

19



OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: 2 796 933

21 Número de solicitud: 201930465

51 Int. Cl.:

G05B 19/19 (2006.01)
G06F 9/44 (2008.01)
G05D 3/00 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación: 28.05.2019

43 Fecha de publicación de la solicitud: 30.11.2020

71 Solicitantes: CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (50.0%)
C/ Serrano, 117
28006 Madrid ES y
UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID (50.0%)

72 Inventor/es: HABER GUERRA, Rodolfo;
CASTAÑO ROMERO, Fernando;
BERUVIDES LÓPEZ, Gerardo y
VILLALONGA JAÉN, Alberto

74 Agente/Representante: PONS ARIÑO, Ángel

54 Título: Procedimiento de parametrización automática de controlador mediante gemelo digital de un sistema ciberfísico

57 Resumen: Procedimiento de parametrización automática de controlador mediante gemelo digital del sistema ciberfísico que comprende: a. generar un gemelo digital del sistema ciberfísico formado por el controlador y el sistema físico; b. determinar los parámetros del controlador que minimizan una función de coste seleccionada mediante los siguientes pasos: crear un conjunto inicial de valores de los parámetros del controlador; simular una trayectoria de referencia recorrida por el sistema físico; calcular el valor de la función de coste correspondiente; evaluar los valores de los parámetros del controlador; si es necesario, generar un nuevo conjunto de valores de los parámetros del controlador y repetir los pasos anteriores desde la simulación; y en caso contrario, tomar el conjunto actual de valores de los parámetros del controlador como el conjunto de parámetros óptimos.

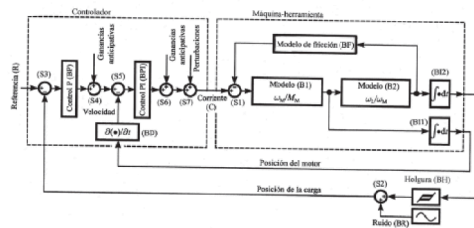


FIG. 2

ES 2 796 933 A1

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento de parametrización automática de controlador mediante gemelo digital de un sistema ciberfísico

5

### OBJETO DE LA INVENCION

La presente invención pertenece en general al campo de la sintonización o ajuste de un sistema de control para un sistema físico que dispone de capacidades de computación, almacenamiento y comunicación, de modo que está conectado entre sí y a su vez conectado con el mundo virtual de las redes digitales globales. Un ejemplo de sistema físico de este tipo es, por ejemplo, una máquina-herramienta dotada de control numérico.

El objeto de la presente invención es un novedoso procedimiento diseñado para parametrizar de manera automática el controlador del sistema físico basándose en un gemelo digital del conjunto formado por el controlador y el sistema físico.

15

### ANTECEDENTES DE LA INVENCION

En la actualidad, las máquinas-herramientas son ampliamente utilizadas en diferentes campos de la industria para el mecanizado de piezas complejas. Una máquina-herramienta es un tipo de máquina que se utiliza para dar forma a piezas sólidas, principalmente metales. Una forma de llevar a cabo la fabricación de la pieza es por eliminación de una parte del material, que se puede realizar por arranque de viruta, por estampado, corte o electroerosión. Si bien antiguamente la máquina-herramienta era manejada por un operario, desde mediados del siglo pasado las máquinas herramientas son controladas mediante un controlador, también denominado módulo de control numérico o módulo CNC (Control Numérico por Computadora). Un controlador es un sistema de automatización operado mediante comandos programados en un medio de almacenamiento.

20

30

Una tarea esencial para la puesta en marcha de una máquina herramienta consiste en el ajuste de los parámetros del controlador. Actualmente, el ajuste o parametrización del controlador de posición y trayectoria, que permite la ejecución de los movimientos y trayectorias deseadas para fabricar la pieza o el componente a partir de un programa que se ejecuta en el CNC, se lleva a cabo por diferentes procedimientos. Por ejemplo, mediante la identificación experimental, el análisis frecuencial y la aplicación de reglas experimentales

35

desacopladas que son en muchos casos procedimientos lentos, engorrosos e ineficientes. La correlación cruzada de los parámetros y la influencia cruzada de los parámetros de control y las componentes anticipativas en presencia de no linealidades duras como la fricción y la holgura, limitan el alcance y el funcionamiento óptimo de los controladores ajustados o sintonizados mediante esta parametrización manual y/o experimental.

Con relación a esta tecnología, se pueden mencionar los siguientes documentos de patente relevantes:

- 10           1. Tucker, Dave, Shadle, Lawrence y Long, Roy. "*Cyber Physical System Model for Monitoring and Control*". US201715813107, del año 2016.
2. Lou, Ping, y otros. "*Heavy numerical control machine tool thermal error compensation control system based on CPS (Cyber-Physical Systems) and thermal error compensation method*". CN201710846670, del año 2017.
- 15           3. Modén, Per-Erik, Bergsten, Pontus y Lindkvist, Rickard. "*Method and device for tuning and control*". ES2444692 T3, del año 2014.
4. Ji, Kun, "*Resilient control design for distributed cyber-physical systems*". US 9 942245 B2, del año 2018.
5. Ashish Kapoor, Dorsa Sadigh, "*Control of cyber-physical systems under uncertainty*". US 2018/0005118 A1, del año 2018.

25

## DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

La presente solicitud soluciona los problemas anteriores gracias a un nuevo procedimiento que permite obtener de manera automática los parámetros óptimos del controlador de un sistema físico. Para ello, se utiliza un gemelo digital del sistema ciberfísico formado por el sistema físico a controlar y el controlador el que está conectado.

Una importante ventaja de la presente invención es que la obtención de los parámetros óptimos del controlador se realiza sin necesidad de tener acceso al sistema físico. En efecto, el procedimiento de la presente invención puede implementarse en cualquier medio de procesamiento con capacidad adecuada, como por ejemplo un ordenador personal o similar,

35

partiendo del valor de los parámetros característicos del sistema físico. Estos parámetros pueden ser proporcionados por el fabricante del sistema físico, o bien pueden obtenerse mediante pruebas realizadas con antelación. Esto permitiría, por ejemplo, optimizar desde una ubicación única los valores de los parámetros de controladores instalados en máquinas  
5 situadas en diferentes lugares. Para ello, solo sería necesario el envío a la ubicación única del valor de los parámetros característicos de dichas máquinas.

Por otra parte, aunque el sistema físico al que se refiere la mayor parte de esta memoria es una máquina-herramienta y, más concretamente, aunque el ejemplo particular que se describe más adelante en este documento está dirigido a un tipo concreto de máquina-herramienta, es importante señalar que la aplicabilidad de la presente invención no está  
10 limitada a este tipo de máquinas-herramientas, sino que es aplicable a cualquier tipo de sistema físico conectado a un controlador cuyos parámetros característicos deban ser ajustados.

15

A continuación, con el propósito de mejorar la claridad, se definen algunos términos que se utilizarán en la descripción de la presente solicitud:

20

Sistema físico: El sistema físico es la máquina o aparato cuyo funcionamiento se desea controlar a través del controlador. Puede tratarse de cualquier tipo de sistema mecánico o electromecánico, como por ejemplo una máquina-herramienta diseñada para realizar tareas de mecanizado de piezas complejas. El sistema físico tiene una o más entradas, que constituyen las señales de control, y una o más salidas, que constituyen las variables a controlar.

25

30

Controlador: El término "*controlador*" hace referencia al esquema de control diseñado para actuar sobre el sistema físico anterior con el propósito de que éste realice unas tareas concretas, por ejemplo, el mecanizado de una pieza determinada en el caso de una máquina-herramienta. El esquema de control está formado fundamentalmente por una serie de operaciones matemáticas que permiten obtener las señales de control que se envían al sistema físico a partir del valor de las variables de salida del sistema físico a controlar. El controlador puede estar implementado en cualquier medio de procesamiento, como por ejemplo un ordenador, un microprocesador, un microcontrolador, un ASIC, un DSP, una  
35 FPGA, u otros.



Sistema ciberfísico: El término “*sistema ciberfísico*” hace referencia en este documento al conjunto del sistema físico y el controlador, que integra capacidades de computación, almacenamiento y comunicación (véase, por ejemplo, el documento de B. R. Ferrer, W. M. Mohammed, J. L. Martínez Lastra, A. Villalonga, G. Beruvides, F. Castano, and R. E. Haber, “*Towards the Adoption of Cyber-Physical Systems of Systems Paradigm in Smart Manufacturing Environments*,” in Proceedings - IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2018, 2018, pp. 792-799).

Parámetros característicos del sistema físico: Se trata de un conjunto de parámetros que caracterizan el comportamiento del sistema físico. Por ejemplo, en el caso de una máquina herramienta, se trata de los parámetros físicos que caracterizan los diferentes elementos que lo componen, como por ejemplo el motor, los ejes o la carga. Los parámetros característicos del sistema físico pueden incluir constantes, tal como constantes elásticas o de fricción, valores de inercia, frecuencias de resonancia, etc. Los parámetros característicos de un sistema físico en general, y más particularmente de una máquina-herramienta, pueden calcularse mediante métodos empíricos conocidos y/o son proporcionados por los fabricantes de los motores y ejes de transmisión. Existen ejemplos de métodos desarrollados para el ajuste parámetros del sistema físico (véase, por ejemplo, el documento de I. La Fe-Perdomo, G. Beruvides, R. Quiza, R. Haber, and M. Rivas, “*Automatic Selection of Optimal Parameters Based on Simple Soft-Computing Methods: A Case Study of Micromilling Processes*,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, pp. 800-811, 2019).

Parámetros característicos del controlador: Se trata de un conjunto de parámetros que permiten que el controlador tenga el comportamiento deseado a partir de la señal de referencia. En este caso, son parámetros que, mediante operaciones matemáticas, definen el modo en que se gestionan las variables de salida del sistema físico para generar las señales de control. Por ejemplo, se trata del esquema de interconexión de los bloques de control, de los factores de ganancia de los mismos, etc.

