

Tendencia actual y desarrollos futuros de nuevos controles basados en la lógica borrosa y su aplicación al mecanizado a alta velocidad^(*)

R.E. Haber^{***}, A. Alique^{*}, J.R. Alique^{*}, R. Haber-Haber^{**} y S. Ros^{*}

Resumen

El mecanizado a alta velocidad (MAV) exige nuevos conceptos y estrategias de diseño mecánico de los elementos de las máquinas herramienta, así como el rediseño de todos los aspectos relacionados con los sistemas de control, desde los accionamientos hasta el CNC (integración de sensores, procesamiento y filtrado de señales, algoritmos de control de posición, velocidad y trayectoria), con vistas a obtener prestaciones superiores. En este trabajo se ofrece un estado del arte, con algunos de los hitos más importantes en el área del control aplicado al proceso de mecanizado a alta velocidad. Así, se intentan resumir algunas de las prestaciones más importantes de los nuevos sistemas de control y proponer hacia donde se deben dirigir los esfuerzos principales en los años venideros. Se hace énfasis en los accionamientos lineales y en sus características, que lo convierten en ideal para el MAV. De igual modo, y como aspecto novedoso, se proponen algunos esquemas de control borroso que han tenido éxito en la regulación de procesos no lineales y complejos y que pueden encontrar aplicación en los nuevos servosistemas, estrategias de compensación térmica, sistemas de regulación del fluido de corte y sistemas para optimizar la tasa de arranque de virutas, sólo por citar algunos ejemplos. De esta manera, no sólo es posible aumentar la productividad sino también mejorar el funcionamiento de la máquina herramienta en su conjunto. Por otra parte, se hacen una serie de propuestas de campos abiertos para desarrollos futuros, partiendo del estudio de los logros alcanzados por algunos fabricantes en el diseño de máquinas-herramienta y CNC. Finalmente, se destacan las características de los controladores jerárquicos y algunas de las prestaciones que se pueden alcanzar sin necesidad de grandes modificaciones tecnológicas en la máquina herramienta y considerando un mercado cada vez más dominado por los CNC abiertos.

Palabras clave

Proceso de mecanizado a alta velocidad. Lógica borrosa. Control de procesos.

Current trends and future developments of new control systems based on fuzzy logic and their application to high speed machining

Abstract

Necessarily whenever a high speed machining (HSM) is addressed, new concepts and design of the machine tool elements are imposed. Moreover, all components related with the control systems from the actuators up to the CNC (integration of sensors, pre-processing and filtering of signals, new algorithms for position, speed and trajectory controls) must be redrawn. Moreover, the authors offer the state of the art with some of the most important milestones in the field of control systems applied to a high speed machining process. Some of the most important benefits provided by the new control systems, towards which the main research efforts in the next years should be conducted, are summarized. Emphasis is made in the lineal actuators and in their features, ideal for the HSM. Moreover, as an approach of this work, some of the most important control schemes based on the Fuzzy Logic, which have been successfully tested for regulating nonlinear and complex processes, are proposed. Current needs and design requirements of the machine tools can be fulfilled applying the suggested schemes such as new servosystems, strategies for thermal compensation, cutting fluids supply controls, metal removal rate optimization,

(*) Trabajo recibido el día 27 de abril de 2001 y aceptado en su forma final el día 15 de enero de 2002.

(*) Instituto de Automática Industrial (CSIC), km. 22800 N-III, La Poveda, 28500, Madrid, SPAIN

(**) Universidad de Oriente, 90400, CUBA.

(***) Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, Universidad Autónoma de Madrid, Ciudad Universitaria de Cantoblanco, Ctra. de Colmenar Viejo km 15. 28049-Madrid, España. rhaber@iai.csic.es.

etc. By means of these control schemes the overall machine tool performance can be improved and the productivity can be increased. Moreover, a set of proposals of open fields for future developments is made, starting from the study of the achievements reached by some manufacturers of machine tools and CNC. Finally, the characteristics of the hierarchical controllers are remarked as well as some of the benefits that can be achieved without being necessary large modifications in the machine tool, and considering the generalized introduction of open CNC.

Keywords High speed machining proceses. Fuzzy logic. Process control.

1. INTRODUCCIÓN

El mecanizado a alta velocidad (MAV) es una de las tecnologías claves para el desarrollo de importantes sectores productivos tales como los de automoción, moldes y matrices, aeronáutico, máquina-herramienta, bienes de equipo y componentes mecánicos. A nivel mundial, sólo unos pocos países disfrutan del conocimiento pleno de la tecnología del MAV. Por tanto, se hace necesario dar a conocer todas aquellas tecnologías y estrategias que pueden ser útiles a investigadores y fabricantes, con vistas a su aplicación generalizada en nuevas máquinas herramienta.

Las características que identifican al MAV son las relativas a su velocidad de corte, superior en unas tres veces a la que se utiliza actualmente en el mecanizado, y a su velocidad de avance de trabajo, en unas diez veces. Estas velocidades pueden superar ampliamente los 1.000 m/min en los aceros y los 6.000 m/min en las aleaciones ligeras.

Los centros de mecanizado de alta velocidad son considerados como una parte más dentro de todo el conjunto de etapas que forman el proceso de fabricación y, al mismo tiempo, constituyen una tecnología de alta productividad bien diferenciada del resto. Detrás de cada pieza mecanizada está un armazón de tecnologías concatenadas que han evolucionado en unos pocos años más allá incluso de lo que pudiera considerarse como un estado del arte.

