

## SENSORIZACIÓN Y CONTROL DE UN PROCESO DE MECANIZADO UTILIZANDO UN SISTEMA EXPERTO BASADO EN REGLAS.

Rafael Serrano Bello

Luis Carlos González Valencia

Instituto Andaluz de Tecnología. Departamento de Diseño Industrial.

Francisco Jesús Martín Mateos

E.T.S. de Ingeniería Informática. Dpto. Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial.  
Universidad de Sevilla.

### Abstract

Although the manufacturing process for metal removal has changed considerably in recent years with the addition of electronic controls that manage the process, this labor is still excessive time-consuming. This paper seeks to show that artificial intelligence can be incorporated into the process for its management, thereby reducing dependence on human decision machining and improving results. The development consists of a module of data acquisition and processing (DSS) recorded by sensors, an expert system (SE), which communicates with the DSS through an interface that also serves to communicate with the user. The expert system has an inference engine designed by techniques of Artificial Intelligence (AI), based on an "effective action" algorithm that relies on *modus ponens* rules, and a strategy of inference "target rules-oriented". "The result of tests carried out have demonstrated that it is possible to monitor real-time manufacturing process using AI rules integrated into a SE.

**Keywords:** *expert system, control monitoring, machining, artificial intelligence.*

### Resumen

Aunque el proceso de fabricación por arranque de viruta ha evolucionado mucho en los últimos años con la incorporación de controles electrónicos que gestionan el proceso, aun consume excesivo tiempo de mano de obra cualificada. Esta investigación pretende demostrar que se puede incorporar inteligencia artificial al proceso para la gestión del mismo, disminuyendo así la dependencia del mecanizado de la decisión humana y mejorando los resultados obtenidos. El desarrollo consta de un módulo de adquisición y tratamiento de datos (SATD) registrados por sensores, un sistema experto (SE), que se comunica con el SATD a través de una interfaz que además sirve de comunicación con el usuario. El sistema experto dispone de un motor de inferencia diseñado mediante técnicas de Inteligencia Artificial (IA), en base a un algoritmo denominado de "acción efectiva" que se apoya en reglas *modus ponens*, y además una estrategia de inferencia del tipo "reglas orientadas a un objetivo". El resultado de los ensayos realizados han posibilitado afirmar que es posible controlar en tiempo real este proceso de fabricación utilizando reglas de IA integradas en un SE.

**Palabras clave:** *sistema experto; sensorización; mecanizado, inteligencia artificial.*

## 1. Introducción

En la última década, los centros de mecanizado, y en general las máquinas controladas por CNC han implementado diversidad de soluciones técnicas que facilitan el control del proceso por parte de las personas, sin embargo y en gran medida, todavía dependen en exceso de la participación de las personas para la gestión y modificación de los mismos, y aun no tienen capacidad por lo general de diagnosticar y corregir en tiempo real las imprecisiones que aparecen en los productos fabricados. La excesiva dependencia entre máquina y personas consume una gran cantidad de recursos técnicos y humanos. La calidad de los productos fabricados, los tiempos de fabricación y la puesta a punto del proceso son factores que se ven afectados negativamente por esta relación de dependencia. Todos estos factores indican que en la actualidad, la optimización de estos procesos industriales es un problema resuelto sólo parcialmente y presenta un alto grado de mejora. La incorporación de inteligencia artificial (IA) a estas máquinas y procesos, Sam Park (1998) se presenta como una solución que puede paliar esta limitación. La IA se puede dividir en tres grandes categorías; los sistemas expertos basados en conocimiento (knowledge-based expert systems, KBES), las redes neuronales (RN) y un último grupo que abarca los métodos probabilísticos de inferencia y lógica borrosa, Rodríguez (1994) y Chen (2000). Adicionalmente se podrían sumar los trabajos realizados con algoritmos genéticos (AG), Kuo (2001). Los sistemas expertos basados en conocimiento, (KBES) utilizan una base formada con reglas de producción, Billatos (1994), mientras otros, como el trabajo de Haber y Guerra (2006), utilizan modelos basados en reglas con un motor de inferencia, como el que se desarrolla en este trabajo. Los primeros trabajos de sistemas expertos basados en reglas de decisión para controlar el proceso de mecanizado, como el que se presenta en este trabajo, se remontan a finales de los años ochenta. Bhoez (1997) desarrolló uno de los primeros prototipos de sistema experto basado en 500 reglas. Ya a principios de la actual década, se realizaron trabajos como Kuo (2001) donde se implementaron con éxito sistemas expertos basados en reglas con el enfoque de Algoritmos Genéticos.