Gemelo digital: Se trata de una réplica puramente digital capaz de emular el comportamiento de un sistema complejo (ver, por ejemplo, el documento de R. Rosen, G. Von Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen, “*About the importance of*

*autonomy and digital twins for the future of manufacturing," IFAC-PapersOnLine, vol. 28, pp. 567-572, 2015). Por ejemplo, puede implementarse un gemelo digital de la máquina-herramienta, del controlador o, como se describe con detalle en este documento, del sistema ciberfísico completo formado por el conjunto de máquina-herramienta y controlador. El gemelo digital puede ejecutarse en cualquier medio de procesamiento con capacidad adecuada, como por ejemplo un ordenador o dispositivo de cómputo de bajo coste.*

La presente invención está dirigida a un procedimiento de parametrización automática de controlador que permite obtener un conjunto de parámetros óptimos del controlador de un sistema físico. Más concretamente, el procedimiento de la invención comprende fundamentalmente los siguientes pasos:

#### 1. Generación de gemelo digital del sistema ciberfísico

El primer paso de la presente invención es la generación de un gemelo digital del sistema ciberfísico formado por el controlador y el sistema físico. Este paso se realiza utilizando métodos normalmente conocidos en la técnica. El gemelo digital generado tendrá, por tanto, dos componentes bien diferenciados que corresponden, respectivamente, al controlador y al sistema físico. En principio, los parámetros característicos del sistema físico son conocidos, mientras que los valores de los parámetros característicos del controlador son las incógnitas a determinar (parametrización, ajuste o sintonía).

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema físico podría ser cualquier sistema mecánico o electromecánico susceptible de ser controlado a través de un controlador. Por ejemplo, en una realización particularmente preferida de la invención, el sistema físico puede ser una máquina-herramienta para el mecanizado de piezas, tal como cualquier máquina-herramienta comercial actual. De manera particular, en este documento se analiza el caso de una máquina-herramienta con un solo grado de libertad que comprende un carro que se desplaza longitudinalmente a lo largo de un husillo. Los parámetros característicos del sistema físico pueden haberse obtenido directamente del fabricante de la máquina en cuestión, o bien pueden haber sido determinados con antelación utilizando métodos empíricos conocidos. Alternativamente, el procedimiento podría comprender un paso previo de determinación de los parámetros característicos del sistema físico.

Por otra parte, el controlador puede estar representado por cualquier tipo de esquema realimentado que permita controlar el sistema físico. Por ejemplo, en el caso particular de máquinas-herramienta, el controlador más frecuentemente utilizado es un controlador en cascada, que está compuesto por dos bucles, 5 proporcional (P) y proporcional integral (PI), anidados en cascada, donde el bucle interno PI se denomina controlador secundario o esclavo, y el bucle externo P se denomina controlador principal o maestro. La base de esta configuración es que una dinámica más rápida del bucle interno permite una atenuación más rápida de las perturbaciones y minimiza su efecto antes de que afecten a la variable que se desea 10 controlar, normalmente la señal de posición asociada a la trayectoria de corte que se desea seguir. Este tipo de controladores son empleados actualmente por diversos fabricantes de máquinas-herramientas, tales como Siemens, Heidenhain o Fagor.

En cualquier caso, el resultado de este primer paso es un gemelo digital del sistema 15 ciberfísico donde la parte correspondiente al sistema físico está completamente definida, mientras que la parte correspondiente al controlador incluye un conjunto de parámetros característicos desconocidos que constituyen las incógnitas a determinar.

## 2. Determinación del valor de los parámetros óptimos del controlador

Una vez creado el gemelo digital del sistema ciberfísico, se determina el valor de los 20 parámetros óptimos del controlador que minimizan una función de coste seleccionada. Para ello, se llevan a cabo los siguientes pasos:

### 2.a Inicialización

En primer lugar, se crea un conjunto inicial de valores de los parámetros del controlador. En principio, se puede tomar cualquier conjunto inicial para el inicio del procedimiento. Por ejemplo, si se van a actualizar los parámetros del 30 controlador de una máquina-herramienta que está en uso, pueden utilizarse los valores actuales de los parámetros del controlador de dicha máquina herramienta. El gemelo digital del sistema ciberfísico que se está analizando queda así completamente definido.

### 2.b Simulación de una trayectoria de referencia

A continuación, utilizando el gemelo digital del sistema ciberfísico que incluye dicho conjunto de valores de los parámetros del controlador, se simula el comportamiento del sistema en su conjunto a partir de una trayectoria de referencia similar a la que se utiliza para fabricar cualquier pieza.

5

#### 2.c Cálculo de la función de coste

Se calcula entonces el valor de la función de coste relativa a dicha simulación de trayectoria. La función de coste puede ser cualquiera de entre las utilizadas habitualmente en este tipo de procesos. Por ejemplo, en una realización particularmente preferida de la invención, la función de coste se elige como una suma ponderada del error absoluto máximo y la integral del error absoluto en el tiempo.

10

15

#### 2.d Evaluación de la solución

Una vez terminada la simulación, se utiliza un método de optimización seleccionado para evaluar la bondad del conjunto de valores de los parámetros del controlador que está analizando en la iteración actual. Preferentemente, se utilizan métodos de optimización heurísticos tales como los algoritmos genéticos (GA), el método de recocido simulado (SA) o el método de entropía cruzada (CE). Estos métodos se han seleccionado como los que proporcionan mayor precisión de entre una amalgama de otros métodos de optimización que fueron testados y desechados a causa de la baja precisión de sus resultados.

20

25

#### 2.e Nueva iteración

Si la evaluación determina que no se cumplen las condiciones de finalización del método de optimización empleado, se genera un nuevo conjunto de valores de los parámetros del controlador y se repiten los pasos anteriores desde la simulación de la trayectoria de referencia. El nuevo conjunto de valores de los parámetros del controlador se obtiene partiendo del conjunto de valores actual de acuerdo con el método de optimización seleccionado.

30

35

#### 2.f Finalización

Por el contrario, si la evaluación determina que se cumplen las condiciones de finalización del método de optimización empleado, se toma el conjunto actual de valores de los parámetros del controlador como el conjunto de parámetros óptimos.

5

En definitiva, el procedimiento de la presente invención permite optimizar de una manera automatizada y sin necesidad de pruebas empíricas los parámetros característicos del controlador de un sistema físico. Ello permite, por ejemplo, actualizar el controlador de una máquina-herramienta ubicada en un lugar remoto únicamente a partir del conocimiento de sus parámetros característicos. Esto contrasta con los métodos actualmente conocidos, que están normalmente basados en la realización de pruebas empíricas en la propia máquina y que, además, consumen más tiempo.

Además, aunque el procedimiento de la invención está particularmente diseñado para ser ejecutado en un ordenador, la invención incluye también un programa de ordenador que comprende instrucciones capaces de provocar que un ordenador lleve a cabo el procedimiento de la invención. El programa puede tener la forma de código fuente, código objeto, una fuente intermedia entre código fuente y código objeto, por ejemplo, como en forma parcialmente compilada, o en cualquier otra forma adecuada para su uso en la puesta en práctica de los procesos según la invención. En general, el programa puede estar en cualquier forma legible por ordenador capaz de provocar que un ordenador lleve a cabo el método de la invención.

La invención preferiblemente comprende también cualquier programa de ordenador almacenado en un medio de almacenamiento. El medio de almacenamiento puede ser de cualquier tipo, como 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 duro. Alternativamente, el medio de almacenamiento puede ser un ASIC adaptado para almacenar y ejecutar el procedimiento de la invención. En general, el medio de almacenamiento incluye cualquier medio capaz de almacenar el conjunto de instrucciones que conforman el programa de ordenador.

La invención preferiblemente también incluye un programa de ordenador soportado en una portadora. En este contexto, cuando el programa está incorporado en una señal que puede ser transportada directamente por un cable u otro dispositivo o medio, como por ejemplo una señal eléctrica u óptica, la portadora puede estar constituida por dicho cable u otro

dispositivo o medio.

## **BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS**

5 La Fig. 1 muestra una vista en perspectiva de una máquina-herramienta.

La Fig. 2 muestra el esquema del gemelo digital de un sistema ciberfísico formado por la máquina-herramienta mostrada en la Fig. 1 y su controlador.

10 La Fig. 3 muestra la posición y velocidad correspondientes a una trayectoria de referencia.

La Fig. 4 muestra el error de posición simulado correspondiente a la trayectoria de referencia de la Fig. 3 cuando se utiliza un método comercial denominado Finetune.

15 La Fig. 5 muestra esquemáticamente los pasos que constituyen el procedimiento de la presente invención.

La Fig. 6 muestra el error de posición simulado cuando se utilizan los cuatro métodos de optimización descritos.

20

La Fig. 7 muestra con detalle un intervalo temporal de la posición y velocidad de la trayectoria de referencia.

La Fig. 8 muestra con detalle en el intervalo temporal anterior el error de posición simulado

25 cuando se utilizan los cuatro métodos de optimización descritos.

La Fig. 9 muestra con detalle en el intervalo temporal anterior el esfuerzo de control simulado cuando se utilizan los cuatro métodos de optimización descritos.

30 La Fig. 10 muestra el error de posición real cuando se utilizan los cuatro métodos de optimización descritos.

La Fig. 11 muestra con detalle un intervalo temporal de la posición y velocidad de la trayectoria de referencia.

35

La Fig. 12 muestra con detalle en el intervalo temporal anterior el error de posición real



cuando se utilizan los cuatro métodos de optimización descritos.

La Fig. 13 muestra con detalle en el intervalo temporal anterior el esfuerzo de control real cuando se utilizan los cuatro métodos de optimización descritos.

5

## **REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION**

Se describe a continuación un ejemplo de procedimiento particular para determinar los parámetros óptimos del controlador de un sistema físico, donde el sistema físico consiste en una máquina-herramienta que comprende un carro que se desplaza longitudinalmente a lo largo de un husillo. Las características de esta máquina-herramienta se describirán con detalle más adelante en este documento.

