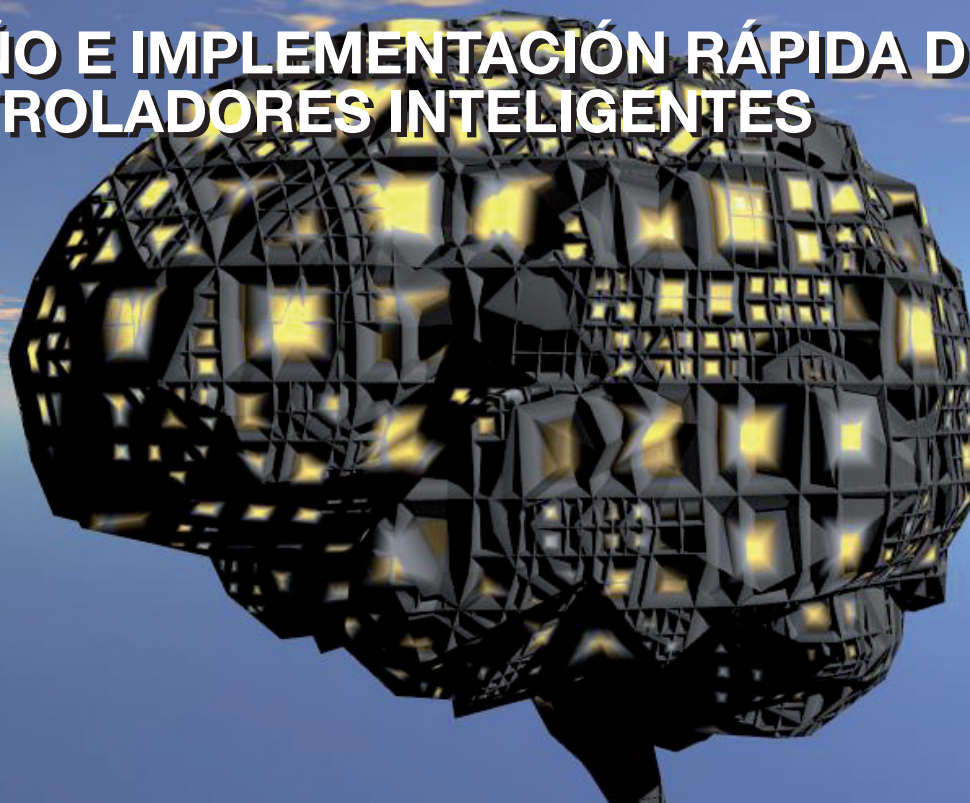


DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN RÁPIDA DE CONTROLADORES INTELIGENTES



FAST DESIGN AND IMPLEMENTATION OF INTELLIGENT CONTROLLERS

Rodolfo Haber Guerra
Doctor Ingeniero Industrial
Escuela Politécnica Superior- UAM
Instituto de Automática
Industrial - CSIC

José Ramón Alique López
Doctor en Ciencias Físicas
Instituto de Automática
Industrial - CSIC

Recibido: 13/02/08
Aceptado: 23/09/08

Rodolfo Haber Haber
Doctor en Ciencias Técnicas
Universidad de Oriente

Pedro Villena Salinas
Ingeniero Mecánico.
Pontificia Universidad
Católica de Perú

RESUMEN

En este artículo, se presenta una técnica para el diseño y la implementación rápida de controladores inteligentes para aplicaciones en tiempo real estricto. Se ha seleccionado un sistema borroso como estrategia de control inteligente. Se ha considerado el caso real de diseño e implementación de un sistema de control borroso para optimizar un proceso de mecanizado de alto rendimiento, el taladrado. El diseño está basado en un programa de diseño asistido y en un controlador numérico por computador (CNC) de arquitectura abierta. La arquitectura abierta del CNC y la

existencia del bus de comunicaciones Profibus, facilitaron la implementación y validación del sistema de control. El estudio comparativo con un regulador lineal (PID) diseñado según Ziegler-Nichols e implementado en la misma plataforma muestra un mejor funcionamiento del regulador borroso. De este modo, se han alcanzado resultados positivos en la identificación y el control del proceso mediante la técnica propuesta.

Palabras clave: control inteligente, controladores borrosos, CNC de arquitectura abierta, Profibus, proceso de taladrado.

ABSTRACT

This paper shows a method for fast design and implementation of intelligent controllers in hard real-time applications. The method is applied for designing and implementing a fuzzy control system to optimize a high-performance machining process (drilling). The design is based on computer aided design software and a computerized numerical control (CNC) with open architecture. The open CNC and the availability of an industrial field bus (Profibus) facilitate the implementation and validation of this prototype. Positive tests results are yielded in experimental identification and fuzzy logic-based control of cutting force by the suggested technique compared with a PID controller designed using the Ziegler-Nichols method.

Key words: *intelligent control, fuzzy control design, open architecture CNC, Profibus, drilling process.*

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de diseño e implementación asistida de controladores permiten la implementación y validación de estrategias de control de forma rápida, durante el proceso de desarrollo de un sistema de control para la optimización de procesos industriales (Álvarez y Miguel, 2007). Para la aplicación de esta técnica en tiempo real se requieren básicamente tres componentes que son: un programa de diseño asistido de sistemas de control por computadoras (*Computer-Aided Control System Design, CACSD*), un sistema operativo en tiempo real, y el hardware necesario para la aplicación específica (Bucher y Balemi, 2003).

