrico que se aplica a un material y la densidad de corriente J ($A m^{-2}$) que circula por el material, la resistividad estática ρ (Ωm) del material y su valor inverso o conductividad eléctrica σ , se determinan de acuerdo con la fórmula:

$$\rho = \frac{E}{J}, \sigma = \rho^{-1} \quad (1)$$

A partir de la resistividad de los materiales y según la geometría de estos, se puede determinar el valor total de la resistencia eléctrica R (Ω) que ofrece el material al paso de la corriente. Por ejemplo, para el caso de una pieza conformada por un solo material resistivo con un área A de sección transversal uniforme y una longitud ℓ , su resistencia eléctrica R , y por tanto también el inverso de esta o conductancia eléctrica G , se determinan según:

$$R = \rho \frac{\ell}{A}, G = R^{-1} \quad (2)$$

En operaciones de corte en piezas de materiales conductores, si se aplica un campo eléctrico al conjunto herramienta-pieza, se produce una resistencia eléctrica en los puntos de contacto (resistencia de contacto). Esta resistencia de contacto, también llamada resistencia de difusión, está causada debido a que la corriente que se genera debido al campo eléctrico aplicado circula desde una sección amplia, como es el caso de la sección transversal de la pieza, hacia un área muy reducida como el área de contacto entre la herramienta y el material. La resistencia que se produce durante las operaciones de corte R_c , depende principalmente, tanto de la resistividad eléctrica del material de la pieza ρ_p , de la resistividad del material del cual está conformada la herramienta ρ_t y

del área de contacto A_c , es decir:

$$R_c = f(\rho_p, \rho_t, A_c) \quad (3)$$

5 Para una caracterizar adecuadamente el área de contacto entre la herramienta de corte y el material que se mecaniza, es necesario realizar un estudio del modelo geométrico a lo largo del filo de corte helicoidal de las herramientas. El modelo geométrico del filo de corte requiere de un análisis del modelo cinemático y dinámico que describe de forma teórica el proceso de corte. La posición de un punto de contacto P en el filo de corte se caracteriza a partir de un sistema de coordenadas, del ángulo de la hélice y su distancia angular [del Toro-Matamoros, R. M., et al "Modelling and simulation of the high-speed milling process based on MATLAB-SIMULINK". Revista de Metalurgia, vol. 44, pp. 176-188, 2008; y Engin, S. y Y. Altintas "Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: helical end mills". International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001. 41(15): p. 2195-2212].

15 El diferencial del área de contacto en el punto P se calcula a partir de la longitud de la viruta en contacto con el filo de corte y la longitud infinitesimal del filo en el punto de contacto dS , la cual se determina de forma general según se describe en el documento de Engin, S. y Y. Altintas. Esto hace que el área de contacto dependa de las condiciones de corte, del material de trabajo, de la geometría de la herramienta y el tipo de refrigerante que se emplea durante las operaciones de corte [Imani, B.M., M.H. Sadeghi, y M.A. Elbestawi, "An improved process simulation system for ball-end milling of sculptured surfaces". International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1998. 38(9): p. 1089-1107]. Según esta referencia, la longitud de contacto con la viruta puede variar desde 2 y 3 veces el espesor de la viruta h , en dependencia de las condiciones de operación. Dado que la longitud de contacto de la viruta es mayor que el espesor de la viruta sin cortar, podemos definir un coeficiente de proporcionalidad o de "deformación" K_{def} , tal que el diferencial del área de contacto se puede determinar según la siguiente ecuación:

25

$$dA(\phi_j, z) = K_{def} h(\phi_j, z) dS, K_{def} \geq 1 \quad (4)$$

Siendo N_f el número total de dientes el área total de contacto entre la herramienta y el material, en cada instante de tiempo, y su valor medio por cada vuelta de la herramienta, se calculan integrando a lo largo de todo el filo y sumando el valor para cada diente que se encuentre insertado, es decir:

30

$$A_T = \sum_{j=1}^{N_f} A_{Tj} = \sum_{j=1}^{N_f} \int_{z_1}^{z_2} dA(\phi_j, z) = K_{def} \sum_{j=1}^{N_f} \int_{z_1}^{z_2} h(\phi_j, z) \frac{dS}{dz} dz \quad (5)$$

$$A_{TM} = \frac{\Omega}{2\pi} \int_{t_0}^{t_0+2\pi/\Omega} A_T dt \quad (6)$$

35 En la ecuación anterior debido a la intermitencia en el proceso de corte, el cálculo de la integral (área total para cada labio A_{Tj}) se realiza solo para los puntos de contacto que se encuentran insertados dentro del material. En los instantes de tiempo en que la herramienta no ha alcanzado la máxima profundidad radial de corte a_e , la integral a lo largo de todo el filo es válida si se cumple que $\phi_{st} \leq \phi_j \leq \phi_{ex}$, de otra forma A_{Tj} se considera nula para ese labio. ϕ_{st} y ϕ_{ex} son los ángulos de inmersión radial de entrada y salida a la pieza, respectivamente. Más adelante se harán algunas observaciones acerca de estos ángulos. Una vez alcanzado el valor de a_e , el cálculo de la integral sigue siendo válido, pero solo para aquellas zonas del filo de la herramienta que se encuentren insertadas dentro del material.

45 En la ecuación (5), z_1 y z_2 son los límites de integración de la zona de contacto en cada momento del corte y pueden calcularse a partir del modelo geométrico generalizado de la fresa. dz es el diferencial de la profundidad axial de corte. Los ángulos ϕ_{st} y ϕ_{ex} determinan el comportamiento dinámico del área de contacto, ya que definen el tiempo t_c en que el área de contacto es distinto de 0 en cada periodo de rotación de la herramienta. El tiempo de

contacto depende a su vez de la velocidad de giro del cabezal Ω :

$$t_c = f(\phi_{ex}, \phi_{st}, \Omega) \quad (7)$$

5 Los ángulos de inmersión radial de inicio y fin de corte, ϕ_{st} y ϕ_{ex} , se determinan a partir de la profundidad radial de corte a_e y dependen del tipo de operación de fresado, ya sea ranurado o contorneado. Tradicionalmente estos ángulos son considerados constantes durante la operación de corte si a_e no varía. Si se considera que la herramienta antes de comenzar el corte no se ha insertado aún en la pieza, a medida que vaya avanzando y comience el corte, el valor de la profundidad radial de corte prefijada será alcanzado en un instante de tiempo determinado por la velocidad de avance f y el diámetro de la herramienta D , esto hace que ϕ_{st} y ϕ_{ex} sean variables en el tiempo (véase la Fig. 1).

15 Consideraremos que en la operación de fresado la pieza de trabajo se mueve en dirección contraria a la herramienta y que, antes de iniciar el corte, la distancia entre el extremo de la herramienta y el borde de la pieza, a la profundidad radial de corte inicial, es nula (Fig. 1). Se determinarán las ecuaciones teóricas para los ángulos ϕ_{st} y ϕ_{ex} durante las operaciones de ranurado, planeado y contorneado.

En ambas operaciones existen tres intervalos de tiempo, delimitados por cuatro instantes de tiempo, que determinan el valor de estos ángulos: un tiempo inicial t_0 , un tiempo t_{max} en el que se alcanza la máxima profundidad radial prefijada durante la entrada de la herramienta al material, un tiempo t'_{max} en el que comienza la salida de la herramienta del material y un tiempo t_f a partir del cual la herramienta ha salido del material.

25 Durante el intervalo de tiempo $t_0 \leq t < t_{max}$ debe producirse un incremento del valor medio A_{TM} del área de contacto para cada vuelta de la herramienta. En el intervalo $t_{max} \leq t < t'_{max}$ el valor medio del área de contacto, en condiciones teóricas, debe permanecer prácticamente constante. Finalmente, durante el intervalo $t'_{max} \leq t < t_f$, se debe producir un decremento del valor medio del área de contacto. El comportamiento real del área de contacto se verá afectado por la propia dinámica del corte (vibraciones, etc.) y por las irregularidades de la superficie del material que se mecaniza, los cuales no son objeto de análisis en este trabajo.

30 Operaciones de ranurado y planeado

Las ecuaciones resultantes para estas dos operaciones son las mismas, el ranurado es un caso especial de la operación de planeado, en el que la profundidad radial de corte máxima o deseada es el diámetro de la herramienta $a_e = D$ (ver la Fig. 1a). En la operación de planeado sólo se considerará el caso de que no exista excentricidad entre la herramienta y la pieza cuando la profundidad radial de corte sea menor que el diámetro de la herramienta ($a_e < D$) (ver la Fig. 1b).

El tiempo en que la herramienta alcanza la profundidad radial de corte prefijada se determina mediante la siguiente ecuación,

$$40 \quad t_{max} = \frac{60}{f} \frac{D - \sqrt{D^2 - a_e^2}}{2} + t_0; \left[\frac{s \text{ min}^{-1}}{mm \text{ min}^{-1}} mm \right] \quad (8)$$

Habiendo determinado t_{max} se pueden plantear las ecuaciones para el cálculo en cada instante de tiempo de los ángulos de inmersión radial de inicio y fin de corte.