El logro de un mecanizado a alta velocidad (MAV) exige un conjunto de conceptos y estrategias avanzadas de diseño mecánico de los elementos de máquina, así como el rediseño de todos los aspectos relacionados con los sistemas de control de posición y de velocidad con vistas a obtener prestaciones superiores. Como tecnología, el MAV es ideal para el mecanizado de aleaciones de aluminio, clave en la industria automovilística y ae-

roespacial^[1]. Asimismo, constituye la solución perfecta en las labores de acabado a alta velocidad y en el pulido de moldes y troqueles de acero. El cobre y el bronce son otros materiales que también pueden ser mecanizados a alta velocidad.

Desde el punto de vista técnico, una de las tareas más difíciles es la de lograr satisfacer los requisitos de diseño de la máquina-herramienta en su conjunto (elementos mecánicos, accionamientos y algoritmos de control de posición y velocidad) con el objetivo de alcanzar un mecanizado altamente productivo.

El objetivo de este trabajo es exponer la tendencia actual y los desarrollos futuros en el campo del diseño e implementación de nuevos dispositivos de control y su aplicación en los centros de mecanizado de alta velocidad. De igual modo, se pretende mostrar las enormes posibilidades que ofrecen los esquemas de control borroso con vistas a su aplicación en el MAV. En la sección 1 se describen las características y los requisitos de los nuevos controles para el MAV y se incluyen comentarios acerca de las prestaciones que ofrecen algunos productos comerciales. Se hace especial énfasis en los requisitos que deben cumplir los nuevos controladores y en algunas líneas estratégicas de investigación, desarrollo e innovación para los próximos años. En la sección 2 se analiza el papel de los motores lineales en el MAV y se plantean algunos problemas que deben quedar resueltos antes de una aplicación generalizada de estos dispositivos. En la sección 3 se hacen algunas propuestas de esquemas de control borroso que pueden contribuir a satisfacer algunos de los nuevos requisitos del MAV. Se destaca la importancia de los esquemas de control borroso jerárquico y cómo éstos, habiendo demostrado su validez en la optimización del mecanizado convencional, constituyen un camino a tener en cuenta, considerando los desafíos más actuales del MAV.

2. CONTROLADORES

La tecnología de los husillos ha probado, históricamente, tener menos limitaciones en el mecanizado a alta velocidad que el resto de tecnologías relacionadas con el control del movimiento y/o la trayectoria, lo cual es válido, al menos, en aquellos casos en que se requieren elevadas velocidades y gran precisión.

Cabe señalar que, los fabricantes de controles numéricos computarizados (CNC) se han movido a una extraordinaria velocidad, en estos años, debido, fundamentalmente, a la disponibilidad de potentes microprocesadores, sofisticado *software* y otras tecnologías digitales^[2 y 3]. En la actualidad, los CNC pueden procesar un programa pieza muy rápido. Muchos fabricantes incluyen en sus controles bloques de procesamiento de altas prestaciones con tiempos inferiores a un ms. Ciertamente, se consiguen velocidades muy altas en comparación con los 70 ms que se pueden alcanzar con los CNC clásicos. Estas especificaciones de tiempo de procesamiento no se pueden ver aisladas sino asociadas con el tiempo necesario para procesar, iniciar y finalizar el movimiento. Ese, es el verdadero tiempo de ejecución que define la rapidez y precisión con que se puede mecanizar.

La precisión guarda una estrecha relación con la tolerancia usada para generar una trayectoria de contorneado punto a punto, ejecutada con una interpolación lineal. A medida que el programa es más preciso, son necesarios más puntos para describir la trayectoria de la herramienta y es menor la distancia entre los puntos. Un espaciado muy sencillo produce un fenómeno conocido como *data starvation*, debido a que el CNC no puede seguir procesando el programa lo suficientemente rápido para actualizar la velocidad de avance. En el futuro se deberá continuar trabajando en nuevas soluciones con vistas a mejorar estos algoritmos. No obstante, algunos fabricantes (p.e., MITSUBISHI) afirman alcanzar tiempos de ejecución y procesamiento de 0,89 ms, a 17.000 mm/min, entre puntos espaciados, sólo, 0,26 mm.

Otras cuestiones importantes son las relacionadas con el control de trayectoria y constituyen todo un reto, en la actualidad. El diseño de nuevos algoritmos, con vistas a obtener una adecuada combinación de precisión y velocidad, debe constituir una línea de investigación a corto plazo. Algunos fabricantes (p.e. FANUC) afirman que, con el *hardware* completamente digital de los CNC, es posible obtener unas velocidades en el contorneado desde 38.000 hasta 76.000 mm/min, con una

precisión de 3 a 5 μ , lo cual requiere el estado del arte tecnológico en los servosistemas (controles de velocidad).

Es importante señalar que, muchos de los CNC disponibles comercialmente disponen de algoritmos capaces de buscar en el programa pieza posibles cambios abruptos en la dirección de la trayectoria que debe seguir la herramienta (función *look-ahead*). Cuando el CNC se percata, los procedimientos de aceleración/desaceleración (ace./des.) se activan automáticamente, de forma que no se produce sobrepaso en la trayectoria proyectada o se socaven las esquinas exteriores debido a los errores del control de posición y velocidad.

En los próximos años, los fabricantes de máquinas y controles deberán continuar trabajando en el desarrollo de nuevo *software*, capaz de optimizar el funcionamiento de los lazos de control de velocidad y posición. Comercialmente, se observan algunos intentos de desarrollo de tarjetas codificadoras de 64 bits equipadas con cierta "inteligencia", las cuales, en nexo directo con el CNC, permiten analizar la pieza a medida que se mecaniza. De cualquier modo, el objetivo fundamental es que el operador del CNC utilice la máxima velocidad de corte permitida y el sistema de control sea capaz de ajustar, dinámicamente, la velocidad de avance y acelerar/desacelerar a partir de la inercia característica de cada máquina y el nivel de precisión necesario en cada tarea. La ejecución efectiva de esta labor requiere un servosistema altamente sensible y firmemente integrado con el bloque procesador de la trayectoria de la herramienta.