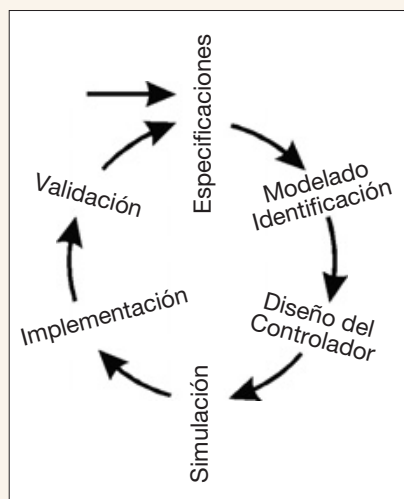


Figura 1. Fases de desarrollo de un sistema de control.

Los programas CACSD tienen el propósito de modelar y simular sistemas de control y procesos dinámicos complejos en tiempo continuo ó discreto. La importancia del programa CACSD radica en que permite al usuario trabajar en el mismo entorno en todas las fases de desarrollo del sistema de control (Figura 1), con lo que consigue un rápido diseño e implementación de controladores avanzados (Bucher y Dozio, 2003).

Este trabajo está dirigido a un proceso de fabricación de reconocida complejidad, donde se requieren mejoras productivas solo alcanzables a través de nuevos dispositivos de control. De este modo se requiere crear, estudiar y comparar el comportamiento de diferentes tipos de controladores. Para la aplicación experimental del prototipado rápido, se ha elegido un centro de mecanizado de alto rendimiento equipado con un control numérico por computador (CNC) de arquitectura abierta. Entre los procesos que se realizan en dicha máquina está el proceso de taladrado, que es muy frecuente en la industria. El objetivo final es la creación de sistemas de supervisión y control para el mecanizado de materiales de alta dureza, ampliamente usados en el sector metal-mecánico y en particular el aeroespacial.

Este artículo está dividido en seis secciones. En la primera sección, se presenta una introducción donde se fundamentan las motivaciones de este trabajo. La segunda sección, contiene una breve descripción del taladrado y como mejorar sus prestaciones mediante la automatización. En la siguiente sección, se realiza una breve descripción del software y el hardware que se ha utilizado e implementado. En el cuarto apartado, se ofrecen los datos de los equipos, tanto mecánicos, como de hardware y software. En la quinta sección, se describen las aplicaciones desarrolladas y los resultados experimentales obtenidos. En la última sección se brindan algunos comentarios finales y conclusiones acerca de este trabajo.

2. EL PROCESO DE MECANIZADO

2.1 EL CENTRO DE MECANIZADO Y LA AUTOMATIZACIÓN.

Un centro de mecanizado es el resultado de la integración de una máquina herramienta multipropósito con un control numérico por computador. El CNC del centro de mecanizado gobierna la máquina herramienta mediante los equipos de control adecuados y se comunica con el usuario mediante una interfaz hombre-máquina (*Human Machine Interface, HMI*). Pero si además, éste es capaz de comunicarse con otros ordenadores externos no dedicados, entonces se dice que el CNC es de arquitectura abierta (Alique y Haber, 2004).

Un CNC de arquitectura abierta permite al fabricante de centros de mecanizado y a sus usuarios; incorporar y adaptar las aplicaciones especiales que el cliente requiera. Por ejemplo, se puede personalizar la interfaz gráfica de usuario (*Guided User Interface, GUI*) para cada aplicación, intercambiar grandes volúmenes de datos a través de la red de comunicaciones, gestionar las bases de datos históricas, controlar las acciones del control numérico mediante un controlador supervisor, etc. Actualmente, están aumentando los fabricantes de máquinas herramienta que incorporan CNC de arquitectura abierta en los centros de mecanizado, debido a las mejores prestaciones que esta configuración puede alcanzar en comparación con los sistemas de arquitectura cerrada.

Precisamente, la arquitectura abierta es particularmente útil para la introducción de sistemas de control

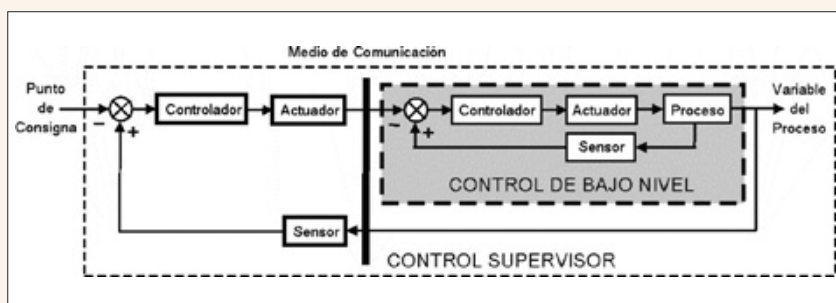


Figura 2. Diagrama del control supervisor.

supervisor (Figura 2). El nivel superior del sistema está dotado de un ordenador que es usado para monitorizar y/o controlar el proceso mediante alguna variable representativa (e.g., fuerza de corte, par de corte). El controlador supervisor es capaz de elaborar dinámica y automáticamente una acción de control y enviarla a los lazos de control de bajo nivel (posición, velocidad), a través de la arquitectura abierta. El sistema de control debe, por tanto, garantizar un funcionamiento óptimo del proceso, que se puede evaluar cuantitativamente mediante alguna cifra de mérito o índice de comportamiento.