45

$$\phi_{st}(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \arccos\left(1 - \frac{2f}{60D}(t - t_0)\right), & t_0 \leq t < t_{\max} \\ \arccos\left(\frac{a_e}{D}\right), & t_{\max} \leq t < t'_{\max} \\ \frac{3\pi}{2} - \arccos\left(\frac{2f}{60D}(t - t'_{\max})\right), & t'_{\max} \leq t < t_f \end{cases} \quad (9)$$

$$\phi_{ex}(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} + \arccos\left(1 - \frac{2f}{60D}(t - t_0)\right), & t_0 \leq t < t_{\max} \\ \pi - \arccos\left(\frac{a_e}{D}\right), & t_{\max} \leq t < t'_{\max} \\ \frac{3\pi}{2} + \arccos\left(\frac{2f}{60D}(t - t'_{\max})\right), & t'_{\max} \leq t < t_f \end{cases} \quad (10)$$

5 Operaciones de contorneado

Para esta operación se debe determinar primeramente la distancia inicial L_0 entre el centro de la herramienta y el borde de la pieza, en el momento justo antes del comienzo de la inserción de la herramienta en la pieza (ver la Fig. 1c)

10

$$L_0 = \sqrt{Da_e - a_e^2} \quad (11)$$

A partir de la distancia L_0 se puede determinar el tiempo t_{\max} en que la herramienta alcanza la profundidad radial de corte prefijada.

15

$$t_{\max} = \frac{60L_0}{f} + t_0; \left[\frac{s \min^{-1}}{mm \min^{-1}} mm \right] \quad (12)$$

Conociendo L_0 y t_{\max} se pueden establecer las ecuaciones para el cálculo en cada instante de tiempo de los ángulos de inmersión radial de inicio y fin de corte.

20

$$\phi_{st}(t) = \begin{cases} \pi - \arccos\left(1 - \frac{2a_e}{D}\right), & t_0 \leq t < t'_{\max} \\ \pi + \arcsin\left(\frac{2f}{60D}(t - t'_{\max})\right), & t'_{\max} \leq t < t_f \end{cases} \quad (13)$$

$$\phi_{ex}(t) = \begin{cases} \pi - \arcsin\left(\frac{2}{D}(L_0 - f(t - t_0)/60)\right), & t_0 \leq t < t_{\max} \\ \pi, & t_{\max} \leq t < t'_{\max} \\ \pi + \arccos\left(1 - \frac{2a_e}{D}\right), & t'_{\max} \leq t < t_f \end{cases} \quad (14)$$

En este tipo de operación de corte el ángulo de inicio de corte ϕ_{st} permanece constante durante toda la operación hasta alcanzar el instante de tiempo t'_{max} , siempre que la profundidad radial de corte prefijada a_e no varíe.

De forma general, para ambas operaciones y cumpliendo la condición de que la diferencia entre los ángulos de entrada y salida sea menor que el paso angular entre dientes de la herramienta ϕ_p , el tiempo de contacto t_c puede calcularse mediante la ecuación (15). Este planteamiento es válido para los intervalos de tiempo $t_0 \leq t < t_{max}$ y $t'_{max} \leq t < t_f$. En caso contrario, para cada filo y vuelta de la herramienta, este tiempo dependerá de la continuidad del contacto herramienta-material.

$$t_c = (\phi_{ex} - \phi_{st}) / \Omega, \quad (\phi_{ex} - \phi_{st}) < \phi_p \quad (15)$$

Características principales del circuito para la monitorización

En definitiva, llegados a este punto se describe un procedimiento de monitorización de la evolución y comportamiento de las operaciones de micro-mecanizado según el área de contacto existente durante el corte que está basado en la instalación de un sensor de conductancia en el circuito pieza-herramienta. En la ecuación (3) se relaciona la resistencia de corte o de difusión con la conductancia eléctrica de los materiales que forman la herramienta y la pieza con el área de contacto. Por tanto, si se hace pasar una corriente de amplitud y frecuencia constante, generada mediante una fuente de AC, a través de la citada impedancia y, se mide el voltaje generado sobre la resistencia de difusión, puede determinarse una relación entre esta señal de voltaje y el área de contacto, y, por consiguiente, una observación del estado del corte en los procesos de micro fresado. La Fig. 2 muestra un circuito equivalente formado por un interruptor en serie con una impedancia. Igualmente. Puede verse que la salida de la resistencia R_m , está unida a la pieza, mientras que el polo negativo de la fuente de alimentación alterna (masa eléctrica del circuito) se conecta a la parte estática del cabezal.

Para que el procedimiento de la invención se pueda llevar a cabo, es condición indispensable que exista un circuito cerrado entre la pieza a mecanizar y la herramienta de corte, y que ambos sean conductores eléctricos. Este requisito se cumple en un gran número de operaciones de fabricación de piezas y moldes, considerándose en este ejemplo de realización concreto que la pieza a mecanizar está compuesta de una aleación de cobre y wolframio, habitual en componentes aeronáuticos.

Otro requisito que podría limitar el ámbito de aplicación del sistema de la invención, es la utilización de líquido refrigerante con dilución en agua, como por ejemplo la habitual "taladrina". Este refrigerante al contener agua es conductor de la electricidad, y se ha comprobado experimentalmente que altera en gran medida la respuesta del sensor. Por tanto, para poder llevar a cabo adecuadamente el procedimiento de la invención es necesario que el proceso de micro-mecanizado se lleve a cabo sin este tipo de refrigerante u otros que contengan sustancias conductoras de electricidad.

Además, la viabilidad del diseño de un sensor prototipo de conductividad pasa por el requerimiento básico de disponer de un circuito cerrado entre la parte estática del cabezal de la máquina y la pieza. Esta condición indispensable obliga a realizar esta comprobación inicial en las máquinas a las cuales se pretende instalar este dispositivo de medición, y a tomar las medidas adecuadas para garantizar su cumplimiento. Por ejemplo, se pueden utilizar materiales aislantes, tornillos, arandelas, etc. basados en mica.

45 Experimentos iniciales y filtrado

Para que el procedimiento y sistema de la invención proporcionen información útil sobre el estado del corte, es necesario determinar adecuadamente el grado de precisión, rango de voltaje y valor de la corriente de excitación que se utilizarán en el sistema final. Para ello, se llevan a cabo una serie de experimentos con ranuras planas cuyas condiciones de corte son las mismas ($d = 0.4 \text{ mm}$, $n = 24000 \text{ rpm}$, $f = 100 \text{ mm/min}$, $ap = 0,1 \text{ mm}$ y $ae = 0,4 \text{ mm}$), pero que varían en el voltaje de la señal de excitación de la impedancia generada entre la pieza y el cabezal.

Se aprecia que para las señales de la Fig. 3a y 3b donde el voltaje de excitación presenta un valor de 10 Vpp existe un cambio brusco de tensión eléctrica en la señal al pasar el proceso de los estados de corte a no corte. El valor de la señal, cuando existe contacto eléctrico, es menor que cuando no existe, mostrando una posible vía a la hora de monitorizar el proceso. Por el contrario, para las señales de la Fig. 3c y 3d donde el voltaje de excitación es de 2 Vpp, existe, igualmente, un cambio pero resulta ser superior al de excitación. Este efecto es debido a que la relación señal ruido es menor que cero (ruido mayor al de la señal original), lo cual indica que no es una señal válida a la hora de utilizarla en futuros estudios. Como consecuencia, y para posteriores experimentos, preferentemente se

toma un voltaje de excitación para el sensor de entre 5 Vpp y 15 Vpp, más preferentemente 10 Vpp.

Por otro lado, los experimentos anteriores muestran la presencia de ruido de baja frecuencia en el sistema debido a la electrónica de la máquina y al ruido ambiental producido a través de la carcasa de la máquina, por lo que en una realización preferida de la invención la señal alterna original es rectificadora y filtrada por medio de un filtro paso bajo RC para acentuar los diferentes estados de la operación de corte durante el proceso de micro-fresado. Como consecuencia de este pre-procesado se pierde cierto grado de precisión pero, a cambio, se obtiene una señal de mayor nitidez para monitorizar el corte. El circuito resultante una vez añadido el filtro paso bajo RC se muestra en la Fig. 4. Los valores que definen el filtro se definen experimentalmente, eligiéndose para los siguientes experimentos tres configuraciones diferentes del filtro con las siguientes frecuencias de corte: 0,7 Hz; 72,4 Hz; y 338,9 Hz.

Se realiza a continuación un nuevo experimento donde se mide el voltaje a través del conjunto pieza-cabezal utilizando cada una de las tres configuraciones del filtro. Los resultados se muestran en la Fig. 5, donde la señal C3 corresponde al filtro con la frecuencia de corte 338,9 Hz; la señal C2 corresponde al filtro con la frecuencia de corte 72,4; y la señal C1 corresponde al filtro con la frecuencia de corte 0,7 Hz. Se aprecian tres regiones claramente diferenciadas:

1. Región en la que no existe el corte (Región 1).

No existe contacto eléctrico alguno entre la herramienta y la pieza. Esta región no está explícitamente representada en la Fig. 1 anterior, aunque se entiende que sería anterior al momento inicial representado en la misma.

2. Región de corte con inserción total de la herramienta (Región 2).

La herramienta está totalmente insertada en la pieza a mecanizar una profundidad radial (ae) del diámetro de la herramienta. Existe un contacto total que no se ve afectado por el número de dientes de la herramienta (Nf) y la velocidad de giro (n), debido a la geometría de la herramienta. La parte inferior de la herramienta de corte siempre está en contacto eléctrico con el material durante el corte; si se mantiene en la condiciones de corte un ae igual al diámetro de la herramienta (d). Esta región tampoco está explícitamente representada en la Fig. 1.