En cualquier caso, como se ha mencionado con anterioridad en este documento, nótese que el procedimiento de la presente invención no solamente es aplicable a máquinas-herramienta, sino que es aplicable en general a cualquier sistema físico de tipo electromecánico susceptible de ser replicado mediante un gemelo digital.

### **Sistema físico**

20

La Fig. 1 muestra el sistema físico, que en este ejemplo es una máquina-herramienta con un grado de libertad formada por un sistema de husillo que desplaza un carro longitudinalmente. El sistema de husillo y el carro están montados en una plataforma que puede girar con relación a la base sobre la que se apoya. La plataforma presenta también unos sistemas de fijación rígidos para cada una de las posiciones, además de un amortiguador de golpes que evita el impacto de la unidad pivotante contra la plataforma en caso de caída. Para llevar a cabo las pruebas que se describen a lo largo de este ejemplo, la plataforma se dispone según una configuración horizontal.

A continuación, la tabla I muestra los parámetros más importantes que caracterizan el comportamiento de la máquina-herramienta descrita. Estos parámetros pueden ser conocidos de antemano, o bien pueden determinarse empleando métodos empíricos conocidos como un paso inicial del procedimiento de la invención.

35

Símbolo	Parámetro	Valor
$J_M$	Inercia del motor	$2,9 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$J_L$	Inercia de la carga	$4,2 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$f_1, \omega_{01}$	Frecuencia de resonancia	70 Hz, $2\pi f_1$ rad/s
$D_1$	Coeficiente de amortiguamiento	0,15
$K_t$	Constante de par	0,74 N·m/A
$f_{rH}$	Histéresis	0,1280 rad/s
$F_C$	Fricción de Coulomb	0,625 N·m
$F_V$	Fricción viscosa	0 N·m·s
	Holgura	$12,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
$K_H$	Constante del husillo	$0,010/(2\pi)$ m/rad

Tabla I: Parámetros característicos de la máquina-herramienta

### Controlador

- 5 La máquina-herramienta descrita es controlada por un controlador CNC Fagor 8070 convencional. Se trata de un controlador en cascada P-PI del tipo descrito con anterioridad en este documento. Concretamente, el controlador tiene dos bucles anidados, donde el bucle interno PI constituye el controlador esclavo, y el bucle externo P constituye el controlador maestro. En este ejemplo concreto, los bucles externo e interno se cierran con
- 10 tiempos de muestreo de 250  $\mu\text{s}$  y 62,5  $\mu\text{s}$ , respectivamente. La señal de referencia se genera cada 4 milisegundos, con una interpolación cúbica entre muestras para el bucle externo.

### Gemelo digital

15

- El primer paso del procedimiento de la invención consiste en la implementación de un gemelo digital para simular el comportamiento del sistema formado por la combinación de máquina-herramienta y controlador. La Fig. 2 muestra el esquema del gemelo digital donde se aprecian claramente dos componentes: el modelo de la máquina-herramienta y el modelo
- 20 del controlador. A continuación, se describe brevemente los principales pasos que se llevan a cabo para generar el gemelo digital de cada uno de ellos.

1. Modelo de la máquina-herramienta

El modelo de la máquina-herramienta comprende un sistema formado por dos masas de tres elementos claramente diferenciados: el motor, el eje y la carga. Los parámetros de este modelo son: la rigidez torsional del eje (K), la amortiguación del eje (B), el momento de inercia del motor ( $J_M$ ), el momento de inercia de la carga ( $J_L$ ), el momento electromecánico aplicado por el motor ( $M_M$ ), el momento de la carga ( $M_L$ ), y el momento de par del eje ( $M_S$ ).

En el modelo propuesto, se utilizan como variables de estado la velocidad angular de la masa del motor ( $\omega_M$ ), la velocidad angular de la masa de la carga ( $\omega_L$ ), y el par del eje ( $M_S$ ) (véase, por ejemplo, el documento de H.gross, G. Wiegartner, y J. Hamann, “*Electrical feed drives in automation: basics, computation and dimensioning*”. Nueva York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc, 2001.

Por tanto, si las frecuencias de resonancia y anti-resonancia,  $\omega_{01}$  and  $\omega_{02}$ , se definen como:

$$\begin{aligned} \omega_{01} &= \sqrt{K / J_L} \\ \omega_{02} &= \omega_{01} \sqrt{1 + (J_L / J_M)} \end{aligned} \quad (1)$$

y los coeficientes de amortiguamiento  $D_1$  y  $D_2$  son:

$$\begin{aligned} D_1 &= \frac{B}{2 \omega_{01} J_L} \\ D_2 &= D_1 \sqrt{1 + \frac{J_L}{J_M}} = \frac{B (J_M + J_L)}{2 J_M J_L \omega_{02}} \end{aligned} \quad (2)$$

la función de transferencia del primer bloque principal del modelo de la máquina-herramienta será:

$$H_{\omega_M / M_M}(s) = \frac{1}{J_M s} \cdot \frac{s^2 + 2 D_1 \omega_{01} s + \omega_{01}^2}{s^2 + 2 D_2 \omega_{02} s + \omega_{02}^2} \quad (3)$$

Utilizando los  $\omega_{01}$ ,  $\omega_{02}$ ,  $D_1$  y  $D_2$  anteriormente definidos, la función de transferencia del segundo bloque principal de la máquina-herramienta será:

$$H_{\omega_L / \omega_M}(s) = \frac{2D_1\omega_{01}s + \omega_{01}^2}{s^2 + 2D_1\omega_{01}s + \omega_{01}^2} \quad (4)$$

Además del modelo mecánico de la unidad motor-carga, se debe obtener un modelo eléctrico que relacione una señal de control (tensión o corriente eléctrica) con el par desarrollado por el motor. En la práctica, la dinámica de la parte eléctrica es mucho más rápida y se desprecia con relación a la parte mecánica del motor. Esto implica reducir el modelo eléctrico del motor a una constante y la inercia.

Por otro lado, es necesario representar, a través de modelos computacionalmente eficientes, la fricción, la holgura y el ruido.

La fricción es un fenómeno inherente en cualquier sistema físico que se opone a su funcionamiento. El modelo de fricción de Coulomb es el más básico y más utilizado en la industrial, e implica que la fuerza  $F$  de fricción es constante con un valor  $F_C$  y depende de la dirección de la velocidad. Añadiendo una pequeña componente  $F_v$  que corresponde a la fricción viscosa, que depende de la velocidad relativa entre las superficies,  $v$ , el modelo clásico puede expresarse como sigue:

$$F = F_C \operatorname{sgn}(v) + F_v v \quad (5)$$

También se dispone de un bloque de histéresis que soluciona la discontinuidad en el paso por cero. Este modelo de fricción es muy simple y efectivo a nivel computacional, además de que proporciona resultados cercanos al comportamiento de la fricción real. Existen investigaciones donde se intentan construir modelos que son una combinación de estos (véase, por ejemplo, el documento de G. Ferretti, G. Magnani, y P. Rocco, “*Alternative sin precise load motion control of two-mass servomechanisms*”, presentado en la 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2001). El modelo clásico solo tiene en cuenta la histéresis mecánica mediante una banda o zona muerta centrada el punto de equilibrio de offset.

Por último, se representa la influencia de la dinámica no modelada de la planta como una perturbación en forma de ruido en la señal de posición de la carga. En este ejemplo, se realiza un desarrollo en serie de Fourier a partir de la señal real adquirida, identificando los armónicos principales de las señales reales adquiridas en un sistema físico.

35

Por tanto, el modelo de la máquina-herramienta está formado por los siguientes elementos, como se aprecia en la Fig. 2. Un primer sumador (S1) que tiene una entrada positiva procedente de una señal de corriente (C) obtenida por el controlador, una entrada negativa procedente de la salida de un bloque de fricción (BF), y una salida que entra en el primer  
 5 bloque principal (B1) del de la máquina-herramienta. La salida del primer bloque principal (B1) entra en un segundo bloque principal (B2) de la máquina herramienta, así como en un primer bloque integral (BI1). La salida del primer bloque integral (BI1) constituye una señal de posición del motor (PM), que está configurada para ser realimentada a un bucle interno del controlador. La salida del segundo bloque principal (B2) entra en el bloque de fricción  
 10 (BF) y también en un segundo bloque integral (BI2). La salida del segundo bloque integral (BI2) entra en un bloque de histéresis (BH) cuya salida se introduce en un segundo sumador (S2) junto con una señal procedente de un bloque de ruido (BR), donde la salida del segundo sumador (S2) constituye una señal de posición de la carga (PC) que está configurada para ser realimentada a un bucle externo del controlador.

15

## 2. Modelo del controlador

La estructura de control P-PI está definida mediante componentes anticipativas en cascada (velocidad y aceleración), y el conjunto de “planta + no linealidades” se modela y representa  
 20 utilizando las ecuaciones (3) y (4). Con relación a las no linealidades, se utiliza el modelo de fricción basado en (5) con histéresis. Con relación a la holgura, se considera el modelo clásico de zona muerta.

En el diagrama del gemelo digital mostrado en la Fig. 2 se incluyen sendas compensaciones  
 25 para la holgura y la fricción. El componente anticipativo crea un pulso discreto positivo o negativo dependiendo del cambio de desplazamiento en una dirección o la otra. Por tanto, la compensación del pico inverso de la holgura se lleva a cabo aumentando la velocidad del motor (amplitud de pico de holgura, PP2) durante un período de tiempo (tiempo de pico de la holgura, PP3), de modo que la compensación exponencial de la holgura debido al pico de  
 30 movimiento inverso queda:

$$R_p = P P_2 e^{-t/PP_3} \quad (6)$$

El pulso de comando adicional se utiliza para recuperar la posible holgura de la transmisión  
 35 en las inversiones del movimiento. Cada vez que se invierte el movimiento del eje, el controlador CNC aplica la referencia correspondiente al movimiento más la referencia

indicada en este parámetro.