Por otro lado, las RN parten de casos prácticos para el entrenamiento de la red, gracias a éstos generan su propio conocimiento, mientras que en los sistemas expertos el conocimiento se hace explícito. Mediante el aprendizaje, y utilizando RN, como en Agoniono (1988), se propone un enfoque de modelo de red sobre la base de normas de aprendizaje. Las RN puede generar su base de conocimientos, y no requieren procesos adicionales para la adquisición de conocimientos, como ocurre con los sistemas expertos. Dentro del ámbito de aplicación de este trabajo, algunas investigaciones como Kus (2000) han desarrollado modelos de RN para la determinación de la fuerza de corte de herramientas. La tercera área de IA consistía en el enfoque probabilístico. Éste utiliza un modelo de diagrama de influencia , Agoniono (1988), con un motor de razonamiento probabilístico. El diagrama de influencia se desarrolla para la representación de problemas complejos en los que la decisión se toma en base a información incompleta perteneciente a varias fuentes, Shachter (1986 y 1988). También se utilizan redes Bayesianas, Dey (2005), como método de diagnosis de fallo del proceso de mecanizado en tiempo real. Asimismo, como trabajo concreto con máquinas herramientas, en Chang (2007) se estudia la posibilidad de predecir en tiempo real el acabado superficial midiendo el deslazamiento del husillo con la sensorización del mismo, mediante modelos estadísticos de regresión lineal simple. En el ámbito industrial ya existen aplicaciones de control del proceso de mecanizado, se trata de los controles adaptativos. La filosofía de estos controles se apoya en la monitorización de ciertas variables que indican el estado del proceso, para controlar otras variables de entrada del proceso, como en el trabajo de Hsu (1996). A estos controles hay que dotarlos para su trabajo de una tabla previamente calculada con el comportamiento requerido para distintos puntos de funcionamiento. Desde esta tabla se determina la respuesta del control en función de una variable auxiliar analizada. Un ejemplo de control adaptativo es el desarrollado por la

empresa Fagor, Alique (2008), en lazo abierto (que incorpora en su modelo 8070) basado en lógica borrosa y reglas de decisión. El objetivo de este control CNC es gobernar las variables de entrada al proceso, calculadas a partir de ciertas variables internas que reflejan el comportamiento del sistema y que son monitorizadas en cada instante.

Este trabajo se basa en una estructura que se soporta en un sistema de adquisición de datos (SATD) formado por varios sensores, que tras recoger los datos del proceso de mecanizado, los comunica a un sistema experto (SE), los módulos SATD y SE están integrados en una aplicación denominada interfaz. El SE diagnostica el estado y decide acciones de corrección para mantener el mecanizado dentro de unos parámetros óptimos definidos por el usuario. El SE está programado con reglas de producción y consta de un motor de inferencia denominado algoritmo de acción efectiva (AAE) que controla más de cien mil estados posibles. Este algoritmo está diseñado de manera que permite activar o desactivar cualquier sensor, o bien incluso añadir nuevos sensores fácilmente sin necesidad de reprogramar el SE.

## **2. Objetivo**

El primer objetivo de esta investigación era el demostrar que se puede gobernar en tiempo real un proceso de mecanizado mediante el concurso de un sistema experto, es decir, registrar los datos externos, procesar dichos datos, enviarlos al SE, decidir las acciones a efectuar, transmitirlos al control de la máquina o a actuadores externos y conseguir una modificación del comportamiento del proceso suficientemente rápida.

## **3. Módulos del sistema; Interfaz, SAD y SE.**

Los sistemas de Adquisición de Datos (SATD) y Experto (SE) están integrados en una aplicación informática denominada interfaz . Esta aplicación informática además muestra información por pantalla y comunica todo el sistema con el usuario, para lo cual dispone de utilidades y controles para la visualización, configuración, inicialización gestión y control del funcionamiento. La interfaz se programó en Visual Basic 6.0, que proporciona funciones y controles OCX para el manejo de la interfaz desarrollada en LabView. El SE ha sido programado en CLISP, un lenguaje orientado a objetos de alto nivel y propósito general, especialmente indicado para ello