2.2 PROCESO DE TALADRADO.

El taladrado es un proceso de mecanizado mediante el cual se producen agujeros cilíndricos en una pieza, y es muy importante por su amplio uso a escala industrial. Para la eliminación o arranque del material de la pieza se utiliza una herramienta de corte giratoria llamada broca. En la broca se distinguen los filos y las ranuras por donde se evacúan las virutas arrancadas a la pieza. El fabricante suele especificar las condiciones de corte nominal en las que las herramientas de corte deben operar para cada tipo de material.

Examinando la operación de taladrado, se puede observar que, según aumenta la profundidad del agujero, las virutas dejan de evacuarse suave y fluidamente, por lo que se incrementa la fricción entre la broca y la pieza. Entonces, crece el par y la temperatura de corte, pudiendo llegar a generarse vibraciones, un excesivo desgaste de la broca y hasta la rotura catastrófica de ésta. Todos estos efectos obviamente indeseables desde todo punto de vista práctico.

Las características del proceso de taladrado, justifican ampliamente la aplicación del control a lazo cerrado de la fuerza de corte, que ha demostrado capacidad para proporcionar significativos beneficios económicos en los procesos de taladrado (Furness, et al., 1999).

3. SOFTWARE Y HARDWARE PARA EL PROTOTIPADO RÁPIDO

Consideramos necesario mencionar algunas de las características fundamentales de algunos dispositivos y software utilizados para el prototipado rápido de controladores en las aplicaciones desarrolladas. Nos centraremos en uno de los sistemas propietarios disponibles comercialmente.

3.1 PROGRAMA MATLAB/SIMULINK/RTWT.

MATLAB/SIMULINK es una herramienta informática que se utiliza para la creación, simulación y análisis de sistemas dinámicos por medio de diagramas con bloques de funciones debidamente enlazados. Por su parte, la herramienta de tiempo real (*Real-Time Workshop*, RTW) es otro módulo software del programa MATLAB que se usa en combinación con el programa MATLAB/SIMULINK. Este permite la generación directa del código, a partir de un diagrama en MATLAB/SIMULINK, mediante un traductor llamado TLC (*Target Language Compiler*), donde se especifican las reglas para la generación del código. De esta forma, el código generado puede ser usado por cualquier compilador estándar de cualquier plataforma (arquitectura, procesador o sistema operativo) (Quanta y Mantegazza, 2001; Mathworks, 2005).

El RTWT (*Real-Time Windows Target*) es un sistema CACSD, que trabaja sobre el MATLAB/SIMULINK, diseñado para la creación rápida de aplicaciones, la simulación en hardware de sistemas dinámicos y la implementación de algoritmos de procesamiento de señales. Dispone de una biblioteca de manipuladores (software) para generar código, un enlace a algún compilador

preinstalado, un pequeño núcleo en tiempo real y un canal de comunicaciones. De esta forma se aprovechan las prestaciones que ofrece, permitiendo que el usuario se centre en el modelado y diseño del controlador y no en la programación directa o la interfaz gráfica (Mathworks, 2006).

En este trabajo se ha utilizado el manipulador de una tarjeta de adquisición de datos AT-MIO-16E-1, y se ha desarrollado un manipulador (software) para la comunicación con el servicio de intercambio dinámico de datos (DDE), que es un servicio soportado por el sistema operativo Windows (Siemens, 2005).

Cuando la tarea de la aplicación se esté ejecutando en tiempo real, es posible que la interfaz GUI del MATLAB/SIMULINK se comunique con ésta mediante el llamado modo externo. El modo externo es un sistema de comunicaciones cliente/servidor, donde la interfaz del MATLAB/SIMULINK es el cliente y las tareas en tiempo real son los servidores. Este sistema utiliza el método de memoria compartida, de forma que clientes y servidores pueden intercambiar información mediante mensajes (Figura 3).

3.2 CNC ABIERTO Y PROFIBUS.

El centro de mecanizado, en el que se ha llevado a cabo el estudio, utiliza un control numérico (Sinume-

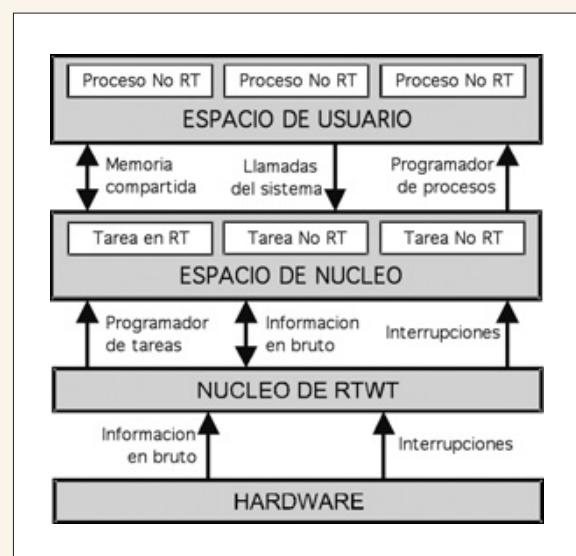


Figura 3. Diagrama de la arquitectura del núcleo del RTWT.