Independientemente de los progresos alcanzados con los CNC abiertos, se deberán implementar algoritmos para el ajuste de los parámetros de los controladores y la autosintonía de los servosistemas. Algunos fabricantes afirman que, una sintonía adecuada de los controladores permitirá, en el MAV, una disminución en tiempo de mecanizado entre un 60 % y un 80 % y una reducción en el coste final entre un 40 % y un 60 %.

En los próximos años, deberán continuar las labores de integración de los ordenadores personales con los CNC abiertos, lo cual significa necesariamente estadios cualitativamente superiores en el grado de flexibilidad. Las nuevas arquitecturas deben ser más fiables, de forma que pueda operar la máquina en su conjunto y que toda la arquitectura abierta permita la gestión global, en tiempo real, de todo el flujo de información relacionado con el funcionamiento de la máquina. Esto evitará la inestabilidad inherente de la unión con los

ordenadores personales o del nexo con el sistema operativo de éstos. Esta inestabilidad, en la actualidad, ha sido especialmente problemática con el sistema operativo *Windows*.

Por otra parte, hay que dirigir los esfuerzos hacia el diseño de complejas arquitecturas de control distribuido. Es decir, además de microprocesadores de alta velocidad en los CNC, capaces de compartir tareas de control en tiempo real, se deberá trabajar en el desarrollo de actuadores de motor digitales e "inteligentes" para cada eje. Debido a la alta velocidad, la realimentación va conectada, directamente, al accionamiento en lugar de ir al CNC, aunque el CNC debe monitorizar todo el sistema en su conjunto.

Un sistema completamente digital, como algunos de los que ya están disponibles comercialmente, constituye una excelente plataforma para alcanzar una mejora en los controles. Algunos sistemas incorporan comandos que conmutan a modos de control "de alta precisión", para aumentar la precisión y reducir el tiempo de ciclo. Se trata de calcular, en tiempo real, a partir de las velocidades de avance, nuevas ace./des. Por otra parte, nuevas estrategias de filtrado y control inteligente, basadas en algoritmos adaptativos y en la lógica borrosa, pueden utilizarse para suprimir las vibraciones del sistema, dentro de una gama de frecuencias determinada.

3. INTEGRACIÓN DE LOS DIFERENTES ELEMENTOS. MOTOR LINEAL VS. MOTOR CONVENCIONAL

Los motores lineales hablan el lenguaje de las máquinas-herramienta. Éstos, convierten, directamente, la fuerza electromagnética en un movimiento lineal, eliminando, en las máquinas con ejes lineales, la necesidad de husillos que actúen como convertidor del movimiento de rotación en lineal. El motor lineal está libre de fenómenos tales como la zona muerta, los movimientos no deseados y la facilidad de ceder ante cargas fuertes. Una rigidez superior permite a los motores lineales ofrecer una combinación de precisión y ace./des. que los convierte en ideales para el MAV.

En este contexto, las máquinas-herramienta equipadas con motores lineales continuarán aportando beneficios tales como una mejora en la eficiencia, ya que existe la posibilidad de un mejor aprovechamiento de la potencia perfeccionando los sistemas de enfriamiento. Cabe señalar que los nuevos paquetes de *software* ofrecen a los diseñadores la posibilidad de optimizar la resonancia y

mejorar la rigidez. Además, la disponibilidad de los motores lineales encapsulados permite su fácil instalación durante el ensamblado de la máquina.

En la actualidad, sólo unos pocos fabricantes de máquinas-herramienta han introducido los motores lineales entre los cuales podemos citar Ingersoll, Ex-Cell-O, Kingsbury, Hitachi Seiki, Fanuc y Mitsubishi. Esta dirección de trabajo está recibiendo la atención del mundo empresarial, en estrecho vínculo con el marco académico, enfocando las tareas hacia la integración de motores lineales y sistemas de control. Por citar, sólo, algunos ejemplos (p.e. INDRAMAT, FANUC), con los motores lineales se puede alcanzar una precisión del orden de una micra con velocidades de 76.000 mm/min. y aceleraciones de 1,5 G. Estas cifras no guardan ninguna proporción con las alcanzadas en las máquinas convencionales^[4 y 5].

Una línea de investigación prioritaria, es el desarrollo de controladores robustos de altas prestaciones para los motores lineales. El objetivo de estos sistemas de control, debe estar centrado en la optimización del tiempo de recorrido y en la supresión de las vibraciones de la estructura flexible montada en el motor lineal. Asimismo, a través del diseño se debe garantizar una adecuada respuesta transitoria del motor lineal, incluso durante variaciones en la inercia debido al peso de la pieza a mecanizar. En general, un controlador que pueda proporcionar una rigidez alta en el servosistema nos conducirá hacia el éxito en la utilización de los motores lineales para el MAV.

A pesar de todas las ventajas mencionadas, los motores lineales están lejos, todavía, de sustituir todos los dispositivos actuales. Por ese motivo, el perfeccionamiento de los accionamientos clásicos está recibiendo la atención de la comunidad científica con vistas a alcanzar altas velocidades en los ejes. Algunas empresas son pioneras en este sentido (p.e., MAZAK). No obstante, aquí hay aspectos muy importantes a considerar, fundamentalmente, los térmicos provocados por la fricción. De ahí, que los nuevos diseños traten de perfeccionar los sistemas de enfriamiento y de control de temperatura, sobre la base de nuevos fluidos refrigerantes y de sensores térmicos instalados en lugares estratégicos de la máquina.