Otro parámetro importante es la amplitud de la histéresis,  $f_H$ , para resolver el problema de la discontinuidad en el cruce por cero del modelo de fricción de Coulomb más la fricción viscosa, y para controlar cuándo comenzar la compensación exponencial definida en la ecuación (6) debido al pico de inversión de movimiento después de detectar una inversión de la dirección del movimiento y, de este modo, no empezarla cada vez que se recibe un comando de inversión.

Por tanto, el modelo del controlador está formado por los siguientes elementos, como se aprecia en la Fig. 2. Un tercer sumador (S3) en el que se introduce con signo positivo una señal de referencia y con signo negativo la señal de la posición de la carga (PC). La salida del tercer sumador (S3) entra en un bloque de control proporcional (BP), cuya salida entra en un cuarto sumador (S4) junto con una señal de ganancias anticipativas (GA), ambos positivamente. La salida del cuarto sumador (S4) entra con signo positivo en un quinto sumador (S5) en el que también entra, con signo negativo, la señal de posición del motor (PM) tras pasar por un bloque de derivada (BD). La salida del quinto sumador (S5) entra en un bloque de control proporcional integral (BPI), cuya salida entra en un sexto sumador (S6) al que también entran unas ganancias anticipativas (GA), ambas con signo positivo. La salida del sexto sumador (S6) entra en un séptimo sumador (S7) junto con una señal de perturbación (P), ambas positivas. Por último, la salida del séptimo sumador (S7) constituye la señal de corriente (C) que entra en el gemelo digital del sistema físico.

En definitiva, el comportamiento dinámico (respuesta transitoria y precisión) del controlador está caracterizado por un conjunto de seis parámetros:

$$K = [K_p^{\text{pos}} \ K_p^{\text{vel}} \ K_i^{\text{vel}} \ PP_2 \ PP_3 \ f_H] \quad (7)$$

donde  $K_p^{\text{pos}}$  es la ganancia proporcional del bucle externo (controlador de posición),  $K_p^{\text{vel}}$ ,  $K_i^{\text{vel}}$  son la ganancia proporcional e integral del bucle interno (controlador de velocidad),  $PP_2$  es la amplitud de pico del compensador de la holgura,  $PP_3$  es el tiempo pico del compensador de la holgura, y  $f_H$  es el valor de la ganancia para compensador de la histéresis de la fricción. Estos parámetros pueden dividirse en parámetros del controlador propiamente dichos ( $K_p^{\text{pos}}$ ,  $K_p^{\text{vel}}$ ,  $K_i^{\text{vel}}$ ) y parámetros correspondientes a la compensación de la holgura y la fricción



$(PP_2 PP_3 f_H)$ .

El objeto de la presente invención es determinar el valor óptimo de estos parámetros para controlar de manera óptima la máquina-herramienta descrita.

5

**Validación del gemelo digital**

Antes de continuar, se realiza una validación del gemelo digital obtenido en los pasos anteriores. Para ello, se simula con el gemelo digital el movimiento correspondiente a una trayectoria de prueba y se comparan los resultados obtenidos con unos resultados reales medidos cuando se hace que la máquina-herramienta real recorra dicha trayectoria de prueba.

Para realizar la simulación, es necesario antes asignar unos valores a los parámetros del controlador descritos en (7). Para ello, se utiliza un procedimiento estándar propuesto en la literatura y aplicado habitualmente en la industria denominado método “Finetune”. El método Finetune es una herramienta propietaria que puede cargarse directamente en un controlador CNC abierto o en un ordenador personal. Este método de cálculo de parámetros sirve para llevar a cabo un ajuste fino de los parámetros en un eje cada vez, o en todos los ejes, automáticamente mediante estudios experimentales combinados con diagramas de respuesta en frecuencia (véase, por ejemplo, el documento de J. Zurbitu, A. Lazcano y J.C. Rodríguez Yurre, “*Tuning 4.0 y Servicios 4.0 para máquina-herramienta*”, Metalindustria, vol. 10, pp. 66-70, 2016).

Tras la aplicación de este método convencional, se obtienen los siguientes valores para los parámetros del controlador:

Parámetro	Valor
$K_p^{pos}$	66,6667
$K_p^{vel}$	0,2865
$K_i^{vel}$	0,0080
$PP_2$	0,7184
$PP_3$	0,0080
$f_H$	0,1288

Tabla II: Parámetros controlador

Una vez determinados los valores de los parámetros del controlador, se está en condiciones de aplicar el gemelo digital propuesto para simular los valores de posición correspondientes a la trayectoria de prueba. La Fig. 3 muestra la posición y velocidad correspondientes a esta trayectoria de prueba. Después de la simulación, se obtienen experimentalmente los valores reales utilizando la máquina-herramienta real. A continuación, se calcula el error como la diferencia entre los valores de posición simulados y los valores de posición experimentales reales. El error calculado se representa en la gráfica de la Fig. 4.

Como se puede observar, después de la amortiguación inicial, el error tiene un comportamiento estable. Un aspecto importante es la relación entre el error y la velocidad, ya que se aprecia que cuando mayor es la velocidad, mayor es el error. También se producen picos de error en los cambios de velocidad. Este comportamiento está provocado por las características dinámicas del gemelo digital que incluye fricción y la holgura.

Para evaluar el comportamiento de los resultados de la simulación obtenida mediante el gemelo digital del sistema, se calculó el error máximo absoluto, que fue de 12,58  $\mu\text{m}$ , el error absoluto medio, que fue de 1,04  $\mu\text{m}$ , y el error cuadrático medio, que fue de 1,59  $\mu\text{m}$ . En vista de estos resultados, se concluye que el error de posición es muy bajo, y que el gemelo digital mostrado en la Fig. 2 refleja muy bien el comportamiento del sistema en cuestión.

### **Optimización de los parámetros del controlador del gemelo digital**

A continuación, se lleva a cabo el cálculo de los valores óptimos de los parámetros del controlador del gemelo digital de acuerdo con los pasos descritos en la presente solicitud de invención.

#### **1. Definición del problema**

Existen varias figuras de mérito o funciones de coste de amplio uso en la industria que se utilizan tanto en la etapa de diseño como de evaluación de sistemas de control. En particular, se selecciona aquí como función de coste la suma ponderada del error máximo ( $E_{pk}$ ) que se produce cuando se producen cambios en la dirección de la trayectoria y la integral de valor absoluto del error ( $E_{ITAE}$ ). El error máximo  $E_{pk}$  y el  $E_{ITAE}$  pueden definirse como sigue:

$$E_{pk} = \max(|e(t)|) \Big|_{t_0}^{t_F}$$

$$E_{ITAE} = \sum_{i=t_0}^{t_F} t_i \cdot |e_i(t)| \tag{9}$$

$$E = p_1 \cdot E_{pk} + p_2 \cdot E_{ITAE} \tag{10}$$

donde:

- 5 e(t) es el error definido como la diferencia entre la trayectoria de referencia y la trayectoria obtenida mediante el gemelo digital;
- [t<sub>0</sub>, t<sub>F</sub>] es el intervalo temporal considerado.
- p<sub>1</sub> y p<sub>2</sub> son los pesos correspondientes, siendo p<sub>1</sub>+p<sub>2</sub>=1.

Una vez seleccionada la función de coste E<sub>pk</sub>, el problema a solucionar es obtener el conjunto de parámetros del controlador que la minimizan:

$$K = [K_p^{pos} K_p^{vel} K_i^{vel} PP_2 PP_3 f_H]_{OPT} = argmin(E) \tag{10}$$

## 2. Procedimiento de optimización

15 Para llevar a cabo el proceso de optimización, se utilizan tres métodos heurísticos libres de gradiente: recocido simulado (SA, Simulated Annealing), algoritmo genético (GA, Genetic Algorithm), y entropía cruzada (CE, Cross-Entropy).

20 Los algoritmos genéticos (GA) son uno de los métodos libres de gradiente más populares para resolver problemas de optimización. Al igual que otros algoritmos evolutivos, están basados en la evolución de las especies biológicas (véase, por ejemplo, el documento de P. Punia y M. Kaur, "Various genetic approaches for solving single and multi-objective optimization problems: a review", International Journal of Advanced Rresearch in Computer Science and Software Engineeering, vol. 3, pp 1014-1020, 2013).

25 El método de la entropía cruzada (CE) es un método heurístico que resuelve problemas de optimización, transformándolos en problemas estocásticos asociados con una probabilidad muy pequeña utilizando alguna técnica de minimización de varianza (véase, por ejemplo, el documento de R.E. Haber, R. M. Del Toro y A. Gajate, "Optimal fuzzy control system using the cross-entropy method. A case study of a drilling process", Information Sciences, vol. 180, pp. 2777-2792, 2010; el documento de G. Beruvides, R. Quiza, and R. E. Haber, "Multi-

*objective optimization based on an improved cross-entropy method. A case study of a micro-scale manufacturing process,"* Information Sciences, vol. 334-335, pp. 161-173, 2016; o el documento de R. E. Haber, G. Beruvides, R. Quiza, and A. Hernandez, "A simple multi-objective optimization based on the cross-entropy method," IEEE Access, vol. 5, pp. 22272-22281, 2017) .

El método de temple recocido (SA) es otro método de optimización heurístico bien conocido que se basa en el proceso de enfriamiento de los metales. En concreto, el método del temple recocido trata de obtener un óptimo global de una función matemática de un modo que evita los óptimos locales (véase, por ejemplo, el documento de P. Siarry, Ed., "Metaheuristics". Cham (Suiza): Springer, 2016, pp.19-50).