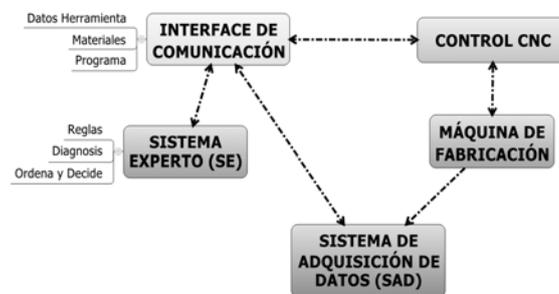
La interfaz, como se puede observar en la figura 1, es el centro de distribución de la información que comparten los subsistemas entre sí. Ésta recoge los datos del proceso captados por SATD y los almacena. La interfaz activa y pone en marcha los sistemas SATD y SE, trasmite al control de la máquina las decisiones del SE, interviniendo así el proceso de mecanizado. Esta aplicación es además la encargada de transmitir el programa al CNC actuando a modo de DNC.

## **4. El Sistema Experto.**

El sistema experto integrado en el sistema Sensor-IA recibe como entrada un conjunto de datos de la interfaz de dicho sistema. Como resultado se genera un conjunto de acciones

sobre los controles manuales de la máquina. Estas acciones sirven para salvaguardar el correcto funcionamiento de la máquina así como para ajustarlo a un nivel predeterminado.

**Figura 1. Esquema general.**



En la implementación de este sistema experto se han conseguido los siguientes objetivos:

- Un diseño basado en reglas de producción en el intérprete de desarrollo CLIPS. El algoritmo RETE de procesamiento de reglas de producción implementado en el intérprete CLIPS está optimizado para obtener una mayor eficiencia en el procesamiento de grandes conjuntos de reglas.
- Un tratamiento independiente de cada uno de los datos proporcionados desde la interfaz. De esta forma el sistema experto funciona igual tanto si se proporciona un único dato desde la interfaz, como si se proporcionan varios. También facilita la incorporación de nuevas fuentes de datos sensores, ya que no afectan ni se ven afectados por el tratamiento de los otros datos de entrada.
- Un diseño que minimiza el número de cambios entre consultas sucesivas al sistema experto, con lo que se consigue disminuir el tiempo de ciclo de respuesta de éste.

El SE desarrollado se puede dividir en las siguientes partes:

- Una base de conocimiento (las reglas).
- Un motor de inferencia (algoritmo de acción efectiva).

La base de conocimiento está basada en reglas para interpretación y toma de decisiones. El sistema lee los datos que le llegan a través de la interfaz desde el SATD y los datos que le llegan del CNC, calcula los parámetros internos y aplica su base de conocimiento (las reglas) para tomar las decisiones pertinentes, posteriormente se comunica con el CNC y transmite estas decisiones, (modificaciones sobre los parámetros). Todo el ciclo opera en tiempo real, tiene su punto de partida una vez el SATD recoge los datos de los sensores, los procesa y los envía al SE. El sistema experto recoge éstos y también los parámetros provenientes del CNC, y según los valores de todos toma una decisión utilizando el motor de inferencia. Esta decisión es enviada a al control de la maquina (si existe tal decisión), que es el encargado de la ejecución de la orden, en este punto termina el ciclo actual y vuelve a comenzar un nuevo ciclo.

El sistema de inferencia se desarrolló con el lenguaje CLIPS. Éste utiliza un sistema de inferencia de encadenamiento hacia delante, consistente en eliminar o derivar datos a partir de un conjunto de hechos y siguiendo las directivas especificadas en las reglas. Este proceso corre el riesgo de introducirse en bucles infinitos de derivación, el ejemplo más simple consiste en una regla que no necesita nada para activarse y que no realiza ninguna acción, esta regla podría ejecutarse indefinidamente. Para evitar este tipo de situaciones, CLIPS incorpora refracción, una propiedad que evita el disparo de una misma regla en más

de una ocasión activada por el mismo conjunto de hechos. Para mejorar la eficiencia en el proceso de comprobar que reglas están activas, CLIPS implementa una versión optimizada del algoritmo RETE creado por Forgy: en lugar de comprobar todas las condiciones de todas las reglas para ver cuál está activa, comprueba sólo los cambios en el estado de aquellas reglas que puedan verse afectadas por la última regla disparada.

#### **4.1. Reglas de producción.**

Una de las decisiones a tomar en el diseño de un SE basado en reglas consiste en elegir reglas disjuntas (de rangos no solapadas con otras) o no disjuntas.