4. ALGUNAS PROPUESTAS DE ESQUEMAS DE CONTROL BASADOS EN LA LÓGICA BORROSA

El desarrollo de los esquemas de control debe estar en correspondencia con los nuevos requisitos de

funcionamiento que impone el MAV. Los esquemas de control para el MAV deberían ser, básicamente, fijos, debido a los problemas de estabilidad, aunque incorporen mecanismos de aprendizaje y autosintonía. Se trata de continuar los trabajos de las últimas décadas, pero teniendo en cuenta los nuevos requisitos y la demanda de los usuarios finales de la máquina-herramienta. Así, por ejemplo, los controladores deben garantizar un esfuerzo de corte constante, pero con tiempos de cómputo en las acciones de control (p.e., modificación en las velocidades de avance y giro) inferiores a 1 ms, de modo que puedan ser realmente aplicados al MAV.

A continuación, se exponen algunas propuestas de esquemas de regulación basados en la lógica borrosa, cuya aplicación en el MAV puede abarcar desde los controles de posición y velocidad hasta las más recientes estrategias para la compensación térmica y la regulación del consumo de fluido de corte. Haciendo una búsqueda intensiva en la literatura, incluyendo las publicaciones de los productos comerciales, es posible comprobar la existencia de una gran variedad de sistemas inteligentes de control que disponen de un controlador lógico borroso (CLB) como una parte fundamental^[6]. Para agrupar estas propuestas de nuevas estrategias de control y la posibilidad de su aplicación en el MAV, se muestran algunos esquemas típicos que han sido aplicados con éxito en procesos no lineales, incluido el mecanizado convencional.

4.1. CLB para la selección del valor prescrito (tipo 1)

La figura 1 muestra el esquema de un sistema de control borroso, cuyo propósito es seleccionar, de un conjunto de valores, el valor prescrito adecuado o escoger, en general, de un conjunto de parámetros, un valor específico de entrada. Se puede utilizar en los nuevos lazos de control de la corriente consumida por los accionamientos de avance. De este modo, los valores deseados de corriente consumida son el resultado de una inferencia borrosa. Este sistema se considera como inteligente, en el sentido que no requiere de un operador humano y su implementación se puede hacer completamente por *hardware*. Existen algunos ejemplos de aplicación en otros procesos, en los que también se requieren altas velocidades de respuesta^[7].

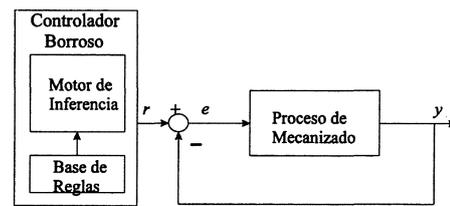


Figura 1. CLB para la selección del valor prescrito.

Figure 1. FLC for selecting the set point.

4.2. CLB por realimentación de error

En la figura 2 se muestra la configuración que mayor éxito puede tener en MAV. El objetivo fundamental de esta arquitectura es generar una señal de control a partir de la señal de error. En la literatura^[8] se pueden encontrar muchos ejemplos pertenecientes a esta clasificación. La aplicación, en los lazos de control de posición y de velocidad, puede constituir un camino efectivo para compensar las no linealidades de los accionamientos clásicos y conseguir altas velocidades de respuesta.

4.3. CLB para la elección del mejor compensador

Este esquema es una generalización de la configuración anteriormente mencionada, donde el resultado de la toma de decisión del CLB se aplica a un compensador o a un subsistema, tal y como muestra la figura 3. Esta arquitectura ha sido muy popular en los algoritmos adaptativos y con aprendizaje^[9 y 10]. En la actualidad, su realización práctica es posible debido a los progresos alcanzados en el *hardware* dedicado, exclusivamente, a implementar algoritmos basados en la lógica borrosa. Este, es un caso viable que debe explorarse en el futuro y una solución para compensar las variaciones en cuanto a material, tipo de herramienta y operación en el MAV, datos que están accesibles en el CNC abierto.

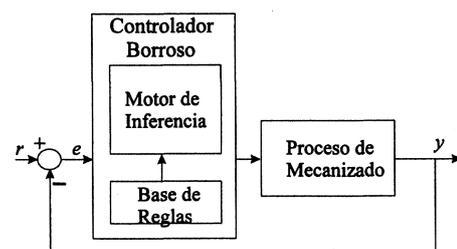


Figura 2. CLB por realimentación de error.

Figure 2. FLC for feedback control.

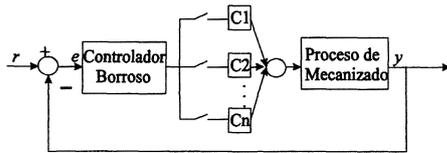


Figura 3. CLB para la elección del mejor compensador.

Figure 3. FLC for selecting the best compensator.

En la figura 4, se ilustra una de las variantes más actuales de este tipo de sistema. Se aprovecha la robustez del CLB y se utiliza un sistema de control con múltiples bases de reglas. De esta forma, quedan definidos varios reguladores borrosos en paralelo, cada uno de los cuales garantiza la estabilidad a lazo cerrado en una región de operación definida de antemano. Como criterios para seleccionar la base de reglas se pueden utilizar los cambios en los parámetros del proceso tales como la “maquinabilidad” del material y el grado de desgaste de la herramienta. Este esquema se ha aplicado con éxito en el control híbrido de fuerza/posición^[11].