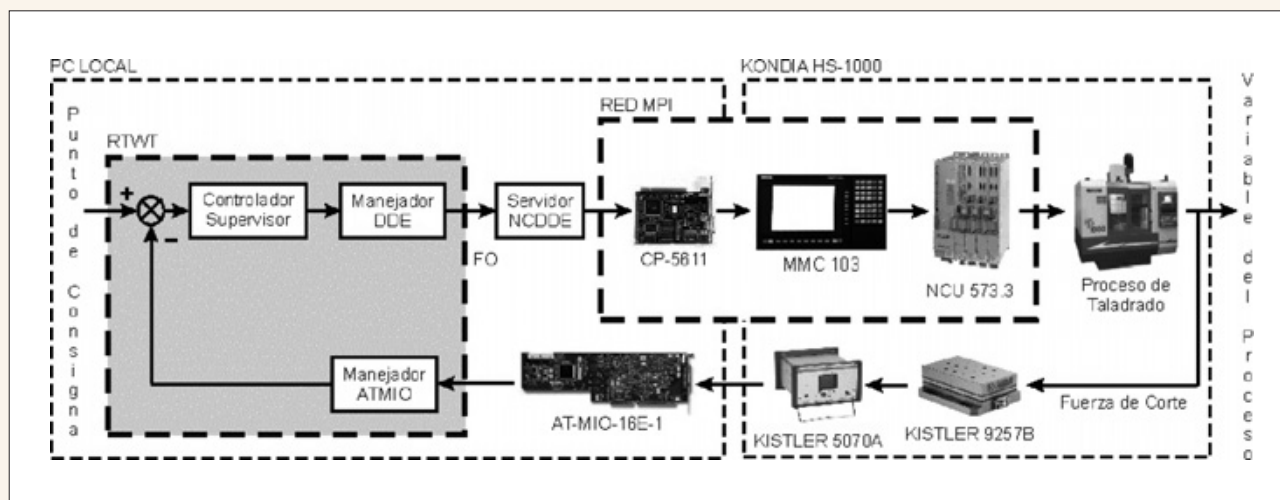


Figura 4. Diagrama del sistema de adquisición de datos y control.

rik 840D) equipado con un bus de comunicaciones propietario, muy similar al Profibus, conocido como interfaz multipunto (*Multi Point Interface, MPI*). Este bus de comunicaciones permite el intercambio de datos desde un ordenador local externo que tenga instalada una tarjeta de comunicaciones. La transferencia de información está basada en la tarjeta AT-MIO-16E-1 anteriormente mencionada y una tarjeta de comunicaciones propietaria (CP5611). Al sistema de adquisición se acoplan los amplificadores de señales y un sensor de fuerza de muy altas prestaciones (Kistler 9257B), cuya función es entregar señales eléctricas proporcionales a las componentes ortogonales de la fuerza de corte durante el proceso mecanizado (Figura 4). Se aprovecha además la posibilidad de utilizar herramientas propias para desarrolladores (OEM) como el servidor de intercambio dinámico de datos del control numérico (*Numerical Control - Dynamic Data Exchange, NCDDE*), que es un programa auxiliar que maneja las tareas de transferencia de datos del control numérico de arquitectura abierta.

4. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Se cuenta con el centro de mecanizado KONDIA HS1000 equipado con el CNC anteriormente descrito.

Entre las principales características técnicas de este centro de mecanizado están: potencia de 26 kW, máxima velocidad de giro 24000 rpm, velocidad de avance rápido 24 m/min, par máximo disponible 28 Nm (a 6000 rpm).

Para los experimentos, se ha usado un acero de fundición nodular (GGG-40), que tiene una dureza de 22 HRc. Las condiciones nominales de corte para el proceso de taladrado de alto rendimiento se fijaron en una velocidad de avance nominal de 100 mm/min y una velocidad de giro nominal de 870 rpm. Teniendo en cuenta la dureza del material y las condiciones de corte, se ha seleccionado la broca SANDVIK CoroDrill Delta-C R840-1000-30-A0A, que tiene, un diámetro de 10 mm, recubrimiento de TiN/TiAlN multicapa y utiliza refrigerante externo (emulsión ó aceite de corte) (Sandvik, 2007).

La red de comunicaciones está formada por varios equipos de la familia Sinumerik 840D, dicha red tiene características muy parecidas a la conocida red Profibus (*Process Field Bus*), y la principal diferencia radica en el protocolo de comunicaciones MPI (Casanova, et al., 2006). Además se ha conectado una PC local que ha servido como controlador supervisor, capaz de intercambiar datos con el CNC de arquitectura abierta. De esta forma, la red de comunicaciones está

compuesta por cuatro equipos que se agrupan en dos niveles: nivel de maestros y nivel de esclavos.

El retardo de tiempo para la transmisión de la señal por la red de comunicaciones representa un parámetro de crucial importancia en el funcionamiento y para la dinámica del sistema de control supervisor. Es importante que este retardo esté acotado y se conozca su valor máximo. De este modo es posible determinar y fijar la frecuencia de muestreo y la máxima con la que el controlador supervisor puede actuar sobre el CNC. Físicamente, el retardo representa el tiempo que transcurre desde que el valor de una variable es modificado en algún equipo conectado a la red, hasta que dicho valor es recibido en los demás equipos. Se ha estimado un retardo máximo de 4.946 ms (Haber et al. 2008).

4.1 CNC ABIERTO Y PROFIBUS.

Con el programa Matlab/Simulink se ha desarrollado un procedimiento a medida (*S-Function*) para el manejo del CNC a través del servidor NCDDE (Figura 5).