3. Regiones de transición: entrada (Región 3) y salida (Región 4).

Estas regiones corresponden al momento en que la herramienta está entrando o saliendo del material a mecanizar. Existe un contacto parcial e intermitente relacionado con el número de dientes de la herramienta (Nf) y la frecuencia de giro (n). Ambas regiones están representadas en la Fig. 1, apreciándose cómo el contacto es intermitente según la posición de los dientes con relación a la pieza en cada momento.

Comportamiento de las señales digitales ante diferentes parámetros de corte

En vista de estos resultados, se determina que no es posible determinar de una forma automática cada una de las regiones del proceso únicamente a partir de una sola señal. Por ello, se decide la utilización de dos señales, que se eligen teniendo en cuenta el rizado y los tiempos de subida y bajada. Las señales elegidas son aquellas cuyo filtro RC corresponde a una frecuencia de corte respectivamente de 0,7 Hz y 338,9 Hz.

Una vez así definidas las condiciones del sistema de la invención, se diseña una placa electrónica que incluye el sensor de conductancia y un circuito de excitación para el suministro de la intensidad de corriente que circula entre la parte estática del cabezal y la pieza a mecanizar. La intensidad máxima se limita 2 mA, según criterios de protección de seguridad, tanto para el operario como para la propia máquina.

Se realizan a continuación diferentes experimentos utilizando el sensor de conductancia eléctrica diseñado con el objeto de caracterizar el proceso de corte en operaciones de micro-fresado. En el estudio se han seleccionado diferentes parámetros de referencia o de corte, de tal forma que se pueda realizar una caracterización adecuada del proceso a partir del comportamiento de las señales digitales que provee el sensor. En el estudio se ha realizado un mayor énfasis en operaciones con diferentes profundidades radiales ae , debido a su influencia en el comportamiento dinámico del área de contacto.

Las señales digitales proporcionadas por el sensor de conductancia se han adquirido mediante la detección de los flancos de subida y de bajada, evitando de esta forma una posible sobrecarga computacional debido a una monitorización continua con una frecuencia fija de muestreo. Además, el procedimiento de adquisición se ha configurado de tal forma que se detecten transiciones de nivel de las señales con un tiempo mínimo de muestreo de 250 μ s y un tiempo de espera máximo para la detección de los flancos de 3 segundos.

Las Figs. 6a, 6b y 6c muestran una operación de ranurado realizada en un perfil escalonado con unos canales transversales de 3 mm y 1.5 mm y una profundidad de 1 mm. En ella se puede apreciar el comportamiento de las

cuatro señales digitales que obtiene el sensor:

- Una señal digital que se obtiene del filtro de mayor frecuencia de corte o “señal más rápida” (denominada DIF).

5 - Una señal digital que se obtiene del filtro de frecuencia de corte más baja o “señal más lenta” (denominada DIS).

- Una señal que corresponde al ancho de los pulsos (FIW) de la señal DIF.

- Una señal que corresponde a la señal del ancho de los pulsos filtrada por medio de un filtro pasa-bajos de primer orden y frecuencia de corte igual a 10% de la frecuencia de giro (40 Hz) (variable FIW-m).

10 Las curvas del ancho de pulso y su valor filtrado, se han normalizado con respecto al periodo de rotación de la herramienta (2.5 ms), mostrándose solamente en un rango entre 0 y 3 veces este valor. Ambas señales digitales en “1” significan que hay contacto herramienta-material y en “0” que no hay contacto.

15 Como se puede apreciar claramente en las regiones pertenecientes a los intervalos de entrada y salida de la herramienta del material que se representan en las Figs. 6b y 6c, en el primero de los casos existe un incremento en el valor medio del ancho de los pulsos digitales (variable FIW-m), lo cual es indicativo de un incremento del tiempo de contacto. Este efecto, en cambio, es inverso cuando se produce la salida de la herramienta.

20 De la misma forma, en las Figs. 7a, 7b y 7c se ilustra el comportamiento de las mismas señales pero durante una operación de contorneado, empleando las mismas condiciones de corte, excepto la profundidad radial a_e igual en este caso a 0.1 mm (25 % del diámetro de la herramienta). Como puede observarse, las señales digitales muestran el comportamiento discontinuo del contacto herramienta-pieza durante esta operación. No obstante, el comportamiento del valor medio del ancho de los pulsos es similar al caso de la operación de ranurado, durante los intervalos de comienzo y final del contacto herramienta-pieza (entrada y salida).

25 Por otro lado, para cuantificar el comportamiento del ancho de los pulsos digitales y, por tanto, la duración del contacto herramienta-pieza durante toda la operación de corte, se ha obtenido el histograma del valor medio de esta señal (variable FIW-m). Con vista a obtener una distribución adecuada de los valores que alcanza esta variable, estos se han limitado entre el mínimo tiempo de muestreo (250 μ s) y un 90% de su valor máximo en toda la operación de corte, dividiendo, además, el rango de datos en 50 intervalos equidistantes. En las Figs. 8a y 8b se describe la distribución que se obtiene durante las operaciones de ranurado y contorneado. El ancho del pulso o tiempo de contacto, se ha normalizado con respecto al período de rotación de la herramienta.

30 Se observan algunos valores picos que aportan información relevante. En el caso de la operación de ranurado (Fig. 8a), dado que las señales digitales DIF y DIS solo varían durante las etapas de entrada y salida del material (en el resto de la operación la herramienta siempre se encuentra en contacto con el material), el valor máximo de la distribución se obtiene en el intervalo de datos [0.47 – 0.51], es decir, una duración aproximada de media vuelta de la herramienta, tal y como cabría de esperarse para esta herramienta (ver ecuaciones (9) y (10)).

35 Para la operación de contorneado (Fig. 8b), se han señalado dos puntos: el valor máximo de la distribución para el intervalo [1.03 – 1.07] (aproximadamente una vuelta completa de la herramienta) y un valor pico en [0.14 – 0.18]. Este último se corresponde al valor medio de la señal durante las etapas de transición (entrada y salida de la herramienta) y el primero está relacionado con el valor medio en el resto de la operación de corte.

40 En el caso de la operación de contorneado, si calculamos el valor máximo que alcanza el tiempo de contacto (durante las regiones de entrada y salida del material) a partir de las ecuaciones que definen los ángulos de entrada y salida de la herramienta, obtenemos que el tiempo de contacto es un 16.7% del período de rotación de la herramienta, ecuaciones (13), (14) y (15). Como podemos apreciar este valor se encuentra dentro del intervalo [0.14 – 0.18] determinado de forma experimental. Es decir, al sustituir $a_e = 0.1$ mm y $D = 0.4$ mm en las ecuaciones y el tiempo igual a t_{\max} o t'_{\max} , se obtiene:

$$\begin{aligned} \phi_{ex} - \phi_{st} &= \arccos(1 - 2a_e/D) = \arccos(0.5) = \pi/3 \\ t_c &= (\phi_{ex} - \phi_{st}) / (2\pi n) = 0.167/n \end{aligned} \quad (16)$$

55 Parecen así validarse, por tanto, las predicciones teóricas realizadas al inicio de este estudio.

Caracterización del proceso de corte

60 En el análisis realizado sobre el comportamiento de las señales digitales en diferentes operaciones de corte se ha podido apreciar que es posible caracterizar las diferentes etapas o estados del contacto herramienta-material. Inicialmente, como se aprecia en la Fig. 9, se pueden definir dos estados básicos o estacionarios que se denominan

"CORTANDO" y "NO CORTANDO". Estos estados se definen a partir de las dos señales digitales de voltaje elegidas de la siguiente forma:

- Si (DIF=1) o (DIS=1) entonces (Estado = CORTANDO)
 - En caso contrario (Estado = NO CORTANDO)
- (17)

Pero, como ya se ha comprobado del análisis teórico y experimental del comportamiento dinámico del contacto herramienta-material, es posible definir dos etapas de transición entre los dos estados definidos, que se denominarán: ENTRANDO (entrada al material) y SALIENDO (salida del material). Estos estados se pueden observar más claramente en operaciones de ranurado, en la cual, la señal digital DIF partiendo de un nivel lógico inicial "0", comienza a cambiar de nivel de forma intermitente durante la etapa ENTRANDO. Durante el estado de transición SALIENDO, la misma señal se comporta de la misma forma, pero partiendo del nivel lógico "1". Por otro lado, debido al origen de la señal DIS (no se muestra en la figura), esta solo alcanza el nivel lógico "1" cuando el contacto herramienta-pieza es continuo, por lo que se mantiene en el nivel lógico "0" durante estos estados de transición.

De acuerdo con ello, es posible describir los estados definidos de acuerdo con la siguiente tabla (Tabla 1):

Estado (consecuente)	Antecedentes	Descripción
NO CORTANDO	Si ($DIF = 0$) y ($DIS = 0$)	Estado estacionario , no existe contacto herramienta-pieza de trabajo.
CORTANDO	Si ($DIF = 1$) ó ($DIS = 1$)	Estado estacionario , existe contacto herramienta-pieza, si ambas señales están en el nivel lógico "1", significa que el contacto es continuo.
ENTRANDO	Si (<i>Estado anterior = NO CORTANDO</i>) y ($DIS = 0$) y (<i>DIF = cambia de forma intermitente</i>)	Estado transitorio , la señal digital <i>DIF</i> partiendo de un nivel lógico inicial "0", comienza a cambiar de nivel de forma intermitente, mientras la señal <i>DIS</i> permanece en el nivel lógico "0".
SALIENDO	Si (<i>Estado anterior = CORTANDO</i>) y ($DIS = 0$) y (<i>DIF = cambia de forma intermitente</i>)	Estado transitorio , la señal digital <i>DIF</i> partiendo de un nivel lógico inicial "1", comienza a cambiar de nivel de forma intermitente, mientras la señal <i>DIS</i> permanece en el nivel lógico "0".