4.4. Control borroso derivado de múltiples índices de comportamiento

La Teoría de Control, clásica y moderna, ha servido de base para el diseño, con éxito, de funciones de control basadas en cifras de mérito. El esquema de control mostrado en la figura 5 es bastante robusto ya que proporciona un modelo matemático aproximado que, por otra parte, no está disponible o existen dificultades para su obtención de forma analítica. Además, se pueden manipular los diferentes índices de comportamiento de una manera adaptativa.

Esta arquitectura se ha aplicado con resultados destacados en el sistema de operación automática

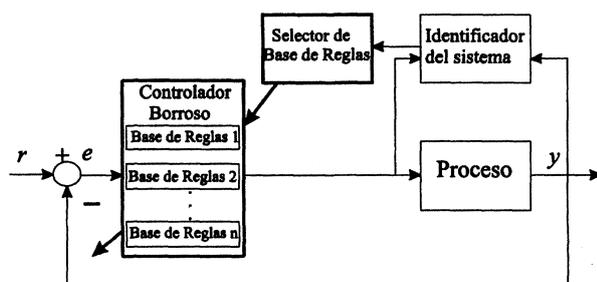


Figura 4. CLB para la elección de la mejor base de reglas.

Figure 4. FLC for selecting the best rule base.

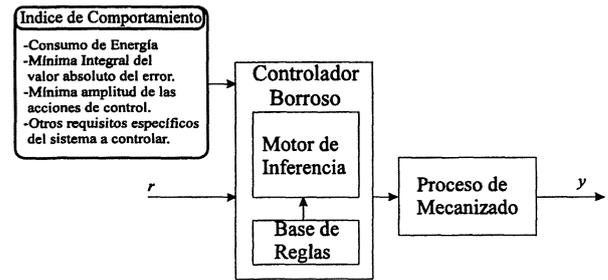


Figura 5. Control borroso basado en múltiples índices de comportamiento.

Figure 5. Fuzzy controller based on different performance indices.

del metro de Sendai (Hitachi)^[12]. El control del sistema electromecánico utiliza los resultados de la optimización simultánea de varios índices de comportamiento.

Los antecedentes de este tipo de esquema y su aplicación en el proceso de mecanizado, pueden encontrarse en el control adaptativo geométrico y el control adaptativo con restricciones^[13]. Algunos de estos esquemas clasifican como control adaptativo, basado en cifras de mérito, en el que los parámetros del CLB son optimizados a partir de un criterio representado por un conjunto de cifras de mérito. Para el proceso de optimización, se pueden emplear cifras de mérito, tales como el error medio cuadrático (\bar{e}^2), el error promedio \bar{e} , el promedio de los valores absolutos del error $|\bar{e}|$, el valor máximo del error absoluto $|e|_{\text{máx}}$ y el número total de variaciones consecutivas de la acción de control (p.e., la velocidad de avance). Un grupo de estas cifras se puede utilizar para juzgar la precisión del control (lo prioritario) y, las restantes, para la optimización del número de acciones de control.

4.5. Reglas borrosas lingüísticas como modelo matemático de sistemas dinámicos complejos

En la figura 6 puede observarse un esquema que permite llevar a cabo la optimización de aquellos sistemas dinámicos complejos, para los cuales es difícil obtener un modelo matemático o una solución matemática con un modelo conocido. La planta de purificación de agua en Sagami-hara (Japón), utiliza un modelo basado en reglas borrosas que incorpora un total de 47 reglas para controlar el proceso de cloración del agua^[14].

Esta estrategia también se puede utilizar en el MAV, ya que existen resultados positivos

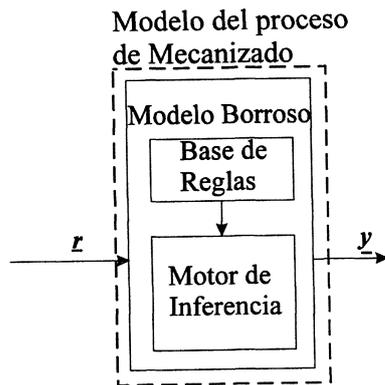


Figura 6. Esquema de modelado basado en reglas borrosas.

Figure 6. Scheme for modelling on the basis of fuzzy rules.

en la supervisión de procesos de mecanizado convencionales, a través de la utilización de la técnica conocida como del agrupamiento o aglomerado borroso^[15].

En la siguiente ecuación, se muestra la forma general de este modelo borroso (MB), cuya salida es la predicción del esfuerzo de corte producido por la herramienta $\hat{F}(k+1)$ y, como entradas, utiliza el esfuerzo de corte medido (F), las velocidades de avance (f), giro (s), la profundidad de corte axial (a) y algunos estados anteriores de estas variables.

$$\hat{F}(k+1) = MB[F(k) F(k-1) a(k) s(k) f(k) f(k-1)] \quad (1)$$

$$y = \hat{F}(k+1); \quad r = [F(k-n), a, s, f]$$

4.6. Controlador borroso jerárquico

La introducción de niveles de supervisión y coordinación tiene por objetivo monitorizar el regulador y realizar acciones si se detectan errores en el funcionamiento. Este, es un aspecto especialmente crítico en el MAV ya que, debido a su propia esencia, se reduce la participación del operador en la supervisión del estado y variables del proceso.

En la literatura relacionada con la supervisión de procesos se sugiere la introducción de dos niveles jerárquicos en los sistemas de control: uno de supervisión y otro de coordinación, de modo que se pueda monitorizar el comportamiento del controlador y efectuar acciones precisas si se detectan problemas en el funcionamiento^[16].