Dicho secuencia consiste en tres procedimientos. El primer procedimiento se realiza cuando se carga la aplicación en el modo de núcleo. El segundo contiene la función principal del manejador, que es actualizar la

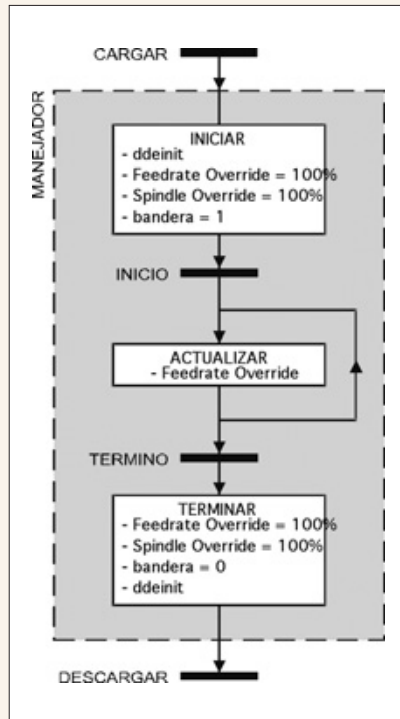


Figura 5. Diagrama del manipulador del servidor NCDDE para RTWT.

variable manipulada del proceso de corte, que en este caso es la velocidad de avance generada en cada ciclo de control. Finalmente, el último procedimiento descarga la aplicación del núcleo para liberar los recursos.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de los experimentos a lazo abierto orientados a la identificación experimental y modelado del proceso de taladrado. Asimismo, se explican las tareas de implementación y se presentan los resultados a lazo cerrado para el control de la fuerza de corte en el proceso taladrado mediante un controlador lineal PID y un controlador inteligente representado por un regulador borroso.

5.1 ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL.

Se ha realizado la identificación experimental a lazo o bucle abierto del proceso de taladrado. Para esto, es preciso excitar al proceso con al-

guna señal de entrada conocida (impulso, escalón, senoide, aleatoria). En este período, es preciso realizar la adquisición y almacenamiento de los valores de las variables físicas que caracterizan al proceso. Luego se procesan estos datos fuera de línea.

En nuestro caso, la excitación aplicada fue una señal escalón en la velocidad de avance y en la profundidad de corte, y la respuesta del proceso fue la fuerza de corte. El perfil de estas señales de excitación fueron previamente programadas en el CNC. Las componentes ortogonales de la fuerza de corte (F_x , F_y , y F_z) producidas se midieron y enviaron a la PC a través de los sensores y amplificadores. En el sistema desarrollado se realiza un pre-procesamiento para determinar la fuerza resultante por revolución, F_{RR} (Ecuación 3), que fue el valor usado para la identificación.

$$F_{RR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{F_i\}_2; \quad F = (F_x, F_y, F_z) \quad (3)$$

Para el diseño e implementación de esta aplicación se han tenido en cuenta los requerimientos del sistema de medición tales como: frecuencia de muestreo de las componentes ortogonales de 50 kHz, número de canales para la adquisición: 3 (modo diferencial), rango de voltaje para la

conversión: ± 10 V (bipolar), escalamiento de las señales, y pre-procesamiento de las señales para obtener F_{RR} (Ecuación 3).

En la Figura 6, se muestran la respuesta temporal de la fuerza de corte real F_{RR} , donde están incluidos los retardos del proceso y los retardos de la red, y la respuesta la función de transferencia del proceso de taladrado (Haber, et. al. 2007).

$$G_d(s) = \frac{10,26}{0,005241s^3 + 0,09376s^2 + 0,5414s + 1} e^{-0,4s} \quad (4)$$

5.2 DISEÑO DE UN REGULADOR LINEAL PID.

La disponibilidad de un modelo lineal aproximado (válido para una región de trabajo) del proceso de taladrado permitió el diseño del controlador lineal para la regulación de la fuerza de corte en el taladrado. Esa etapa suele incluir los cálculos de los parámetros del controlador y ensayos a nivel de simulación. Una vez que los resultados de la simulación se consideran adecuados (óptimos en algún sentido), se procede a la implementación del controlador en condiciones reales, con el propósito de evaluar experimentalmente su funcionamiento.

Para asegurar que el centro de mecanizado pudiera trabajar en sus condiciones nominales mientras no se estuviese mecanizando, se ha incluido un umbral de activación, UA , para comprobar que la fuerza F_{rr} esté dentro de un rango dado y activar/desactivar el controlador mediante una bandera, B , tal y como muestra la figura.

El controlador lineal diseñado, un PID discreto

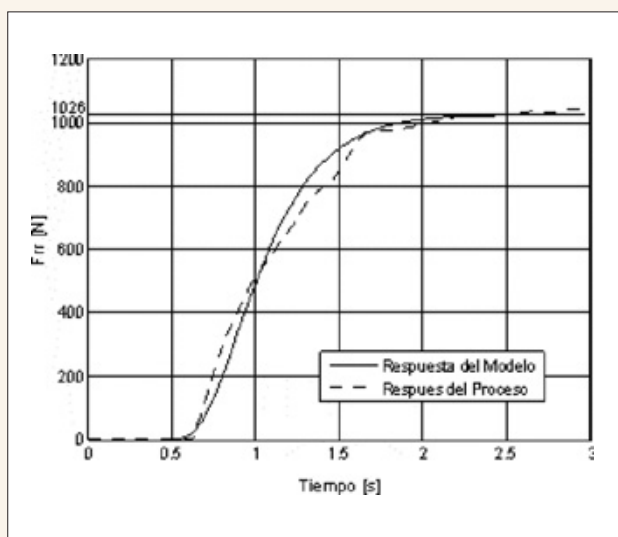


Figura 6. Gráficas temporales de la respuesta al escalón del modelo y del proceso experimental