El procedimiento de la presente invención aplica uno de estos métodos heurísticos de optimización, en combinación con el gemelo digital generado, para obtener el valor óptimo de los parámetros del controlador que minimiza la función coste elegida. Se trata de un procedimiento de optimización iterativo que se representa de manera esquemática en la Fig. 5, donde se diferencian los pasos realizados con ayuda del gemelo digital y los pasos correspondientes al método heurístico de optimización. En primer lugar, se crea un conjunto inicial de valores de los parámetros del controlador. A continuación, se utiliza ese conjunto inicial de valores de los parámetros del controlador para, con ayuda del modelo digital, simular una trayectoria de referencia. Se calcula entonces el valor de la función de coste definida anteriormente mediante la comparación de dicha trayectoria de referencia simulada con los datos correspondientes a la trayectoria de referencia real realizada en la máquina física real. Después de esto, se comprueba si el valor de la función de coste cumple las condiciones de finalización del método heurístico correspondiente, es decir, si se ha alcanzado el mínimo absoluto de la función de coste elegida. En caso afirmativo, se determina que se ha obtenido la solución óptima y se finaliza el proceso. En caso contrario, se crea un conjunto subsiguiente de valores de los parámetros del controlador y se repite el proceso anterior.

Como se puede apreciar, la conexión entre el método heurístico de optimización y el gemelo digital tiene lugar en el paso de evaluación del conjunto de valores. El gemelo digital se configura utilizando los parámetros característicos de la máquina-herramienta, que son conocidos o se han calculado de manera empírica con anterioridad. En cuanto al resto de parámetros del gemelo digital, esto es, los parámetros característicos del controlador, se van introduciendo y evaluando a medida que se desarrolla el procedimiento de la invención

hasta obtener la solución óptima.

A continuación, se muestran en la Tabla III los parámetros que definen cada uno de los métodos de optimización descritos anteriormente (GA, CE, SA) para el ejemplo particular que se está describiendo:

5

Procedimiento optimización	Parámetro	Valor
GA	Tamaño población	100
	Generaciones	20
	Límite de generaciones	10
	Límite de tiempo stall	0
	Límite de tiempo	50 s
CE	Generaciones	100
	Tamaño población	20
	Factor de suavizado	0.6
	Máximo número de valoración ( $\alpha$ )	10
	Máxima convergencia ( $\epsilon$ )	10-10
	Factor de suavizado dinámico ( $\beta$ )	0,4
	Exponente de suavizado dinámico ( $\phi$ )	0,1
	Fracción elitista	0,01
SA	Máximas evaluaciones de función	18 000
	Generaciones	300
	Límite de generaciones stall	150

Tabla III: Parámetros de los métodos heurísticos de optimización considerados

Los valores de los parámetros del controlador obtenidos mediante estos tres métodos de optimización al final del procedimiento descrito se muestran en la Tabla IV. La Tabla IV también incluye los resultados que proporciona el método Finetune convencionalmente utilizado.

10

Parámetro	SA	GA	CE	FT
$K_p^{pos}$	64,4926	74,8709	74,5483	66,6667
$K_p^{vel}$	0,4970	0,3008	0,4976	0,2865

$K_i^{vel}$	0,00305	0,00151	0,0028	0,0080
$PP_2$	0,1715	0,3012	0,1085	0,7184
$PP_3$	0,0695	0,03097	0,0437	0,0080
$f_H$	0,0006	0,02605	0,0262	0,1288

Tabla IV: Parámetros de controlador resultantes

### 3. Análisis de los resultados obtenidos

5 La Fig. 6 muestra el error de posición cuando se simula una trayectoria de referencia mediante el gemelo digital usando cada uno de los conjuntos de parámetros del controlador determinados anteriormente. Como se puede apreciar, cualquiera de las soluciones obtenidas con el procedimiento de la presente invención presenta un error máximo absoluto sensiblemente menor (más de un 20% de mejora) que el correspondiente a la solución  
10 obtenida mediante el método Finetune empleado convencionalmente.

Las Figs. 7-9 muestran un análisis más detallado del error centrado en el punto de cambio de velocidad correspondiente al intervalo [4,7 s -5,4 s]. Concretamente, la Fig. 7 muestra la posición y velocidad correspondiente a la trayectoria de referencia en el intervalo  
15 considerado, la Fig. 8 muestra el error de posición que se produce cuando se utilizan los parámetros del controlador calculados según los tres métodos heurísticos considerados y el método Finetune convencional, y la Fig. 9 muestra la amplitud de la señal de control correspondiente a dichos métodos heurísticos y Finetune. La amplitud de la señal de control, o esfuerzo de control, hace referencia a la energía necesaria para controlar el sistema físico.  
20 En este caso concreto, el esfuerzo de control se refiere a la intensidad que constituye la salida del controlador y que alimenta el motor de la máquina-herramienta. Naturalmente, serán preferibles soluciones que, además de minimizar el error de posición, requieran esfuerzos de control más reducidos.

25 Como se puede apreciar en la Fig. 8, el brusco incremento de la velocidad provoca un pico en el error de posición con cualquiera de los conjuntos de parámetros. Sin embargo, se aprecia que los tres métodos de optimización considerados proporcionan valores de error máximo de posición sensiblemente menores que el error máximo de posición obtenido con el método Finetune convencional. En paralelo, la Fig. 9 muestra que no se produce ningún  
30 aumento apreciable en el esfuerzo de control, incluso cuando aumentan los valores de velocidad.



Con el propósito de realizar una comparación más precisa entre los resultados obtenidos utilizando el procedimiento de la invención con los tres métodos de optimización considerados y los obtenidos con el método Finetune convencional, se calculan algunos parámetros estadísticos: el error máximo absoluto (EMA), relacionado con el pico del error (Epk) que se produce cuando cambia la dirección de la trayectoria; la integral temporal del error absoluto (ITEA); y la la integral de la señal de control absoluta (ISCA). Estos parámetros (EMA, ITEA, ISCA) se calculan a través de simulaciones utilizando el gemelo digital del sistema. También se determina el tiempo de ejecución del procedimiento de la invención con cada método heurístico de optimización para evaluar el coste computacional de la aplicación de estas técnicas. La Tabla V muestra los resultados obtenidos.

<b>Método optimización</b>	<b>Time [s]</b>	<b>EMA [μm]</b>	<b>ITEA [μm]</b>	<b>ISCA [A]</b>
FT	-	12,6	61,5	70,3
GA	1 453	4,8	59,4	176,4
CE	350	5,2	57,4	138,2
SA	2 901	5,0	59,6	130,5

Tabla V: Parámetros estadísticos (simulación)

Como se puede apreciar, el uso del procedimiento de la invención con cualquiera de los tres métodos de optimización heurísticos considerados (GA, CE, SA) permite obtener una gran mejora en cuanto al error máximo absoluto (EMA) y a la integral del error máximo absoluto (ITEA) con relación al método Finetune (FT) convencional. Específicamente, el error máximo absoluto (EMA) obtenido mediante el procedimiento de la invención en cualquiera de sus versiones (GA, CE, SA) resulta ser menor que la mitad que el obtenido mediante el método Finetune (FT) convencional. Nótese que el error máximo absoluto (EMA), que se produce principalmente en los momentos de cambio de dirección, es responsable en buena parte de los defectos en la calidad de las piezas mecanizadas mediante una máquina-herramienta. Por tanto, a partir de estos datos correspondientes a simulaciones, puede deducirse que el procedimiento de la invención permite obtener una importante mejora en la calidad de las piezas fabricadas. Sin embargo, como se observa en la columna correspondiente a la integral de la señal de control absoluta (ISCA), que refleja el esfuerzo de control entendido como cantidad de energía que se necesita para controlar el sistema físico, esta mejora en la precisión se obtiene a costa de un esfuerzo de control ligeramente superior.

#### 4. Validación experimental

Para validar los datos obtenidos mediante simulaciones con ayuda del gemelo digital del sistema, se realiza ahora una validación experimental. Para ello, se cargan en el controlador real de la máquina-herramienta los parámetros obtenidos mediante los métodos de optimización descritos anteriormente y se recorre la trayectoria de referencia descrita con anterioridad.

La Fig. 10 muestra el error de posición experimental usando cada uno de los conjuntos de parámetros del controlador determinados anteriormente. Al igual que en el caso de las simulaciones (Fig. 6), se aprecia que cualquiera de las soluciones obtenidas con el procedimiento de la presente invención presenta un error máximo absoluto menor que el correspondiente a la solución obtenida mediante el método Finetune (FT) empleado convencionalmente. Como se puede apreciar, los errores absolutos máximos de posición son inferiores a 16  $\mu\text{m}$  en todos los casos. Los valores de error más altos tienen lugar cuando aumenta la velocidad.

Las Figs. 11-13 muestran un análisis más detallado del error centrado en el punto de cambio de velocidad correspondiente al intervalo [4,7 s -5,4 s]. Concretamente, la Fig. 11 muestra la posición y velocidad correspondiente a la trayectoria de referencia en el intervalo considerado, la Fig. 12 muestra el error de posición cometido cuando se utilizan los parámetros del controlador, calculados según los tres métodos heurísticos considerados y el método Finetune convencional, y la Fig. 13 muestra la amplitud de la señal de control correspondiente a dichos métodos heurísticos y Finetune.

Se aprecia en la Fig. 12 que los errores de posición presentan tendencias similares, aunque con valores ligeramente diferentes. Además, la Fig. 13 muestra que el comportamiento de las señales de control no presenta diferencias significativas, siendo similar en los tres métodos heurísticos de optimización (GA, CE, SA) considerados y en el método Finetune (FT) convencional.

Para analizar estos resultados y compararlos con los obtenidos mediante simulaciones, se calculan los parámetros EMA, ITEA e ISCA descritos anteriormente y se muestran en la siguiente Tabla VI.