Las tareas básicas que se pueden ejecutar en el nivel de supervisión son:

- Monitorización de los parámetros estimados del controlador (control adaptativo).
- Detección del grado de emparejamiento modelo-proceso (control adaptativo).
- Toma de decisiones: ¿Qué ha cambiado?
- Analizar el diseño del controlador.
- Monitorizar el comportamiento a lazo cerrado.

Por otra parte, el nivel de coordinación podría tener las siguientes funciones:

- Puesta en marcha.
- Conmutar la estimación de parámetros.
- Elegir el algoritmo de control más adecuado.
- Tomar decisiones: ¿Qué conjunto de parámetros del controlador será usado?

Por consiguiente, la supervisión debe tener en cuenta los cambios en el comportamiento del proceso. Estos cambios tienen su origen en las variaciones de los parámetros estáticos del proceso (ganancias) o de los parámetros dinámicos del proceso (constantes de tiempo). De modo que los primeros se detectan a estado de régimen y los segundos en la respuesta transitoria.

En el campo del control borroso se han investigado, con profundidad, la jerarquía y la supervisión como vías de posible solución a problemas complejos. En la figura 7 se muestra un esquema viable de un lazo de control de un proceso no lineal con realimentación de estados (posición x_1 y velocidad x_2), cuyo parámetro (la ganancia K), es objeto de ajuste automático en función de la acción de control u , según $\phi(u)$, que es una función resultante de una tabla calculada con un algoritmo de control borroso. Las reglas relacionan valores lingüísticos de u con los de K , de modo que éstos

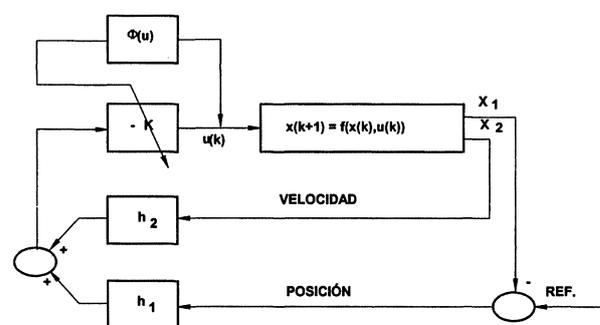


Figura 7. Auto-ajuste borroso de la ganancia de un control con realimentación de estados.

Figure 7. Fuzzy self-tuning of the controller's gain with state feedback.

coadyuven a que el transitorio del vector de estado se corresponda con uno prescrito (adaptación con modelo), aunque, en realidad, la comparación no es directa sino inferida de los valores de u al formar las reglas.

Los estudios relacionados con la jerarquía han continuado en esta década. Así, se han definido unas estructuras jerárquicas para la representación del conocimiento denominadas "estructuras jerárquicas prioritarias" (HPS)^[17]. Las reglas son vistas como particiones del espacio de entrada, distinguiéndose su grado de activación por su calificación en cuanto a certeza y posibilidad. En este tipo de representación, las reglas más generales se almacenan en el nivel más bajo de prioridad, mientras que las excepciones de estas reglas se guardan en niveles más altos de prioridad. La representación de las HPS es una formulación con una estructura muy semejante al mecanismo de aprendizaje del ser humano. Sin embargo, su implementación en algoritmos de control para el MAV es bastante compleja.

Otros informes, cuyos esquemas son susceptibles de ser aplicados al MAV, proponen una metodología para el diseño de un sistema de control borroso jerárquico adaptativo^[18]. En ese trabajo, con el objetivo de efectuar la adaptación, se sugieren diversos índices de comportamiento y evaluación, que son tratados como variables lingüísticas borrosas. A partir de esas variables, se diseña un sistema de control supervisor y se modifican los parámetros del controlador borroso jerárquico para compensar las variaciones en el proceso controlado.

Estas ideas acerca del control borroso jerárquico han continuado su evolución. Otros autores proponen un sistema de control borroso supervisor que se puede aplicar a los sistemas no lineales cuyos parámetros varían en el tiempo^[19]. El sistema puede estar formado por dos niveles jerárquicos. En el primero, se realiza el ajuste de la ganancia del modelo de referencia y de los parámetros del regulador clásico PI y, en el segundo, se modifican las funciones de pertenencia de las variables de entrada al primer nivel.

Más allá de propuestas teóricas, el CLB jerárquico ha tenido éxito en el ámbito industrial y doméstico. En la figura 8 se puede observar otro esquema perteneciente a esta clasificación^[7].

A partir de las bondades de esta arquitectura, se pueden implementar otras variantes, como el esquema de control borroso jerárquico basado en uno o más niveles, mostrado en la figura 9. Básicamente, se trata de seleccionar una variable contro-

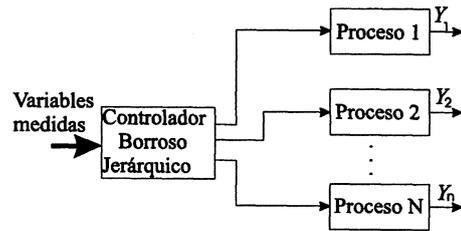


Figura 8. Esquema de un controlador borroso jerárquico para varios procesos.

Figure 8. Scheme of a hierarchical fuzzy controller for various processes.

lada representativa del proceso en cuestión (y). El control jerárquico de ésta se lleva a cabo modificando los valores prescritos suministrados por el operador (u'). De este modo, se optimiza el proceso.