Los procesos de mecanizado se caracterizan por su complejidad y una gran cantidad de operaciones, por lo que en el inicio de este trabajo conceptualmente se decidió que el sistema fuera capaz de manejar un conjunto de situaciones muy amplio, así que se optó por considerar reglas no disjuntas. De esta forma se consigue disponer de reglas mucho más generales. Además al elaborar las reglas no disjuntas se simplifica la transmisión de la experiencia en la definición de las mismas por parte del experto, y como en la realidad estas reglas deben resolver problemas complejos, donde la decisión implica a más de una, el algoritmo de acción efectiva se encarga de la elaboración de la decisión global teniendo todas en cuenta.

Otra capacidad propia del sistema es la evolución. Se deseaba que en la medida de lo posible pudiera crecer o evolucionar en el futuro, es decir, es lógico que para dar respuesta a distintas capacidades exigidas por el entorno se debían de poder añadir nuevos sensores, y de cualquier tipo. Si se diseñan reglas disjuntas, incorporar un nuevo tipo de sensor implica tener que rediseñar todas las reglas desde el principio, mientras que si son no disjuntas implementar una nueva regla e incluirla en el sistema es tan simple como añadir a la base de conocimiento existente las reglas que controlan ese nuevo parámetro sensorizado.

Como las reglas no disjuntas actúan de forma complementaria, hay que recopilar todas acciones que las reglas sugieren que hay que aplicar en un ciclo de trabajo y decidir a partir de ellas una acción global que tenga en cuenta todas ellas. A esta acción se le denomina "Acción Efectiva". Por otra parte, el SE puede trabajar con distintos niveles de riesgo. Estos niveles de riesgo son establecidos por el usuario. Cada nivel implica distintos límites de intervención del CNC o de los parámetros exteriores controlados. Cada nivel de riesgo lleva asociado bloques de reglas distintos.

#### **4.2. Algoritmo de Acción Efectiva.**

El motor del SE está diseñado en base a una estrategia de inferencia del tipo "reglas orientada a un objetivo" más el modelo de regla de modus ponens. Este motor utiliza un algoritmo para obtener conclusiones o hechos. El SE puede determinar varias acciones o hechos como solución al estado de actual del proceso, las diferentes acciones son las que se tendrían que realizar según el estado de cada parámetro si éste funcionara independientemente. Este algoritmo recopila las diferentes acciones. Del estado de los parámetros con los que el SE trabaja se deducirían i posibles (entre 1 y 5) acciones independientes que intentarían intervenir al CNC.

El algoritmo opera de la siguiente manera, supongamos que hay "i" acciones distintas que el SE ha decidido aplicar para optimizar el proceso de fabricación (existen tres parámetros del proceso que se han decidido como modificables, ya sea vía CNC o externo a éste; revoluciones del husillo, velocidades de los carros y caudal de taladrina mediante una electroválvula):

- Si todas las acciones deducidas por el SE sobre uno de los tres parámetros, suponen aumentar el valor de dicho parámetro, la acción a ejecutar se reduce a la que indica un incremento máximo (pues satisface todas las reglas que sugirieron dicha acción). Obtenemos así una acción  $+F_1(i)$ .
- Si todas las acciones deducidas por el SE suponen la disminución del valor del parámetro controlado, la acción a ejecutar se reducen a la que indica una reducción máxima. Obtenemos así una acción  $-F_2(i)$ .
- Si los dos casos anteriores no se dan a la vez, entonces ocurrirá:
  - si  $+F_1(i)$  no existe, la acción efectiva es  $-F_2(i)$ .
  - si  $-F_2(i)$  no existe, la acción efectiva es  $+F_1(i)$ .
- Si los dos primeros casos se dan simultáneamente, o sea, existen tanto  $+F_1(i)$  como  $-F_2(i)$ , ambas acciones indican hechos contradictorios. En este caso se calcula la acción global efectiva como un valor ponderado entre  $+F_1(i)$  y  $-F_2(i)$ , por ejemplo, la acción conjunta (suma) de las dos. Pero ¿Cómo se calcula esa acción conjunta?, de la siguiente forma:
  - Se pondera la acción inclinándola hacia el estado en que se encuentra el sensor más desfavorecido.
  - Se diseña una matriz de ponderación. Las columnas son los 16 intervalos o estados posibles. por las filas se entra con el valor del estado en que se encuentra el sensor que esté en mayor nivel (mayor riesgo).