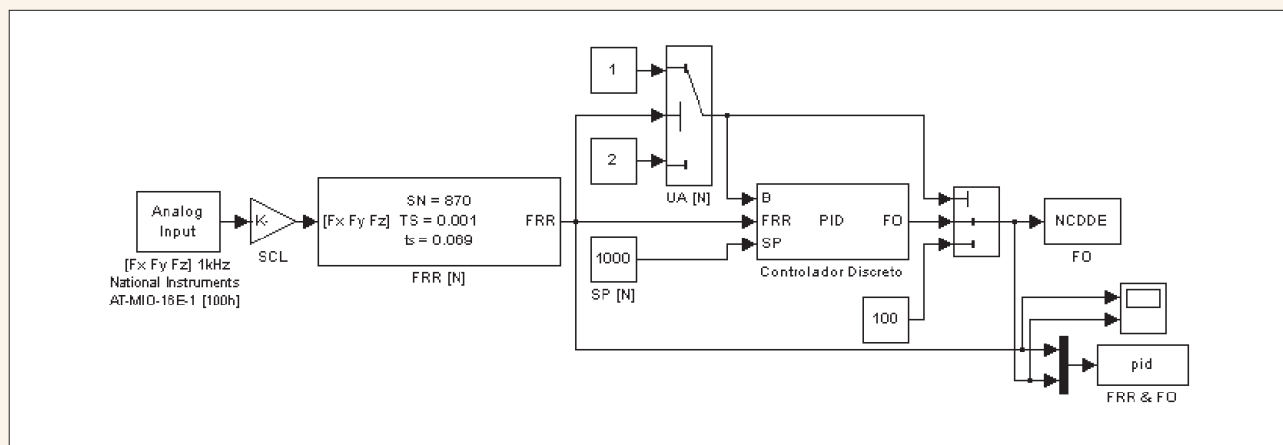


Figura 7. Diagrama en MATLAB/SIMULINK del experimento con el controlador PID.

clásico, genera la acción de control FO a partir del valor de la llamada señal de error, e , resultado de la diferencia entre F_{rr} y llamado valor de consigna (set point, SP), que es el deseado para F_{rr} (regulación de F_{rr}). Esa variable es, para la ingeniería de control automático, la más importante de cualquier lazo de control.

El diagrama en MATLAB/SIMULINK para el controlador PID está compuesto por tres partes principales, la función de transferencia discreta del filtro del SP , la normalización del error, y algoritmo de control PID, como tal, así como el limitador de saturación. Para el cálculo de las ganancias del controlador PID se usaron las técnicas de Ziegler-Nichols, con el ajuste manual de la sintonía. Se ha considerado un retardo máximo en la red de $L = 0.4$ segundos.

$$\begin{aligned} f[k] &= f_p[k] + f_i[k] + f_d[k] \\ f_p[k] &= K_p \cdot e[k] \\ f_i[k] &= f_i[k-1] + \left(\frac{K_p \cdot h}{T_i} \right) \cdot e[k] \\ f_d[k] &= \frac{T_d}{T_d + N \cdot h} f_d[k-1] + \frac{K_p \cdot T_d \cdot N}{T_d + N \cdot h} (e[k] - e[k-1]) \\ e[k] &= F_r - F[k] \end{aligned} \quad (5)$$

donde $N = 10$ es el coeficiente del filtro para la componente derivativa y $h = 0.069s$ es tiempo de muestreo.

Los parámetros del regulador PID obtenidos fueron: $K_p = 0.1086$, $T_i = 0.1483$, $T_d = 0.0219$ (Ziegler Nichols-ZN). Con el propósito de mejorar la respuesta dinámica, finalmente se ha obtenido un segundo regulador PID cuyos parámetros son $K_p = 0.01086$, $T_i = 0.01483$, $T_d = 0.00219$ (ganancias $\times 0.1$) y que posteriormente fue implementado. La elección de los reguladores PID diseñados y el ajuste utilizando el método de Ziegler-Nichols se ha hecho teniendo en cuenta trabajos previos relacionados con el control en red (Lee et al., 2003).

5.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR BORROSO.

Se ha seleccionado a un sistema borroso como estrategia de control inteligente para el proceso de mecanizado (Haber et al. 2008). Ciertamente no es la única técnica disponible ya que otros estudio utilizan técnicas como las redes neuronales artificiales en el modelado, y más específicamente para representar las preferencias de los usuarios (Diego-Mas et al. 2008). Sin embargo, es importante señalar que los controladores borrosos han mostrado su efectividad en el control de procesos complejos, de ahí su elección.