35

<b>Método optimización</b>	<b>EMA [μm]</b>	<b>ITEA [μm]</b>	<b>ISCA [A]</b>
FT	15,2	200	3224
GA	10,9	158	3241
CE	11,2	154	3295
SA	12,2	162	3247

Tabla VI: Parámetros estadísticos (experimental)

Como se puede apreciar, la mejora real en cuanto al error máximo absoluto (EMA) del procedimiento de la invención en cualquiera de sus versiones (GA, CE, SA) con relación al método Finetune (FT) convencional es algo menor que la predicha por la simulación, aunque se mantiene en cualquier caso en el entorno del 20-30%. Concretamente, las mejoras son del 28%, 26% y 20%, respectivamente, para los métodos GA, CE y SA con relación al FT convencional. Si se considera la integral del error absoluto, las mejoras son del 21%, 23% y 19% respectivamente. En cualquiera de los casos, se trata de una mejora muy relevante en cualquier entorno industrial.

Además, sorpresivamente la Tabla VI también muestra que la integral de la señal de control absoluta (ISCA) presenta valores muy parecidos tanto para el procedimiento de la invención en cualquiera de sus versiones (GA, CE, SA) como para el método Finetune (FT) convencional. Es decir, los datos experimentales muestran que la mejora del 20-30% en precisión no requiere realmente un mayor esfuerzo de control, como parecían predecir los datos teóricos, ya que el aumento en el esfuerzo de control está limitado a no más del 3%.

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de parametrización automática de controlador mediante gemelo digital del sistema ciberfísico, para determinar un conjunto de parámetros óptimos del controlador de un sistema físico, caracterizado por que comprende los siguientes pasos:
- 5
- a. generar un gemelo digital del sistema ciberfísico formado por el controlador y el sistema físico, donde los valores de los parámetros característicos del sistema físico son conocidos y los valores de los parámetros característicos del controlador son las incógnitas a determinar;
- 10
- b. determinar el valor de los parámetros del controlador que minimizan una función de coste seleccionada mediante los siguientes pasos:
- b.1 crear un conjunto inicial de valores de los parámetros del controlador;
- b.2 simular, mediante el gemelo digital del sistema ciberfísico y utilizando dicho conjunto de valores de los parámetros del controlador, una trayectoria de referencia recorrida por el sistema físico;
- 15
- b.3 calcular el valor de la función de coste relativa a dicha simulación de trayectoria de referencia;
- b.4 evaluar la bondad del conjunto de valores de los parámetros del controlador utilizando un método de optimización seleccionado;
- 20
- b.5 si la evaluación determina que no se cumplen unas condiciones de finalización del método de optimización, generar un nuevo conjunto de valores de los parámetros del controlador y repetir los pasos anteriores desde la simulación de una trayectoria de referencia; y
- b.6 si la evaluación determina que se cumplen las condiciones de finalización del método de optimización, tomar el conjunto actual de valores de los parámetros del controlador como el conjunto de parámetros óptimos.
- 25
2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde el sistema físico es una máquina-herramienta para el mecanizado de piezas.
- 30
3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2, donde la máquina-herramienta tiene un grado de libertad y comprende un carro que se desplaza longitudinalmente a lo largo de un husillo.
- 35
4. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3, donde el gemelo digital de la máquina-herramienta formada por un carro que se desplaza longitudinalmente a lo largo de

un husillo comprende: un primer sumador (S1) que tiene una entrada positiva procedente de una señal de corriente (C) obtenida por el controlador, una entrada negativa procedente de la salida de un bloque de fricción (BF), y una salida que entra en el primer bloque principal (B1) del de la máquina-herramienta; la salida del primer bloque principal (B1) entra en un  
5 segundo bloque principal (B2) de la máquina herramienta, así como en un primer bloque integral (BI1); la salida del primer bloque integral (BI1) constituye una señal de posición del motor (PM), que está configurada para ser realimentada a un bucle interno del controlador; la salida del segundo bloque principal (B2) entra en el bloque de fricción (BF) y también en un segundo bloque integral (BI2); la salida del segundo bloque integral (BI2) entra en un  
10 bloque de histéresis (BH) cuya salida se introduce en un segundo sumador (S2) junto con una señal procedente de un bloque de ruido (BR), donde la salida del segundo sumador (S2) constituye una señal de posición de la carga (PC) que está configurada para ser realimentada a un bucle externo del controlador.

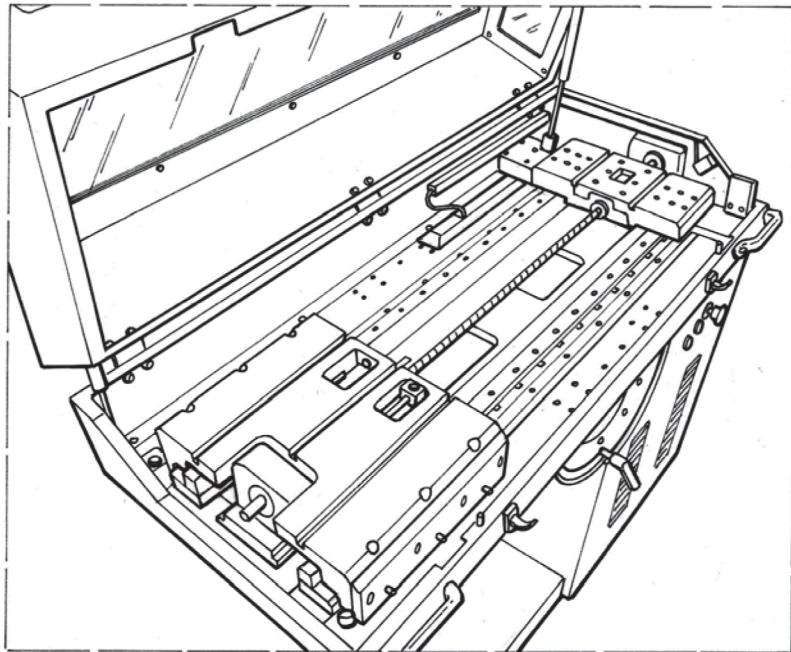
15 5. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el controlador del sistema físico comprende dos bucles P-PI anidados en cascada.

6. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 5, donde el gemelo digital del controlador formado por dos bucles P-PI anidados en cascada comprende: un tercer  
20 sumador (S3) en el que se introduce con signo positivo una señal de referencia y con signo negativo la señal de la posición de la carga (PC); la salida del tercer sumador (S3) entra en un bloque de control proporcional (BP), cuya salida entra en un cuarto sumador (S4) junto con una señal de ganancias anticipativas (GA), ambos positivamente; la salida del cuarto sumador (S4) entra con signo positivo en un quinto sumador (S5) en el que también entra,  
25 con signo negativo, la señal de posición del motor (PM) tras pasar por un bloque de derivada (BD); la salida del quinto sumador (S5) entra en un bloque de control proporcional integral (BPI), cuya salida entra en un sexto sumador (S6) al que también entran unas ganancias anticipativas (GA), ambas con signo positivo; la salida del sexto sumador (S6) entra en un séptimo sumador (S7) junto con una señal de perturbación (P), ambas positivas; la salida del  
30 séptimo sumador (S7) constituye la señal de corriente (C) que entra en el gemelo digital del sistema físico.

7. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el método de optimización es un método de optimización heurístico que se elige de entre:  
35 algoritmos genéticos (GA), recocido simulado (SA) y entropía cruzada (CE).

8. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la función de coste se elige como una suma ponderada del error absoluto máximo y la integral del error absoluto
- 5 9. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende un paso previo de determinación de los parámetros característicos del sistema físico.
- 10 10. 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 9.
11. Programa de ordenador según la reivindicación 10, incorporado en medios de almacenamiento.
- 15 12. Programa de ordenador según la reivindicación 10, soportado en una señal portadora.