La metodología de diseño y la aplicación del esquema mostrado en la figura 9 a un proceso de mecanizado convencional, aparece detallado en recientes estudios^[20 y 21]. En la figura 10 se muestra el resultado de aplicar dos algoritmos de control, uno lineal (PI) y otro borroso, a la regulación del esfuerzo de corte, considerando una operación de desbaste en un mecanizado convencional. Sin entrar en detalles técnicos del diseño y los sofisticados criterios de evaluación de ambos lazos de control, se puede observar, con claridad, como el sistema de control jerárquico lineal es completamente inestable mientras que en el sistema de control jerárquico borroso se alcanza una adecuada estabilidad en la regulación del esfuerzo de corte.

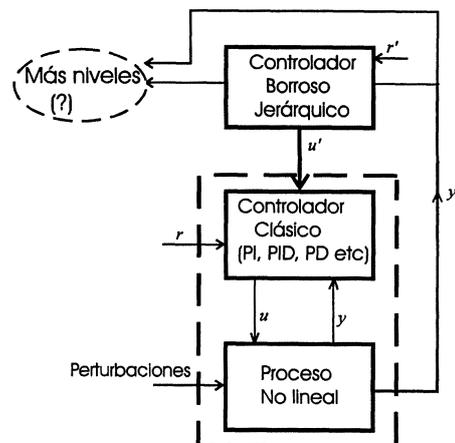
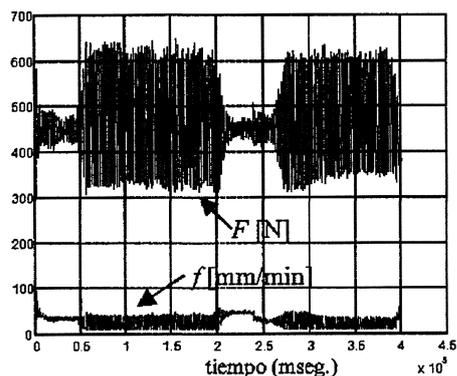
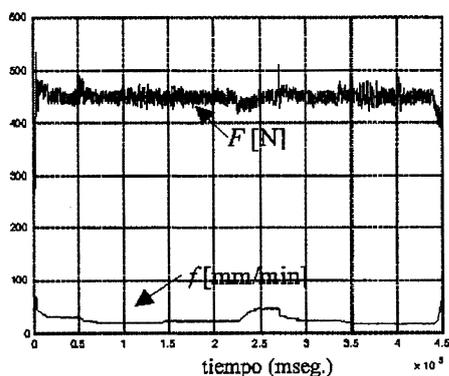


Figura 9. Esquema de control borroso jerárquico para procesos no lineales.

Figure 9. Scheme of a hierarchical fuzzy control system for nonlinear processes.



a)



b)

Figura 10. Comportamiento del esfuerzo de corte utilizando: a) controlador jerárquico lineal b) controlador jerárquico borroso.

Figure 10. Behavior of the cutting force regulated by: a) a hierarchical linear controller; b) a hierarchical fuzzy controller.

El funcionamiento de ambos sistemas se refleja en el acabado superficial de la superficie mecanizada, tal y como se muestra en la figura 11. Se observa, con claridad, la aparición de marcas en la superficie de la pieza, que ha sido mecanizada aplicando el controlador jerárquico lineal (Figura 11b), mientras que esas marcas no existen o son, prácticamente, imperceptibles con el sistema de control jerárquico borroso (Fig. 11c). La viabilidad del control jerárquico y de los algoritmos basados en la lógica borrosa, con vistas a la optimización y supervisión del proceso de corte en operaciones de mecanizado convencionales, se ha demostrado con resultados positivos^[23]. Falta por examinar su utilidad en el MAV, lo cual constituye una dirección prioritaria de investigación, desarrollo e innovación para los años venideros.

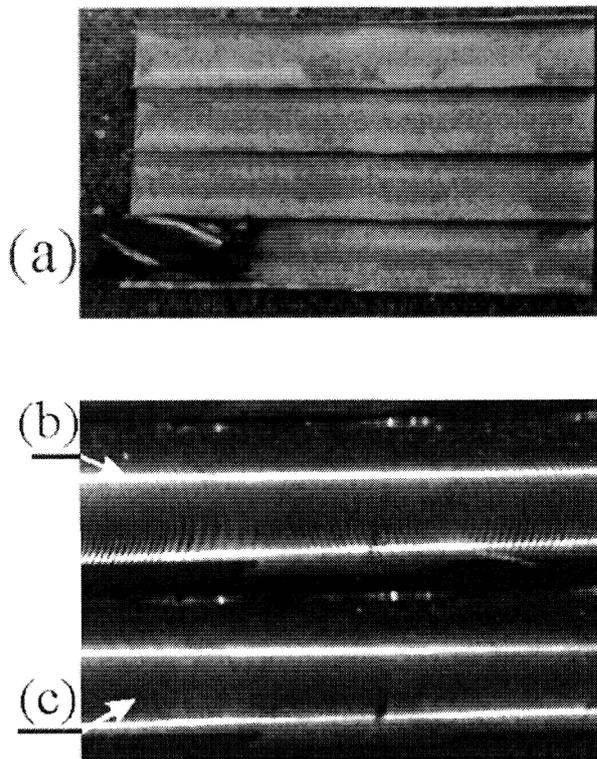


Figura 11. a) Pieza mecanizada (desbaste) y herramienta de corte; b) Detalle de acabado superficial de la pieza mecanizada; c) Controlador jerárquico lineal borroso.

Figure 11. a) Workpiece and cutting tool; b) Finished surface after roughing operation using a; c) hierarchical fuzzy controller.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha expuesto la tendencia actual, así como propuestas de desarrollos futuros, de nuevos sistemas de control y su aplicación al mecanizado a alta velocidad. A través del MAV, es posible aumentar la productividad y mejorar el acabado de las piezas producidas. No obstante, eso sólo es posible si están disponibles CNC capaces de ofrecer tiempos de procesamiento muy pequeños y nuevos algoritmos de control, basados en técnicas de inteligencia artificial, aplicados a la regulación de la velocidad, la posición y la trayectoria con prestaciones superiores.