Se han considerado dos variables de entradas, el

error en la fuerza de corte F y su variación o cambio 2F , y una variable de salida, el incremento de la velocidad de avance (*Feed Override*, FO), mientras que otras variables del proceso, como la velocidad de giro, permanecen constantes.

$$\Delta F(k) = K_e \cdot [F_{SP} - F_{rr}(k)] \quad (5)$$

$$\Delta^2 F(k) = K_{\alpha} \cdot [\Delta F(k) - \Delta F(k-1)] \quad (6)$$

En base al conocimiento del proceso de taladrado y los datos experimentales obtenidos, se fijó el universo de discurso de las variables de entrada entre ± 150 N, cada entrada con tres funciones de pertenencia de tipo triangular y trapezoidal. El universo de discurso para la variable de salida (cambio en la velocidad de

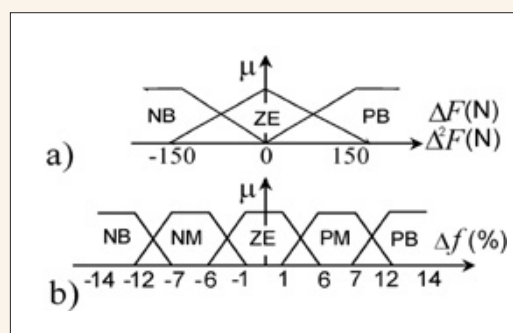


Figura 8. Funciones de pertenencia de las variables de entrada (a) y salida (b).

avance) se fijó entre $\pm 14\%$, con cinco funciones de pertenencia trapezoidales (Figura 8).

En la Figura 8, se muestran las funciones de pertenencia dentro del universo de discurso para las variables de entrada y salida. La base de reglas se muestra en la tabla 1. Como método de inferencia se utilizó el Sup-Product (Kauffman) y como estrategia de desemborronado el método del centro de área.

		ΔF			
$\Delta^2 F$		NB	ZE	PB	
	NB	NB	NM	ZE	
	ZE	NM	ZE	PM	
	PB	ZE	PM	PB	

Tabla 1. Base de reglas lingüísticas para la manipulación del valor incremental del avance (Δf).

5.4 IMPLEMENTACIÓN DE LOS LAZOS DE CONTROL.

El esquema para los controladores diseñados se implementó en MATLAB/SIMULINK/RTWT y se utilizó el mismo manipulador para la tarjeta ATMIO-16E-1 en la etapa de adquisición para la identificación. El sistema borroso y el lineal calculan el valor de la acción de control, que es la velocidad de avance (*Feed Override, FO*), necesario para mantener constante la fuerza de corte durante la operación del taladrado. Este valor se envía en tiempo real al proceso a través del NCDDE y el CNC, por medio de los servicios de DDE y el servidor NCDDE.

Para el diseño e implementación de esta aplicación se han tenido en cuenta algunos requisitos del sistema tales como la frecuencia de muestreo de las componentes ortogonales de la fuerza de corte a 1 kHz, 3 canales para la adquisición (modo diferencial), pre-procesamiento de los datos para el cálculo de la fuerza de corte por revolución (F_{RR}), la frecuencia de la acción de control a 14.5 Hz de acuerdo con la velocidad nominal de giro del cabezal (69 ms), y la configuración del canal de comunicaciones DDE para el CNC Sinumerik 840D.

Controlador	Parámetros	ITAE	ITSE	IAE	Ovt (%)
Solo CNC (sin control)	$f_0 = 100 \text{ mm/min}$ $n_0 = 870 \text{ rpm}$	62.60	10.93	23.93	14.28
Regulador PID	$P_{ZN} = 0.01086$ $I_{ZN} = 0.01483$ $D_{ZN} = 0.00219$	18.24	6.49	17.82	17.73
regulador borroso	$K_e = 0.0125$ $K_{ce} = 0.0374$	14.01	5.02	15.76	1.47

Tabla 2. Estudio comparativo entre las técnicas de control aplicadas.

5.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Los resultados obtenidos en algunos de los experimentos realizados se muestran en la figura 9, donde las curvas representan las respuestas de la fuerza de corte con control lineal, borroso y sin control (Figura 9a) y el comportamiento de la velocidad de avance con control (lineal PID y borroso) y sin control (Figura 9b), respectivamente.

Se puede observar que el sistema de control inteligente es capaz de mantener constante la fuerza de corte durante el proceso de taladrado. Para ello, se modifica la velocidad de avance de la broca mientras penetra en la pieza.

La tabla 2 muestra el estudio comparativo del sistema borroso con el controlador PID ajustado tal y como se mencionó anteriormente. Para ello se utiliza el criterio de error de la integral absoluta del error a través del tiempo (ITAE), la integral absoluta del error (IAE), la integral del cuadrado

del error por el tiempo (ITSE) y el máximo sobrepaso o sobreimpulso (Ovt).

Se pueden inferir las ventajas del control borroso con respecto al regulador PID, tan solo observando algunas diferencias en las respuestas a lazo cerrado obtenidas de los resultados experimentales tanto en la precisión como en la respuesta transitoria sin sobrepicos o sobrepasos. De esta ma-