**FIG.1**  
TÉCNICA ANTERIOR

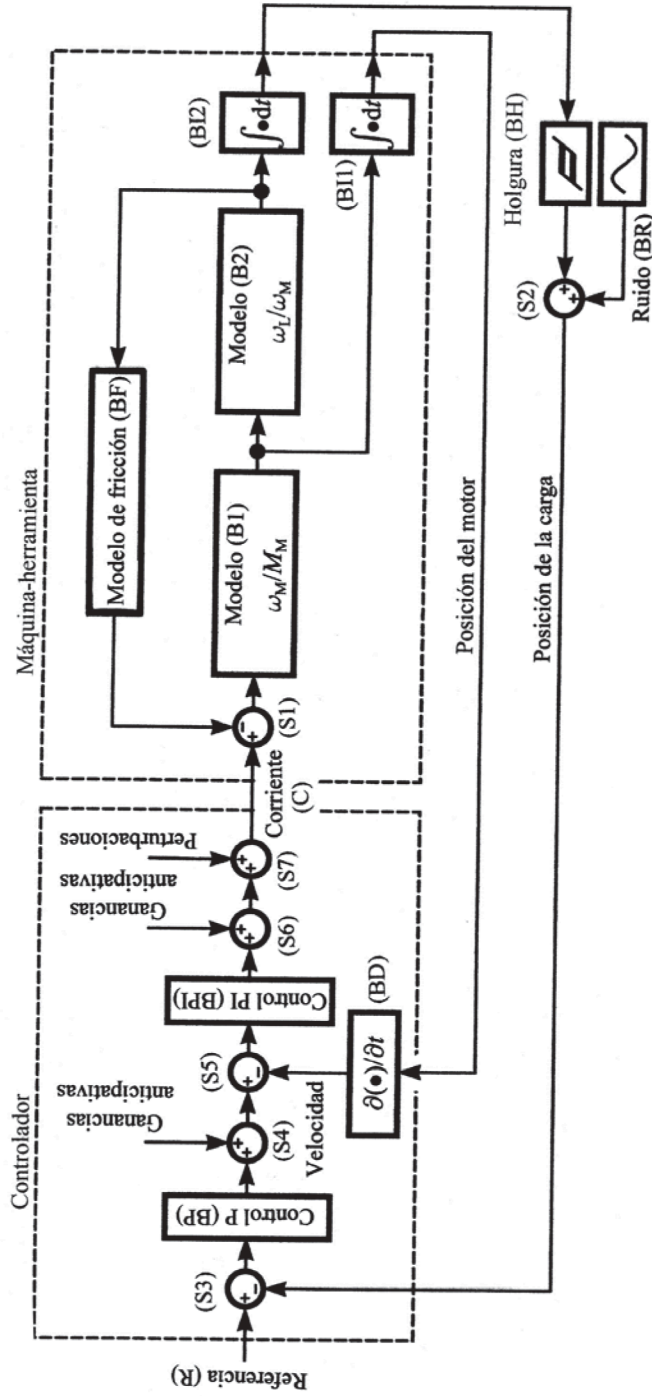


FIG.2

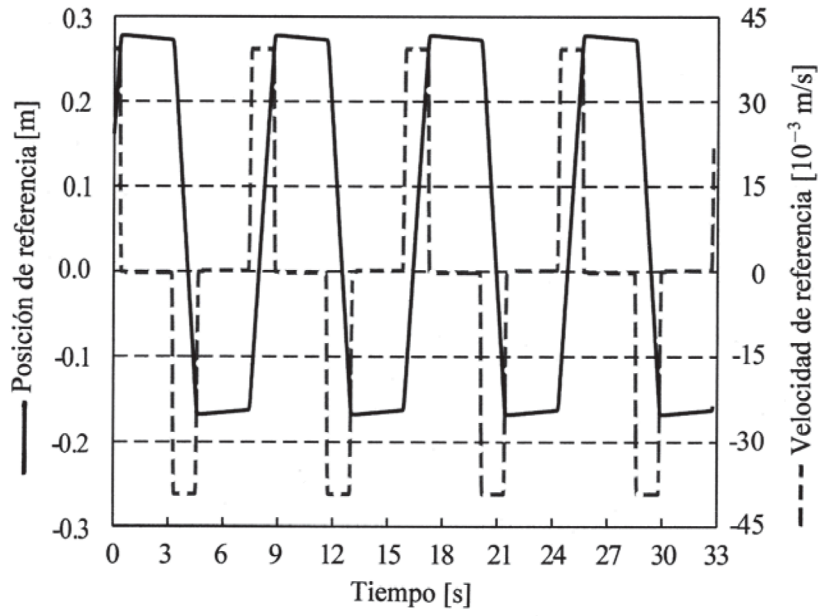


FIG. 3

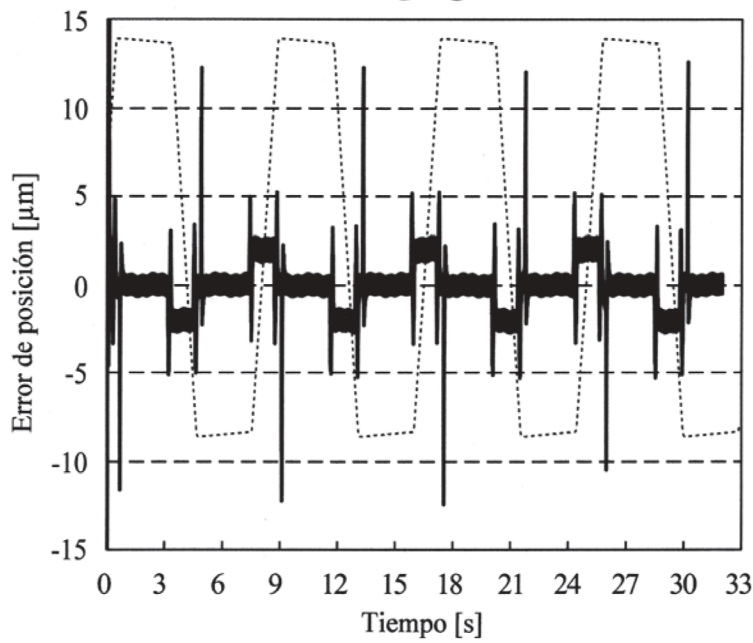


FIG. 4

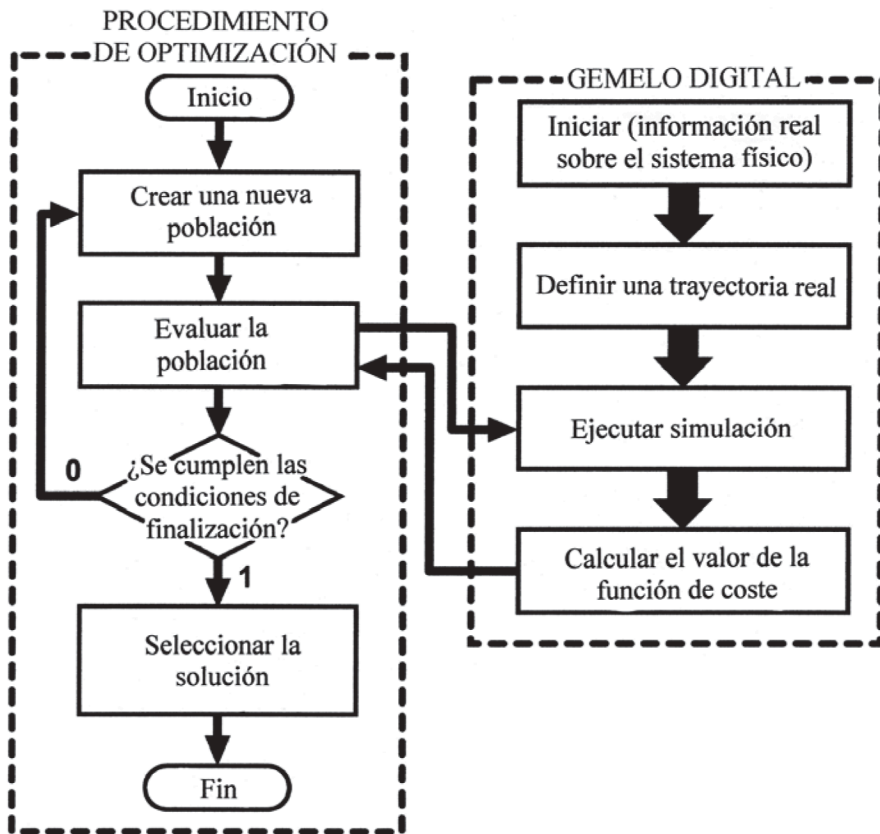


FIG.5

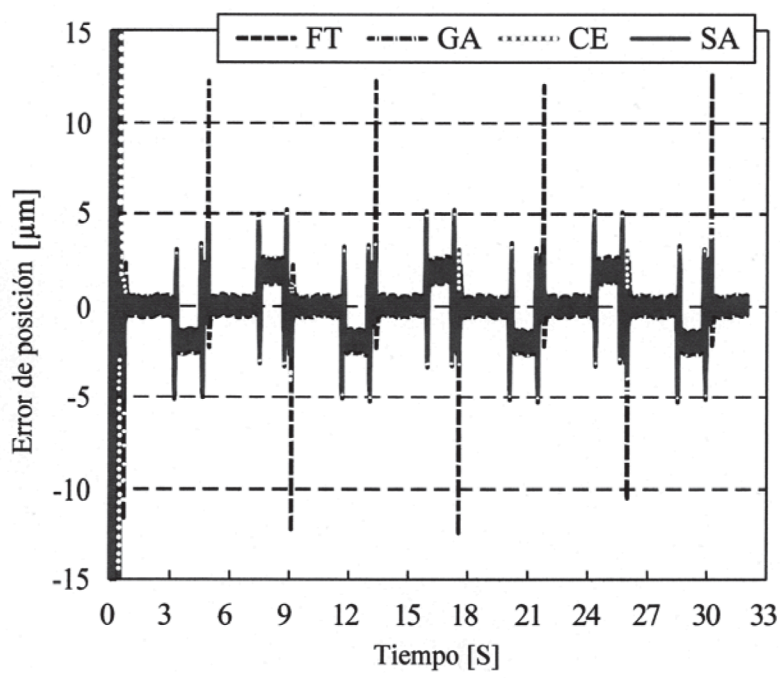


FIG.6

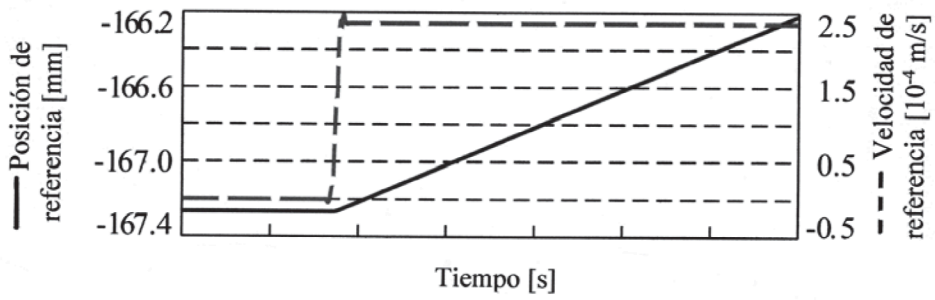


FIG.7

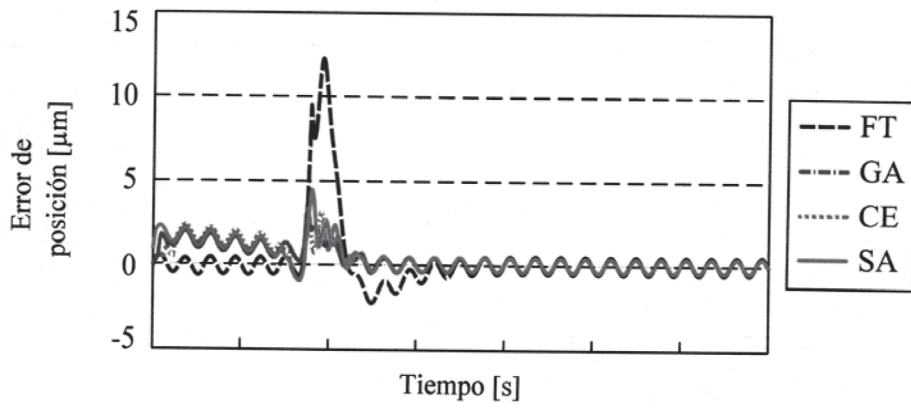


FIG.8

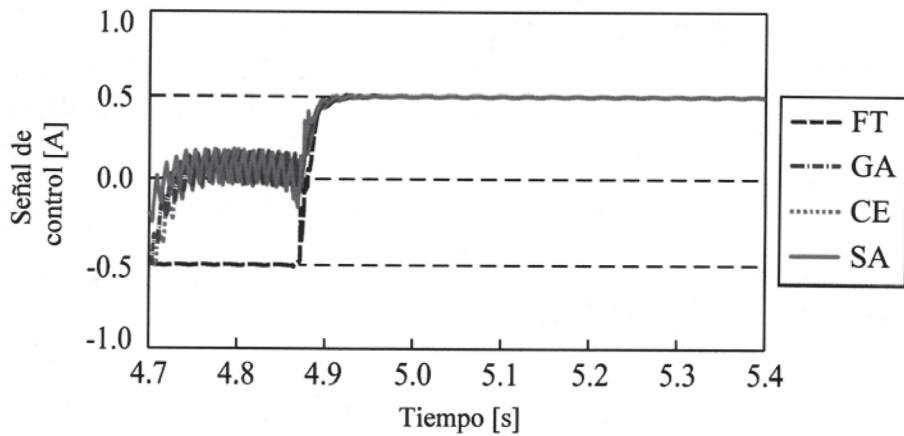
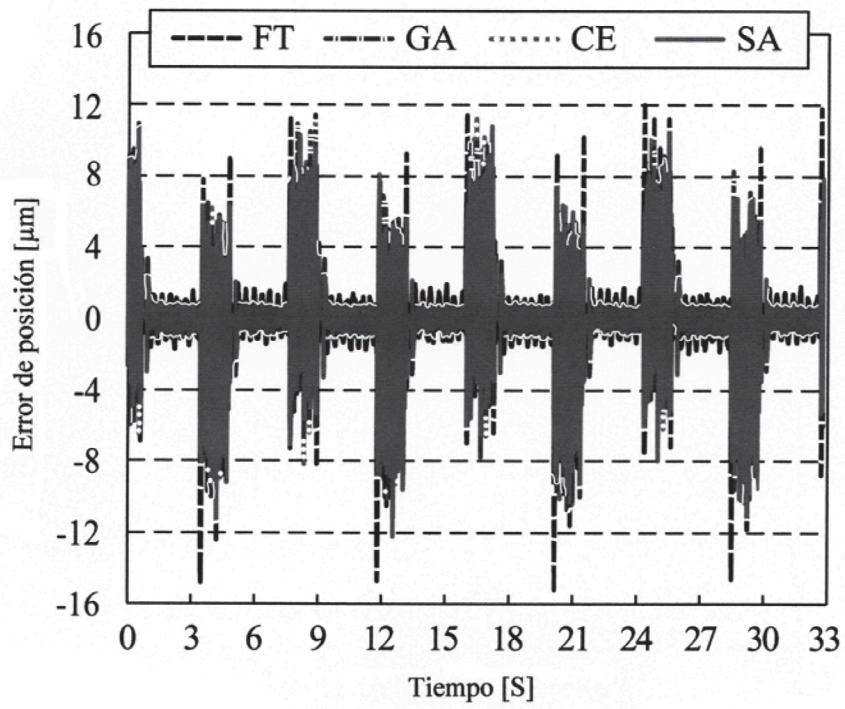


FIG.9





**FIG.10**

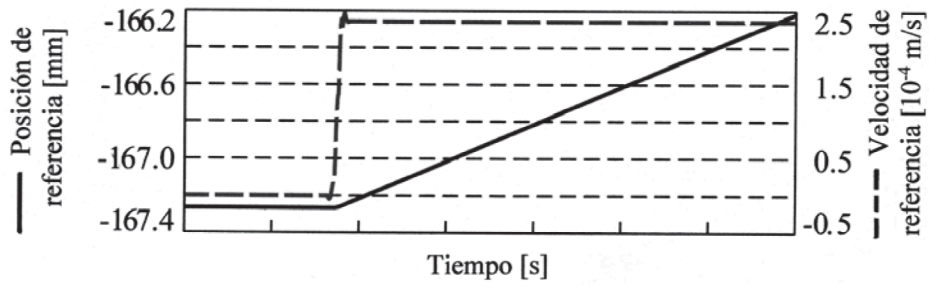


FIG.11

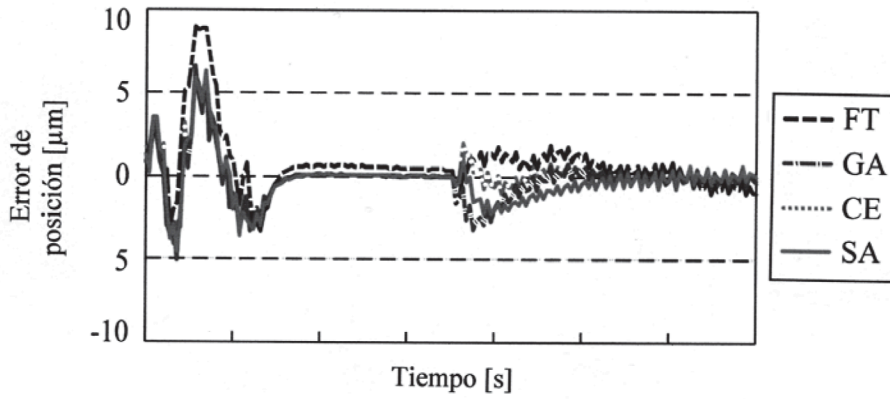


FIG.12

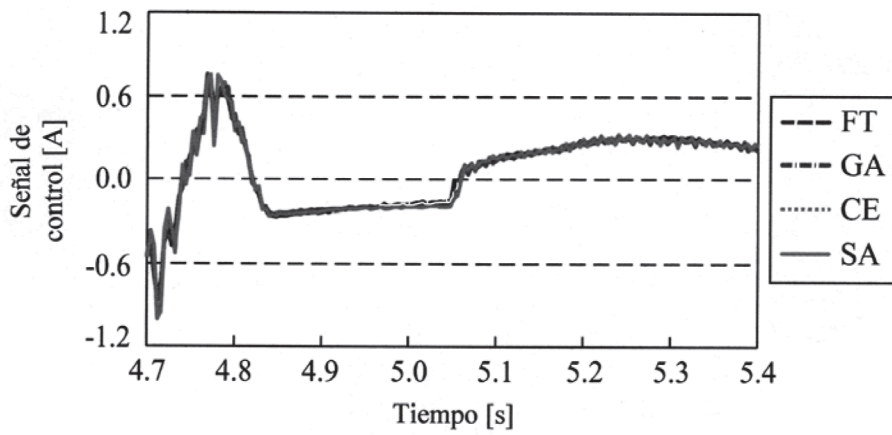


FIG.13



- ②<sup>1</sup> N.º solicitud: 201930465  
②<sup>2</sup> Fecha de presentación de la solicitud: 28.05.2019  
③<sup>2</sup> Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤<sup>1</sup> Int. Cl.: Ver Hoja Adicional

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑥ <sup>1</sup> Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	LUO, W.; HU, T.; ZHANG, C.; WEI, Y.; Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing; marzo 2019, Vol. 10, Nº 3, Páginas 1129-1140, ISSN 1868-5137 (impreso); 1868-5145 (electrónico); <DOI: 10.1007/s12652-018-0946-5>	1-3, 5, 7-12
Y		4, 6
Y	HABER, R.; ARENAS, J.; MATIA, F.; VILLALONGA, A.; GONZÁLEZ FONTANET, J.; Ajuste óptimo y automático de un sistema de control en cascada. Aplicación al seguimiento de trayectorias en servosistemas con fricción y zona muerta. Actas de las XXXIX Jornadas de Automática, septiembre 2018 [en línea][recuperado el 14/02/2020]. Recuperado de Internet <URL: <a href="http://dehesa.unex.es/bitstream/handle/10662/8778/978-84-09-04460-3_924.pdf?sequence=1&amp;isAllowed=y">http://dehesa.unex.es/bitstream/handle/10662/8778/978-84-09-04460-3_924.pdf?sequence=1&amp;isAllowed=y</a> >	4, 6
X	RONGLI ZHAO; DOUXI YAN; QUIANG LIU; JIEWU LENG; JIAFU WAN; XIN CHEN; XIAFENG ZHANG.; Digital Twin-Driven Cyber-Physical System for Autonomously Controlling of Micro Punching System. IEEE Access; enero 2019, Vol. 7, Páginas 9459-9469, ISSN 2169-3536 (electrónico); <DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2891060>	1-3, 5, 7-12