Además de los antecedentes descritos en esta tabla, a partir del comportamiento de la duración del contacto según la señal DIF, o lo que es equivalente, a partir del comportamiento del valor medio del ancho de los pulsos de esta señal (FIW-m) durante los estados de transición y su influencia en el estado, podemos realizar el siguiente planteamiento:

- Si (FIW-m > Valor umbral) entonces (Estado = CORTANDO)
 - Si (FIW-m = 0) ó (FIW-m < Valor mínimo) entonces (Estado = NO CORTANDO)
- (18)

El planteamiento de esta reglas puede ser de gran utilidad, ya que permitiría confirmar o retener los estados estacionarios y, además, en el caso de operaciones donde el contacto es discontinuo (ej., operación de contorneado), puede ser tenida en cuenta para diferenciar las regiones de transición de los estados estacionarios del contacto herramienta-pieza.

35 Algoritmo para la detección del estado del proceso de corte

A partir de la definición de los estados del contacto herramienta-material y de los antecedentes que dan lugar a su definición, es posible diseñar un algoritmo computacionalmente eficiente mediante el cual se pueda monitorizar la operación de corte. Este algoritmo permitirá además detectar posibles fallas o anomalías durante las operaciones de micro-mecanizado.

Para determinar el estado del proceso es necesario verificar los antecedentes que le darán lugar. Para ello se impone el desarrollo de estrategias o funciones de procesamiento digital que permitan caracterizar el comportamiento de las señales digitales. Según los antecedentes establecidos, el procesamiento debe ser capaz de determinar:

- Nivel actual de las señales digitales: niveles lógicos "1" ("ON") y "0" ("OFF").
- Cambios de nivel de las señales digitales: flanco de subida \uparrow o de bajada \downarrow .
- Intervalos de intermitencia en el nivel de las señales.
- Duración de los pulsos de la señal DIF.

5 - Valores de umbral de la duración de los pulsos de esta señal que permitan discernir entre los estados de transición y los estados estacionarios: valor de umbral para el estado CORTANDO y valor mínimo para el estado NO CORTANDO.

10 Como paso inicial del procesamiento digital, a partir de cada señal de entrada se obtiene una nueva señal digital "filtrada" que elimina los cambios intermitentes de las señales originales. Se interpreta como "intermitente" los cambios de nivel que se producen a frecuencias similares a la frecuencia de giro de la herramienta, o bien dentro de un intervalo de tiempo proporcional a un número determinado de vueltas consecutivas de la herramienta.

15 Para este tipo de filtrado una solución aceptable es una función que simule un circuito digital monoestable re-disparable. La duración de la salida cuando está activada puede ser, además, de gran utilidad para determinar la duración de los intervalos de intermitencia de la señal digital de entrada. Denominaremos a las señales filtradas obtenidas de las entradas digitales como DFMS y DSMS.

20 Como segundo paso del procesamiento se calcula el ancho de los pulsos digitales de la entrada DIF (variable FIW), por medio de contadores. Se obtiene, además, su valor medio a través de un filtro pasa-bajos de primer orden y frecuencia de corte igual a 10% de la frecuencia de giro (variable FIW-m).

25 En la siguiente ecuación se describe la expresión para calcular la nueva variable, donde: $V_{in}(k)$ es la muestra en el instante actual k de la variable de entrada (en este caso FIW), $V_o(k)$ la señal filtrada FIW-m, $V_o(k-1)$ su valor en el instante de tiempo anterior, τ es el inverso de la frecuencia de corte del filtro y ΔT el tiempo entre muestras de la variable de entrada.

$$V_o(k) = \frac{(\tau/\Delta T)V_o(k-1) + V_{in}(k)}{(\tau/\Delta T) + 1} \quad (19)$$

30 Para implementar la regla descrita en (18), se ha generado una nueva señal denominada DIFW. Esta se obtiene empleando un comparador con histéresis aplicado a la variable FIW-m, en el que se ajusta un valor de umbral (inicialmente 60% del período de rotación de la herramienta) para determinar el nivel lógico "1" y un valor mínimo (inicialmente 40% del período de rotación de la herramienta) para establecer el nivel "0". A la nueva señal digital también se le ha aplicado la función de filtrado de tipo monoestable re-disparable para evitar cambios de nivel no deseados (señal denominada DFWMS).

35 A partir de las señales obtenidas mediante el procesamiento digital (DFMS, DSMS, DIFW y DFWMS) y las entradas digitales provenientes del sensor diseñado, se construyen los antecedentes de las reglas definidas en (17), (18) y la tabla anterior aplicando operadores lógicos (ver ecuación (20)). Estas operaciones lógicas devuelven como resultado una variable lógica que se mantiene en el nivel "1" durante todo el contacto herramienta-pieza, incluyendo las regiones de transición (CONF) y otras variables (CONS y CONFW), también lógicas, que se mantienen en el nivel lógico "1" solamente durante el estado estacionario CORTANDO.

- CONF = (DIF) **OR** (DFMS) **OR** (CONS)
- CONS = (DIS) **OR** (DSMS)
- CONFW = (DIFW) **OR** (DFWMS)

(20)

40 En la Fig. 10 se muestra un ejemplo del comportamiento temporal de estas variables lógicas. Se ha utilizado como señales digitales de entrada las obtenidas en el experimento de ranurado mencionado con anterioridad. En las gráficas también puede observarse las señales filtradas (salidas de las funciones monoestables re-disparables) DFMS y DSMS. Para su obtención se han ajustado las funciones correspondientes con un tiempo mínimo de activación para cada salida igual a 5 veces el periodo de rotación de la herramienta. Se describe además el comportamiento temporal de las variables lógicas CONF y CONS durante los 4 estados definidos en toda la operación de corte. Esta última, en este caso de operación de ranurado, presenta un comportamiento muy similar al de la variable CONFW.

45 A partir de las variables lógicas obtenidas y su estado, caracterizado por su nivel lógico ("0" o "1") y transiciones

(flanco de subida \uparrow o de bajada \downarrow), se puede establecer de forma preliminar el estado del proceso de corte en cada instante de tiempo. En siguiente tabla (Tabla 2) se describe un conjunto de reglas que definen el estado actual del proceso de corte a partir del estado de las variables lógicas CONFW y CONF.

		CONFW			
		(0)	(1)	(2)	(3)
CONF	(0)	NO CORTANDO	CORTANDO	NO CORTANDO	CORTANDO
	(1)	ENTRANDO	CORTANDO	SEÑAL	CORTANDO
	(2)	NO CORTANDO	CORTANDO	NO CORTANDO	CORTANDO
	(3)	TRANSICION	CORTANDO	SALIENDO	CORTANDO

5 Las reglas definidas se establecen, por ejemplo, de la siguiente forma: Si (CONFW = "0") y (CONF = "0") entonces (Estado del corte = NO CORTANDO). Para algunas de las combinaciones de los estados de las variables de entrada a la tabla, no existe un estado asociado como los ya definidos con anterioridad para el proceso de corte. Esto se debe a que el comportamiento de las variables no es el esperado (estado SEÑAL) o el consecuente de la regla no es único y el resultado final dependerá de los estados anteriores (estado TRANSICION). El primero de estos dos nuevos estados definidos puede ser de gran utilidad en un sistema de monitorización para indicar un comportamiento no esperado tanto en el procesamiento digital como en las señales digitales que provee el sensor desarrollado.

15 Finalmente, en el caso que el consecuente de la regla sea el estado TRANSICION, a partir del estado anterior del contacto herramienta-pieza, podemos determinar el estado actual como:

- Si (Estado preliminar = TRANSICION) y (Estado anterior = ENTRANDO)
Entonces (Estado del corte = ENTRANDO)
- Si (Estado preliminar = TRANSICION) y (Estado anterior = SALIENDO)
Entonces (Estado del corte = SALIENDO)

(21)

Detección de interrupciones en el proceso de corte

25 A partir de la estrategia desarrollada para la detección de los estados del proceso en operaciones de micro-fresado, se puede desarrollar un algoritmo que permite la monitorización del proceso en tiempo real y la detección de interrupciones en el proceso de corte, por ejemplo a causa de roturas de la herramienta de corte.

30 Como se ha podido comprobar en los experimentos realizados sobre el comportamiento del contacto herramienta-pieza, existen etapas de transición entre los estados de corte y no corte en las operaciones de micro-fresado. Estas etapas de transición pueden ser de vital importancia para monitorizar el proceso de corte y detectar eventualidades como es el caso de roturas de la herramienta. Si se produce un cambio abrupto del estado de la operación, por ejemplo, de CORTANDO a NO CORTANDO, sin estado de transición o, de existir, este tiene una duración muy pequeña, entonces se puede determinar que se ha producido una rotura de la herramienta. Para comprobar esta afirmación, en la Fig. 11 podemos observar el comportamiento de una de las señales analógicas ($Vz-mh-f$) que también provee el sensor de conductancia.

40 En la operación que se muestra, la herramienta de corte sufre una rotura durante el estado CORTANDO de la operación de corte y se produce un cambio abrupto hacia el estado NO CORTANDO, sin intermitencia en la señal durante la salida del material. Como se puede apreciar, el tiempo de transición (T_{tran}) durante la entrada al material (T_{in}), igual a 20 milisegundos, es al menos unas 10 veces mayor que el tiempo de salida (T_{out}).