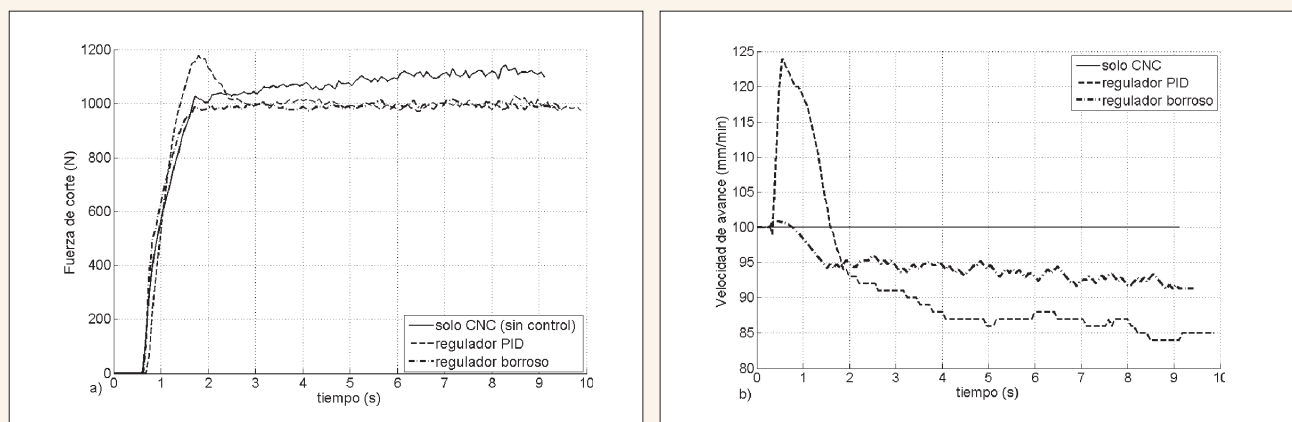


Figura 9. Comportamiento de la fuerza de corte (a) ante la acción de control (velocidad de avance) para los tres casos analizados: solo CNC, con regulador lineal PID y con regulador borroso.

nera, se consigue una excelente respuesta transitoria y un pequeño tiempo de establecimiento. Desde el punto de vista productivo no solo se aumenta la tasa de arranque de material sino también se minimizan las oscilaciones en la fuerza de corte que permite alargar la vida útil de la broca.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado los resultados del diseño e implementación de un sistema CACSD que permite la creación rápida de controladores inteligentes. En particular se muestra una aplicación para optimizar el funcionamiento de un centro de mecanizado de alto rendimiento equipado con un control numérico de arquitectura abierta. Se ha podido comprobar la viabilidad técnica a través de la implementación y validación de un sistema borroso para el control de la fuerza de corte en los procesos de taladrado de alto rendimiento. Además, se verificó las posibilidades y limitaciones de usar una herramienta comercial CACSD en una aplicación real, donde se han evaluado los desarrollos propios de manipuladores (software).

La prueba definitiva de la efectividad de esta técnica lo constituye la realización práctica y con éxito, tanto de la tarea de identificación experimental del proceso de taladrado, como del diseño e implementación de un sistema de control inteligente (borroso) de la fuerza de corte. Esta experiencia se hace particularmente valiosa teniendo en cuenta la actual tendencia a la generalización de este tipo de arquitectura de abierta en los procesos de fabricación.

Igualmente, las prestaciones del sistema de control implementado se han verificado por medio de cifras de mérito estándar y la comparación con un regulador PID, obteniéndose buenos resultados. Además, también se han eliminado las oscilaciones en la respuesta de la fuerza de corte. Esta respuesta transitoria permite alargar la vida útil de la broca y disminuir los sobre esfuerzos en la máquina herramienta.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto DPI2005-04298 COREMAV. Un especial agradecimiento a Fernando Martínez Puente por su apoyo imprescindible en la etapa experimental.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez J, Miguel M. "La innovación a través de un enfoque basado en procesos". *DYNA Ingeniería e Industria*. 2007, vol. 82, núm. 6, p. 301-305.

- Haber R, Haber-Haber R, Schmitt M, del Toro RM. "A classic solution for the control of a high-performance drilling process". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007, vol. 47, p. 2290-2297.

- Alique JR., Haber R. "Automatización de los procesos de mecanizado a alta velocidad: Estado del arte". *Automática e Instrumentación*. 2004, vol. 351, p. 64-78.

- Furness R.J., Tsao T.C., Rankin J.S., Muth M.J., and Manes K.W., "Torque control for a form tool drilling operation". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 1999, vol. 7, p. 22-30.

- Casanova, Salt, Macarós, Cuenca. "Efectos del Enlace de Comunicación en un Sistema de Control basado en Red utilizando Profibus-DP". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2006, vol. 3, núm. 1, p. 82-93.

- Bucher y Balemi, 2003. "Rapid Controller Prototyping with MATLAB/SIMULINK and LINUX". *Control Engineering Practice*. 2006, vol. 14, núm. 2, p. 185-192.

- Bucher y Dozio, 2003. Bucher, Dozio. "CACSD under RTAI linux with RTAI-lab". Realtime Linux Workshop. Valencia 2003.

- Quanta, Mantegazza. "Using MATLAB/SIMULINK RTW to build real-time control applications in user space with rtai-lxr". Real time Linux Workshop. Milano 2001.

- MATHWORKS. "Real-Time Windows Target for use with RTW - User's Guide". Version 2. Edition, 2006.

- MATHWORKS. "Real-Time Workshop for use with Simulink - User's Guide". Version 6. Edition, 2005.

- SIEMENS. "Motion Control Information System - RPC Sinumerik Computer Link". Function Manual for Sinumerik 840D. Edition, October 2005. Appendix A2.

- SANDVIK. "CoroDrill Delta-C - Solid carbide drills R840". Main Catalog. Section E. Edition, 2006.

- Haber Guerra RE, Martin D, Haber-Haber R, "Networked Fuzzy Control System for a High-Performance Drilling Process". *Transactions of ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2008, vol. 130, núm 3, p. 031009.

- Diego-Mas JE, Asensio S, Alcaide J. "Aplicación de redes neuronales a la modelización de las preferencias del usuario de productos de consumo", *DYNA Ingeniería e Industria* 2008, vol. 83, núm 3, p.148-156.

- Lee KC, Lee S, Lee MH. "Remote fuzzy logic control of networked control system via Profibus-DP," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, vol. 50, p. 784-792. ■