Asimismo, en este trabajo se ofrece un estado del arte, se comentan algunos de los progresos más recientes en el control aplicado al MAV y se recogen las características más relevantes de los CNC y las estrategias de control más actuales. De igual modo, se proponen algunos de los esquemas de control basados en la lógica borrosa, que han tenido éxito en procesos complejos, incluido el

mecanizado convencional. Dadas las amplias posibilidades de la lógica borrosa, los esquemas sugeridos se pueden utilizar en los servosistemas, sistemas de enfriamiento, compensadores térmicos, sistemas para la optimización del arranque de viruta, por citar, sólo, algunas aplicaciones. De los esquemas propuestos, se profundiza en el control jerárquico borroso, uno de los que mayor repercusión ha tenido en las labores de optimización del proceso de mecanizado convencional, cuyas posibilidades se amplían con el desarrollo incesante de los CNC abiertos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado dentro del proyecto CICYT TAP1999-1122-C02-01 "Máquina Herramienta: Supervisión y Control Inteligente (MHECOS)". Además, se ha nutrido de los resultados de la acción especial "Análisis de la necesidad de investigación, desarrollo y aplicación de la tecnología de Mecanizado a Alta Velocidad (MAV) en España", encargado por la Oficina de Ciencia y Tecnología de la Presidencia del Gobierno, con la participación de TEKNIKER, Instituto de Automática Industrial (CSIC), FATRONIK, Construcciones Aeronáuticas (CASA S.A.) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

REFERENCIAS

- [1] J.D. KIM y Y.H. KANG, *Int. J. Machine Tools Manuf.* 37 (1997) 1.155-1.165.
- [2] Sinumerik 840D/FM-Nc., Siemens AG, (1996) 36-40.
- [3] Fagor Automation, *Prod. Mecánica* 3 (1999) 74-83.
- [4] A. ALIQUÉ, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 1979.
- [5] J.R. ALIQUÉ, *Control Numérico*, Editorial Marcombo, 1981.
- [6] P.P. WANG y C.Y. TYAN, *Automatica* 30 (1994) 1.769-1.774.
- [7] L.A. ZADEH, *IEEE. Comput.* (1988) 83-93.

- [8] C.C. LEE, *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* 20 (1990) 404-418.
- [9] M. ATHANS, et al., *IEEE. Trans. Autom. Control.* AC, 22 (1977) 768-780.
- [10] K. NARENDRA, J. BALAKRISHNAN y K. CILIZ, *IEEE. Control. Syst.* 15, 3 (1995) 37-51.
- [11] S.W. KIM, E.T. KIM y M. PARK, *Fuzzy. Sets. Syst.* 81 (1996) 205-226.
- [12] S. YASUNOBU y S. MIYAMOTO, *Industrial Applications of Fuzzy Control*, M. Sugeno (Ed.), Elsevier Science, Holanda, 1985, pp. 1-18.
- [13] Y. KOREN, *J. Manuf. Sci. Eng.* 119 (1997) 749-755
- [14] O. YAGISHITA, O. ITOH y M. SUGENO, *Industrial Applications of Fuzzy Control*, M. Sugeno (Ed.), Elsevier Science, Holanda, 1985, pp. 19-38.
- [15] R.E. HABER, R.HABER-HABER, A. ALIQUÉ y S. ROS, *Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering*, vol. 2, S.K. Chang (Ed.), World Scientific Publishing, River Edge, New York, USA, 2002, pp.673-710
- [16] T. KNAPP y R. ISERMANN, *Proc. Am. Control Conf.* (1990) 1.632-1.637.
- [17] R.R. YAGER, *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* 23 (1993) 1.189-1.197.
- [18] G.V. RAJU y J. ZHOU, *IEEE. Trans. Syst. Man. Cybern.* 23 (1993) 973-980.
- [19] G. VACHKOV y K. HIROTA, *Proc. VI IFSA World Congress*, vol. 1, Rio de Janeiro, Brasil, 1995, pp. 617-620.
- [20] K. KANEDA y H. HONMA, *J. Jpn. Soc. Fuzzy Theory. Syst.* 3 (1991) 43-47.
- [21] R.E. HABER, C.R. PERES, A. ALIQUÉ, S. ROS, C. GONZÁLEZ y J.R. ALIQUÉ, *IEEE. Trans. Control. Syst. Technol.* 6 (1998) 188-199.
- [22] R.E. HABER, R.H. HABER, A. ALIQUÉ, S. ROS y C.R. PERES, *Proc. ASME*, vol. 70, New York, USA, Linda Hall Technical Library, Kansas City, USA, 2001, pp.715-720.
- [23] C.R. PERES, R.E. HABER, A. ALIQUÉ, S. ROS y R.H. HABER, *Comput. Ind.* 39 (1999) 199-207.

Información adicional en:

Universidades y grupos de investigación:

<http://widget.ecn.purdue.edu/~luk/manuf-home/cmproc.htm>

<http://www.erc.umd.edu/FACTSHEETS/admlab.htm>

<http://www.mech.ubc.ca/~mal/research/ims.htm>

<http://www.hsc.forum.de> (en alemán)

<http://www.mech.ubc.ca/Faculty/Labs/ManLab/Bostonf/bostonf.htm>

Fabricantes de máquinas herramienta:

<http://www.toshibamachinetool.com/press.htm>

<http://www.mmsonline.com/articles>

<http://www.makino.com/shared/hsm9801.asp>