45 El experimento que se muestra en la Fig. 11 constituye una evidencia experimental del comportamiento dinámico del contacto herramienta-pieza en presencia de roturas de la herramienta. Esto da lugar a realizar un estudio sobre la relación entre los intervalos de duración de los estados transitorios de ENTRADA y SALIDA y de esta manera establecer reglas que ayuden en la toma de decisiones sobre el estado del corte durante las operaciones de micro-fresado.

Una forma muy sencilla de delimitar los estados transitorios es realizando operaciones lógicas sobre las variables lógicas CONFW y CONF. Dado que la variable CONF debe permanecer en el nivel lógico "1" durante toda la operación de corte (comportamiento esperado en operaciones de ranurado), mientras que la variable CONFW debe alcanzar este nivel solamente durante el estado CORTANDO, entonces al realizar una operación de suma lógica exclusiva (XOR) se obtendría una nueva variable lógica (PT) que en el nivel lógico "1" indica que estamos en presencia de un estado de transición (ver figura 12). Es decir:

$$PT = CONF \text{ XOR } CONFW$$

A partir de la variable lógica PT se puede determinar de manera muy sencilla el tiempo de duración de cada estado de transición, empleando por ejemplo un contador digital. Mediante la comparación entre los tiempos de transición (T_{tran}) de los estados de ENTRADA (T_{in}) y de SALIDA (T_{out}), se pueden establecer reglas que ayuden en la toma de decisiones acerca de una posible terminación abrupta del corte en las operaciones de micro-fresado (estado de corte INTERRUMPIDO).

Con el objetivo de definir estas reglas se han obtenido los tiempos de transición de entrada y salida en diferentes operaciones de micro-fresado, específicamente en operaciones de ranurado. Estos tiempos se muestran en la siguiente tabla (Tabla 3), donde $N_f = 2$ y $ae = D$ y donde la fila resaltada corresponde a la rotura de la herramienta:

Tiempos de transición		Parámetros de corte			
T_{in} (s)	T_{out} (s)	f (mm/min)	n (min^{-1})	ap (mm)	D (mm)
0.097	0.188	100	24000	0.10	0.4
0.103	0.183	100	24000	0.10	0.4
0.102	0.178	100	24000	0.10	0.4
0.020	0.045	400	24000	0.10	0.4
0.022	0.045	400	24000	0.10	0.4
0.020	0.043	400	24000	0.10	0.4
0.020	0.002*	96	40000	0.05	0.2
0.118	0.121	100	45000	0.02	0.2
0.035	0.129	100	45000	0.02	0.2
0.040	0.121	100	45000	0.02	0.2

Como puede apreciarse el tiempo de salida T_{out} , por lo general, es mayor que el tiempo de entrada T_{in} correspondiente, excepto en el caso que se produce la rotura de la herramienta. Aunque este comportamiento no es generalizable debido a que en los datos mostrados, la velocidad de avance permanece constante durante toda la operación. Se da el caso que en determinadas operaciones de corte la velocidad puede variar en tramos del material, pero normalmente los cambios no se producen de forma abrupta. Para evitar la influencia de la velocidad de avance, la duración de las transiciones se puede expresar en términos de distancia recorrida por la herramienta.

A partir de la relación T_{out} vs. T_{in} , se puede detectar la terminación abrupta del estado CORTANDO. Analizando los valores de estos tiempos de transición y en dependencia del estado del proceso de corte, podemos establecer la siguiente regla: si el estado de corte preliminar es NO CORTANDO, el estado del corte anterior es SALIENDO y el tiempo de salida T_{out} es menor que un valor porcentual α_{break} del tiempo de entrada T_{in} , entonces el estado de corte ha sido INTERRUMPIDO.

La siguiente tabla (Tabla 4) muestra la toma de decisiones sobre el estado del corte y la herramienta a partir del estado anterior y el estado preliminar establecido mediante el procesamiento de señales.

Estado anterior	Estado preliminar	Operación y estado final
	CORTANDO	$T_{in} = T_{tran}$
ENTRANDO	NO CORTANDO	Si $T_{tran}(k) > T_{out}(k-1)$ entonces Estado del corte = INTERRUMPIDO
	TRANSICION	Estado del corte = ENTRANDO
SALIENDO	NO CORTANDO	$T_{out} = T_{tran}$

		Si $T_{out} < \alpha_{break} T_{in}$ entonces Estado del corte = INTERRUMPIDO
TRANSICION		Estado del corte = SALIENDO
CORTANDO	NO CORTANDO	$T_{tran} = 0$ Si $T_{in} < T_{out}$ entonces Estado del corte = INTERRUMPIDO
NO CORTANDO	CORTANDO	$T_{tran} = 0$
INTERRUMPIDO	NO CORTANDO	Estado del corte = INTERRUMPIDO

5 Esta tabla presenta un conjunto de reglas y operaciones para detectar la rotura de la herramienta. Las reglas se establecen a partir del estado preliminar del corte (ver la Tabla 2 de estados, ecuación (21)) y el estado anterior del corte. Principalmente, se realiza una toma de decisión acerca de la transición entre los estados ENTRANDO, SALIENDO y CORTANDO, hacia el estado preliminar NO CORTANDO.

10 Aunque el procedimiento descrito puede ser implementado con ayuda de aparatos de ordenador y procesos ejecutados en tales equipos, 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, como en forma parcialmente compilada, o en cualquier otra forma adecuada para uso en la puesta en práctica de los procesos según la invención.

15 La portadora puede ser cualquier entidad o dispositivo capaz de soportar el programa. Por ejemplo, la portadora podría incluir un medio de almacenamiento, por ejemplo, una memoria ROM, una memoria CD ROM o una memoria ROM de semiconductor, o un soporte de grabación magnética, por ejemplo, un disco flexible o un disco duro. Como variante, la portadora podría ser un circuito integrado en el que va incluido el programa, estando el circuito integrado adaptado para ejecutar, o para ser utilizado en la ejecución de, los procesos correspondientes.

20 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 va 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.

25

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la monitorización en tiempo real de una operación de mecanizado, donde la operación de mecanizado es llevada a cabo por una máquina dotada de una herramienta de corte, caracterizado porque comprende medir la caída de voltaje de alterna entre la herramienta de corte y una pieza de trabajo y determinar el estado del proceso de mecanizado en función de dicho voltaje medido, donde:
- cuando el voltaje medido mantiene un primer nivel de amplitud de manera continua, se determina que la herramienta de corte no está en contacto con la pieza de trabajo;
 - cuando el voltaje medido mantiene un segundo nivel de amplitud de manera continua, se determina que la herramienta de corte está introducida dentro de la pieza de trabajo; y
 - cuando la amplitud del voltaje medido cambia intermitentemente entre el primer nivel y el segundo nivel o adquiere valores de transición entre estos dos niveles, se determina que la herramienta de corte está introduciéndose en la pieza de trabajo, si anteriormente la herramienta de corte no estaba en contacto con la pieza de trabajo, o saliendo de la pieza de trabajo, si anteriormente la herramienta de corte estaba introducida dentro de la pieza de trabajo.
2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 donde, para operaciones de micro-fresado, la determinación del estado de la operación en función del voltaje medido comprende:
- obtener dos señales analógicas (C3, C1) de la caída de voltaje entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo con componentes respectivamente de frecuencias medias (C3) y de frecuencias muy bajas (C1);
 - procesar dichas señales analógicas (C3, C1) para obtener dos señales digitales rápida (DIF) y lenta (DIS) que alternan entre un valor 1 correspondiente al primer valor y un valor 0 correspondiente al segundo valor;
 - determinar, cuando ambas señales digitales rápida (DIF) y lenta (DIS) adoptan el valor 0, que la herramienta de corte no está en contacto con la pieza de trabajo;
 - determinar, cuando ambas señales digitales rápida (DIF) y lenta (DIS) adoptan el valor 1, que la herramienta de corte está introducida dentro de la pieza de trabajo;
 - determinar, cuando la señal digital lenta (DIS) correspondiente a frecuencias lentas adopta el valor 0 y la señal digital rápida (DIF) correspondiente a frecuencias medias cambia intermitentemente entre 0 y 1, y además inmediatamente antes no había contacto entre la herramienta de trabajo y la pieza, que la herramienta de corte está introduciéndose en la pieza de trabajo; y
 - determinar, cuando la señal digital lenta (DIS) correspondiente a frecuencias lentas adopta el valor 0 y la señal digital rápida (DIF) correspondiente a frecuencias medias cambia intermitentemente entre 0 y 1, y además inmediatamente antes la herramienta de corte estaba introducida dentro de la pieza de trabajo, que la herramienta de corte está saliendo de la pieza de trabajo.
3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2, que además comprende:
- procesar las señales digitales rápida (DIF) y lenta (DIS) para obtener una primera variable digital derivada (CONF) que se mantiene en 1 durante siempre que haya contacto entre herramienta y pieza, ya sea este continuo o intermitente;
 - obtener una segunda variable digital derivada (CONFW) representativa de los momentos en que el valor medio del ancho de los pulsos de la señal digital rápida (DIF) supera un umbral correspondiente a un contacto continuo entre la herramienta de corte y la pieza;
 - determinar, cuando la segunda variable digital derivada (CONFW) adopta el valor 1 o presenta un flanco de subida, que la herramienta de corte está introducida dentro de la pieza de trabajo;
 - determinar, cuando la segunda variable digital derivada (CONFW) adopta el valor 0 o presenta un flanco de bajada, y además la primera variable digital derivada (CONF) adopta el valor 0 o presenta un flanco de bajada, que la herramienta de corte no está en contacto con la pieza de trabajo;
 - determinar, cuando la primera variable digital derivada (CONF) presenta un flanco de subida y la segunda variable digital derivada (CONFW) adopta el valor 0, que la herramienta de corte está introduciéndose en la pieza de trabajo;
 - determinar, cuando la primera variable digital derivada (CONF) adopta el valor 1 y la segunda variable digital derivada (CONFW) presenta un flanco de bajada, que la herramienta de corte está saliendo de la pieza de trabajo;
 - determinar, cuando la primera variable digital derivada (CONF) adopta un valor 1 y la segunda variable digital derivada (CONFW) adopta un valor 0, y además inmediatamente antes la herramienta de corte estaba saliendo de la pieza de trabajo, que la herramienta de corte sigue saliendo de la pieza de trabajo;
 - determinar, cuando la primera variable digital derivada (CONF) adopta un valor 1 y la segunda variable digital derivada (CONFW) adopta un valor 0, y además inmediatamente antes la herramienta de corte estaba entrando en la pieza de trabajo, que la herramienta de corte sigue entrando en la pieza de trabajo;
 - determinar, cuando la primera variable digital derivada (CONF) presenta un flanco de subida y la segunda variable digital derivada (CONFW) presenta un flanco de bajada, que se ha producido un evento inesperado en el proceso de corte.
4. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el primer nivel corresponde