A	SCAGLIONI, B; FERRETTI, G.; Towards digital twins through object-oriented modelling: a machine tool case study. IFAC-Papers Online, 9th Vienna International Conference on Mathematical Modelling, 2018, Vol. 51, Nº 2, Páginas 613-618, ISSN 2405-8963 (impresa); <DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.03.104>	1-12

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

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

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

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

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

#### El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
17.02.2020

Examinador  
M. J. Lloris Meseguer

Página  
1/3



OFICINA ESPAÑOLA  
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

②<sup>1</sup> N.º solicitud: 201930465

②<sup>2</sup> Fecha de presentación de la solicitud: 28.05.2019

③<sup>2</sup> Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤<sup>1</sup> Int. Cl.: Ver Hoja Adicional

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑥ <sup>1</sup> Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	EP 3451091 A1 (SIEMENS AG) 06/03/2019, párrafos 25, 26, 30-65; figuras 2-4.	1-12

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

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

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

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

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

**El presente informe ha sido realizado**

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones n.º:

Fecha de realización del informe  
17.02.2020

Examinador  
M. J. Lloris Meseguer

Página  
2/3

## CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

**G05B19/19** (2006.01)

**G06F9/44** (2018.01)

**G05D3/00** (2006.01)

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

G05B, G06F, G05D

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

INVENES, EPODOC, WPI