a un nivel alto y el segundo nivel corresponde a un nivel bajo.

- 5 5. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 2-4, donde las frecuencias medias corresponden a frecuencias de entre 300 Hz y 1000 Hz y las frecuencias muy bajas corresponden a frecuencias de entre 0 Hz y 25 Hz.
- 10 6. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el paso medir la caída de voltaje de alterna entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo comprende aplicar un voltaje de excitación entre 5 Vpp y 15 Vpp a una frecuencia de al menos 5 veces la frecuencia de corte de la pieza.
- 15 7. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 6, donde la frecuencia del voltaje de excitación está entre 5 kHz y 20 kHz.
- 20 8. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 6-7, donde el voltaje de excitación es de 10 Vpp y la frecuencia de 20 kHz.
- 25 9. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la corriente máxima de excitación es de 2 mA.
- 30 10. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que además comprende:
- medir el intervalo de tiempo (Tout) que tarda o la distancia que recorre la herramienta para salir de la pieza de trabajo;
- comparar dicho intervalo de tiempo (Tout) con un umbral calculado en función del tiempo (Tin) que ha tardado o la distancia que ha recorrido la herramienta para entrar a la pieza de trabajo; y
- si dicho intervalo de tiempo (Tout) es menor que dicho umbral, determinar que se ha producido una interrupción de la operación de corte.
- 35 11. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 10, donde la interrupción de la operación de corte corresponde a una rotura de la herramienta de corte.
- 40 12. Programa de ordenador que comprende instrucciones de programa para hacer que un ordenador lleve a la práctica el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1-11.
- 45 13. Programa de ordenador de acuerdo con la reivindicación 12, que está incorporado en unos medios de almacenamiento.
- 50 14. Programa de ordenador de acuerdo con la reivindicación 12, que esta soportado en una señal portadora.
15. Sistema para la monitorización en tiempo real de una operación de mecanizado, donde el procedimiento es llevado a cabo por una máquina dotada de una herramienta de corte, caracterizado porque comprende:
- un sensor dispuesto para entre la herramienta de corte y una pieza de trabajo para medir la caída de voltaje entre ambos; y
- unos medios de procesamiento que reciben la señal del sensor y están adaptados para llevar a cabo el método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores.
16. Sistema de acuerdo con la reivindicación 15, que además comprende un elemento de aislamiento dispuesto entre la pieza de trabajo y los medios de sujeción de dicha pieza de trabajo a la máquina.
17. Sistema de acuerdo con la reivindicación 16, donde el elemento de aislamiento está hecho de un material de mica.

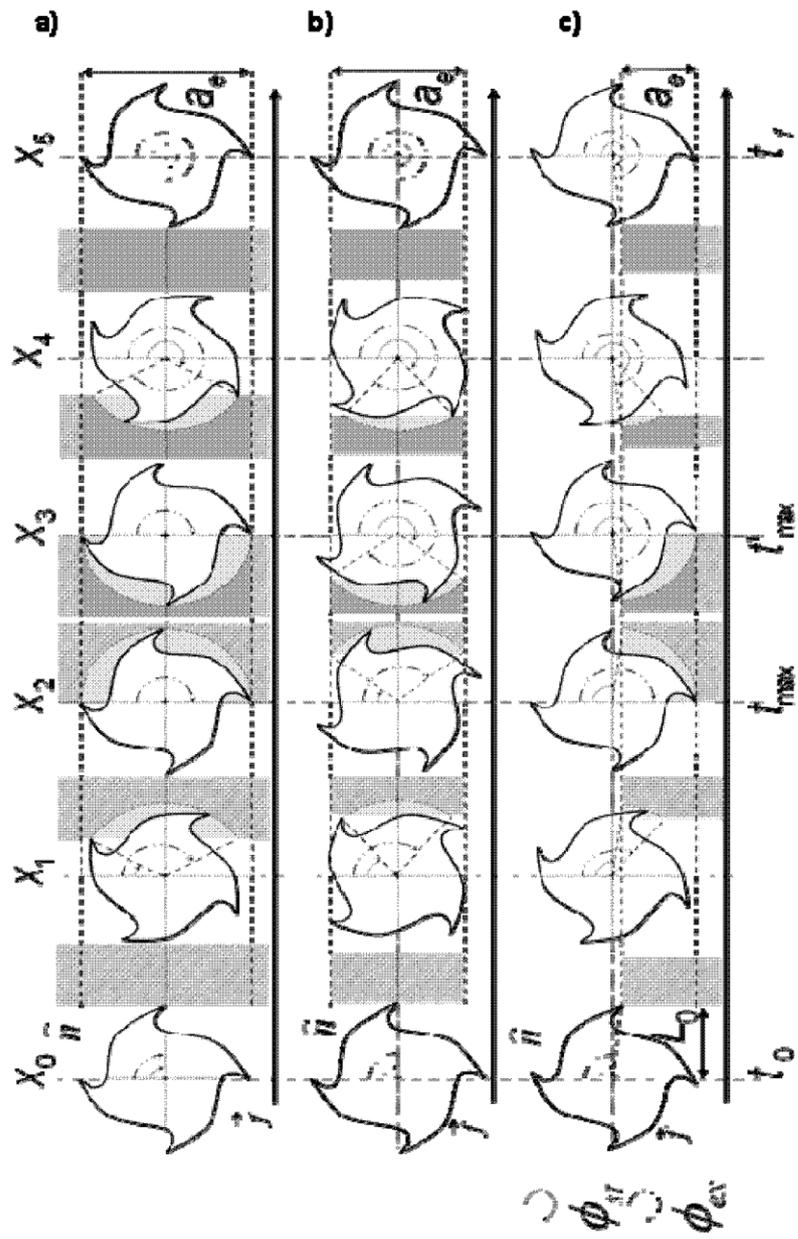


FIG. 1

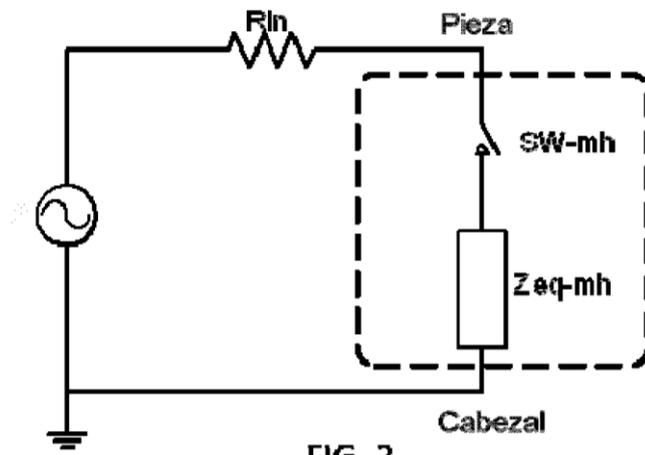


FIG. 2

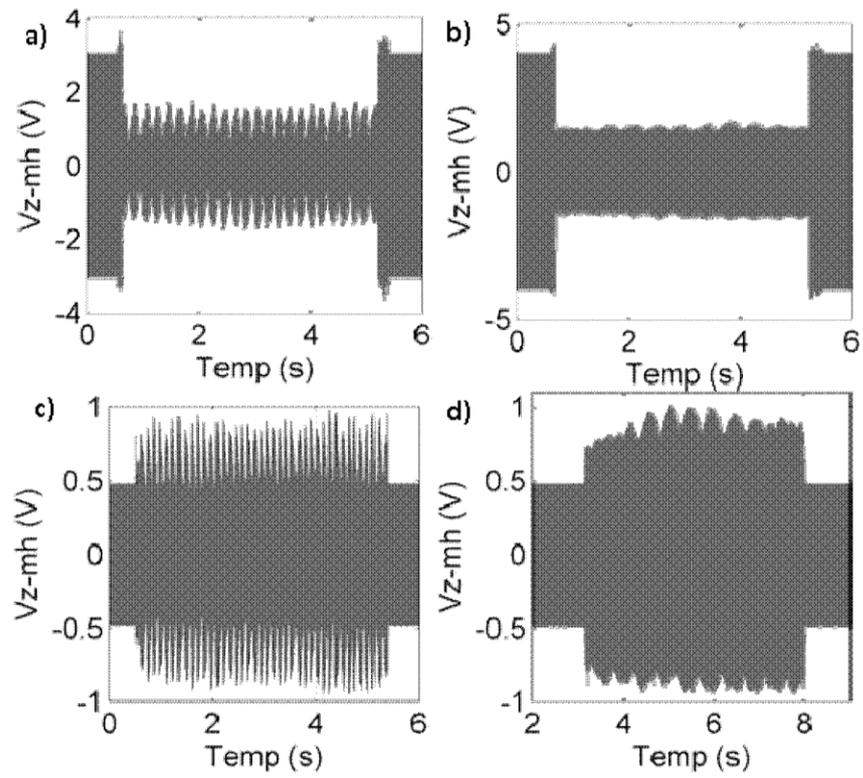


FIG. 3

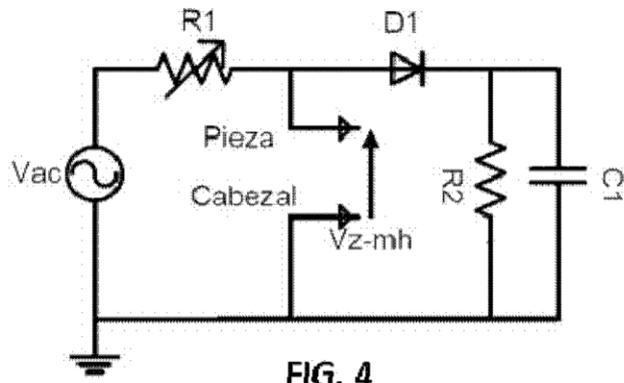


FIG. 4

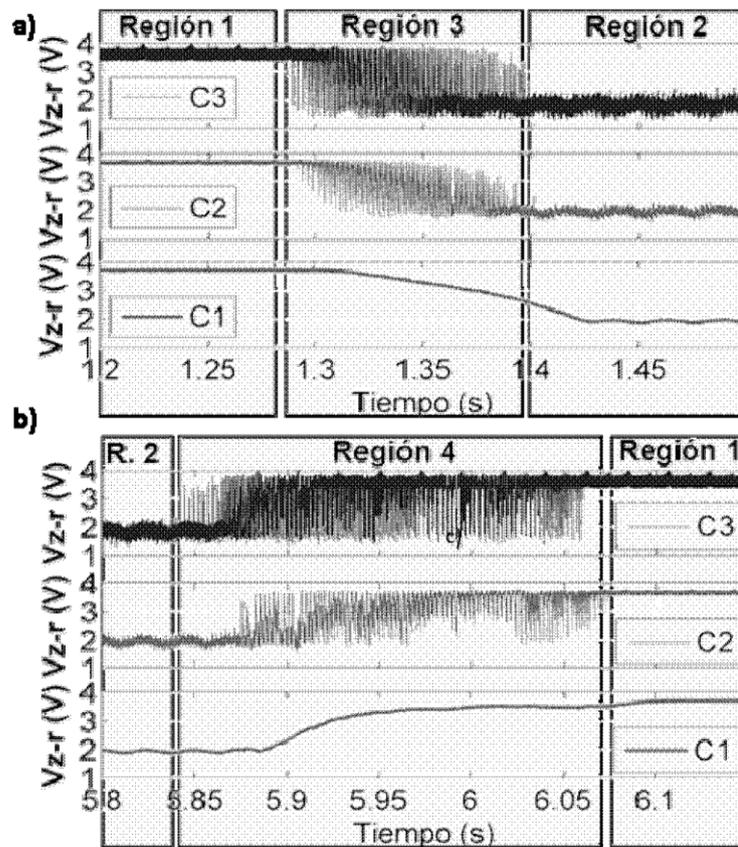
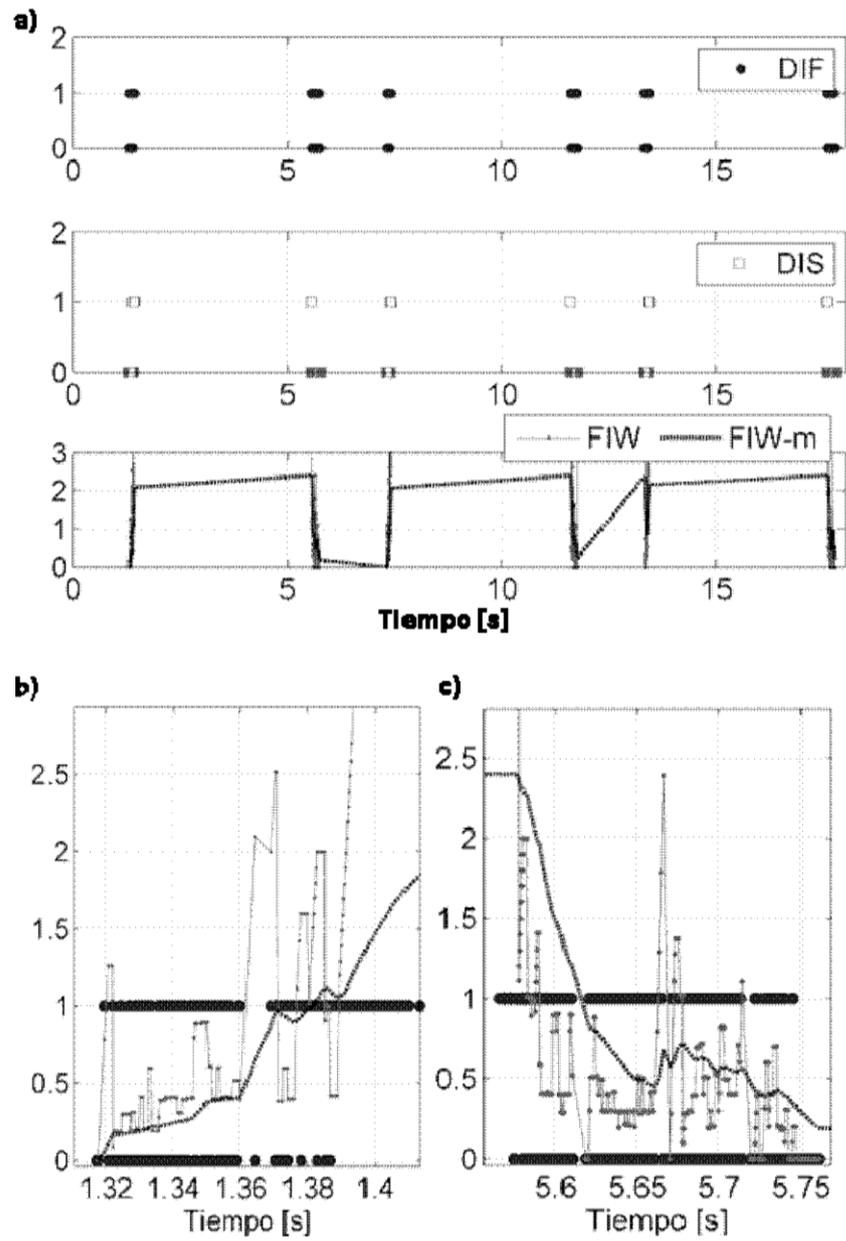


FIG. 5



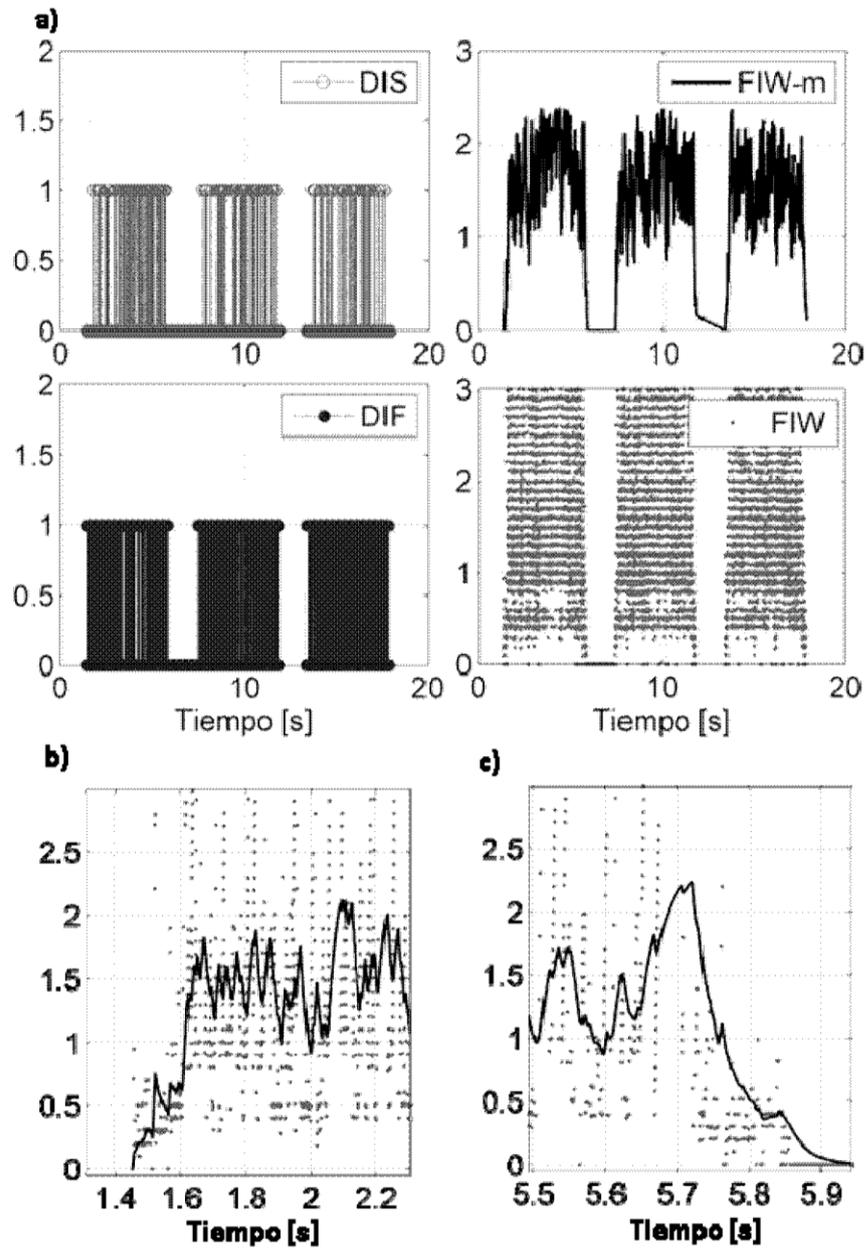


FIG. 7

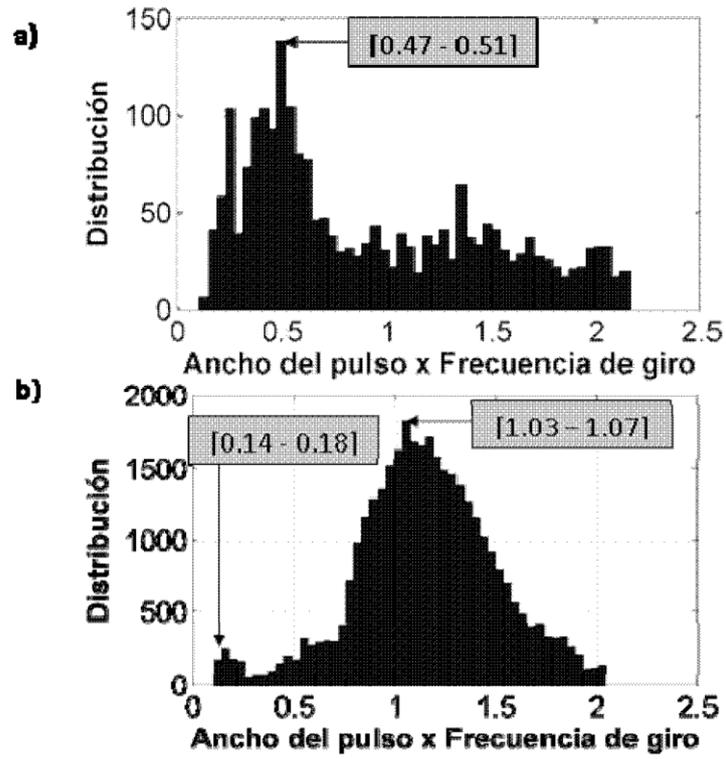


FIG. 8

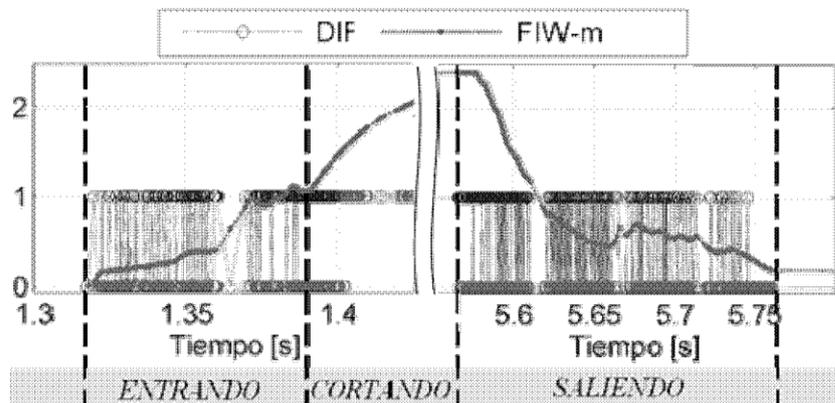


FIG. 9

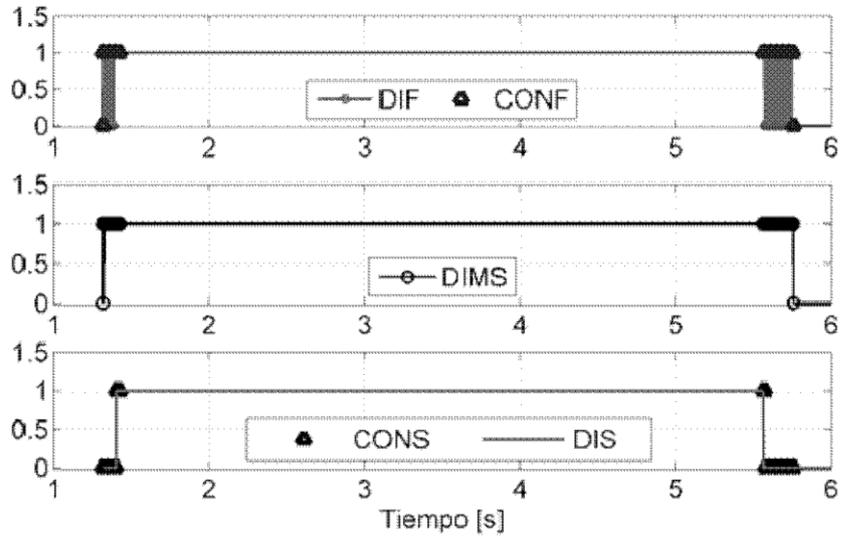


FIG. 10

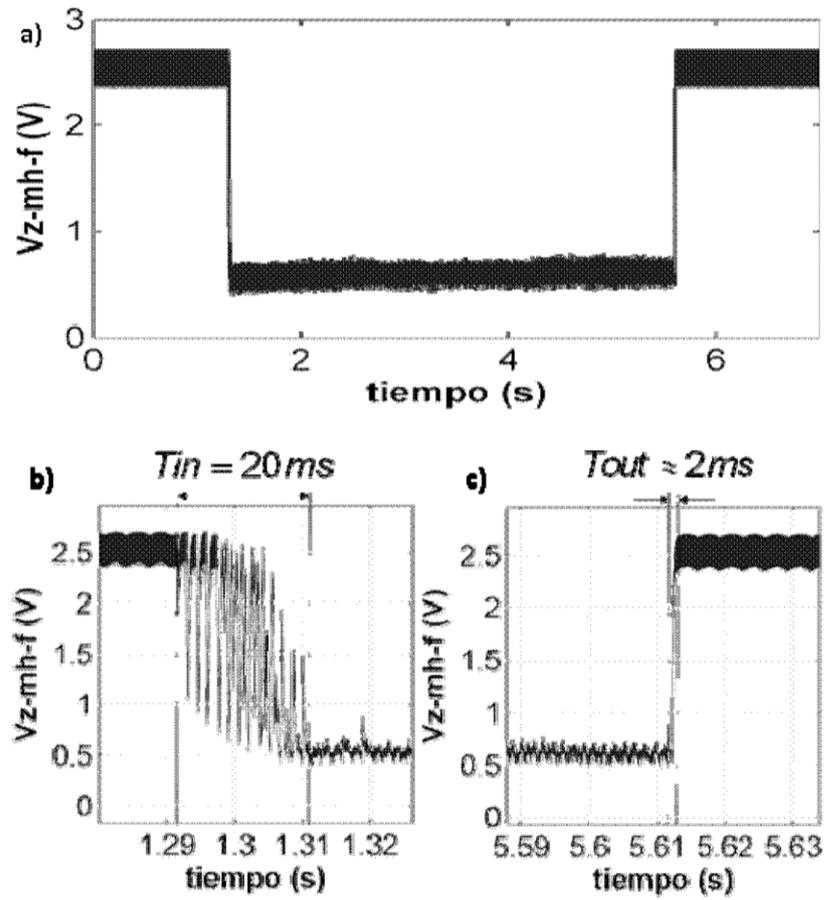


FIG. 11

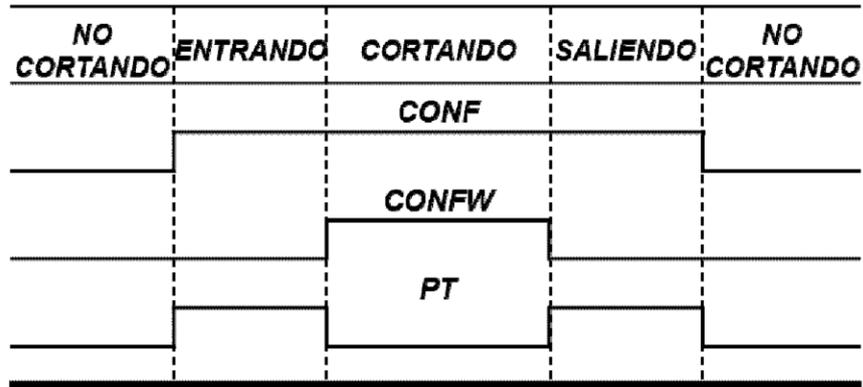


FIG. 12