**Tabla 1. Matriz de ponderación para acción efectiva.**

Estado del parámetro monitorizado en nivel máximo	Estados y Transiciones										
	1	1_2_1	2	2_3_2	3	3_4_3	4	4_5_4	5	5_6_5	6
Intervalo 3	$C_{1,1}$	$C_{1,2}$	...							...	$C_{1,11}$
Intervalo 4	...										...
Intervalo 5	...										...
Intervalo 6	$C_{4,1}$	$C_{4,2}$	...	...	$C_{4,5}$	...			$C_{4,9}$	...	$C_{4,11}$

## 5. Experimentación.

El trabajo que se presenta en este artículo se implementó en un centro de mecanizado Kondia 600 con control FAGOR 8025-MG. El sistema de adquisición de datos se desarrolló utilizando el software LabView 8.

El SE recibe los siguientes parámetros de entrada: vibración en la dirección X del eje de la herramienta o husillo, vibración del carro de la fresadora en Y y Z, temperatura de las plaquitas de la herramienta y fuerza vertical debajo de la mordaza (en la mesa). Los parámetros del proceso sobre los que el SE puede actuar son el Feed (la velocidad de avance), las revoluciones de la herramienta y el caudal de taladrina, controlado mediante una electroválvula comandada por la interfaz. El sistema controla el proceso en el que

previamente el usuario ha definido 6 intervalos o estados para cada parámetro. El control de SE también se extiende a las respectivas transiciones entre dichos estados (como se observa en la tabla 1). Por último, el usuario debe elegir entre tres niveles de riesgo que debe ser asumido para el mecanizado, tal y como se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2. Niveles de riesgo asumido.**

Niveles de Riesgo Asumido	Descripción
Calidad	El usuario destaca la calidad frente al tiempo
Calidad y Tiempo	El usuario busca un equilibrio entre calidad, tiempo y valores de vida media de herramientas y equipo
Tiempo	El usuario destaca el tiempo (no se reduce nunca la velocidad de avance) de fabricación

### 5.1 Implementación Piloto

Para la validación del sistema se diseñaron experimentos en los que las variables involucradas quedaban definidas según se muestra en la Tabla 3. El material mecanizado es acero F114 (con equivalencia aproximada al AISI 1045) con dureza 178 HB.

**Tabla 3. Variables de la prueba piloto.**

VARIABLES INDEPENDIENTES	VALOR FIJO	Material de la pieza Tipo de operación Herramienta de corte
	VALOR VARIABLE	R.P.M Profundidad de corte Feed
VARIABLES DEPENDIENTES	Vibración en la mesa	

La herramienta de corte utilizada es una fresa de plaquitas Mitsubishi AOMT184804PEER-HVP15TF de 25 mm de diámetro y dos dientes. Los datos proporcionados por el fabricante (Mitsubishi Materials España, S.A) aconsejan trabajar con estas plaquitas según los parámetros que se mencionan en la tabla 4.

El tipo de operación seleccionada es un desbastado plano en XY con patrón de corte sólo zig. Se escogió este patrón para conseguir que la herramienta siempre esté cortando en las mismas condiciones de dirección y sentido, evitando introducir más variables en el proceso.

El centro de mecanizado utilizado (Kondia K600) limita la intervención del spindle desde la rpm inicialmente programada hasta un valor comprendido entre el 50% y 120% del total. Para el feed, el intervalo de modificación oscila entre 0 y 120%. La electroválvula instalada controla el caudal del motor de refrigerante entre el 0% y el 50% (siendo el 100% un caudal de 40 l/min).

**Tabla 4. Valores recomendados y utilizados para la prueba piloto.**

	Profundidad de Corte (mm)	Avance por Diente (mm)	Velocidad de Corte (m/min)
Valores del fabricante	5 o menos	0,2	140 -210
Valores Utilizados en los Ensayos	0,25 - 1,5	0,02 - 0,6	80 - 300

Los parámetros que recoge cada sensor se han discretizado en seis estados numerados del 1 (inicial) al 6 (crítico) junto con las transiciones entre estos, sumando un total de dieciséis estados posibles (tabla 1). Para cada sensor el conjunto de reglas se ha dividido en 15 bloques (un bloque por cada estado más las transiciones de uno a otro). En cada bloque se agrupan el conjunto de reglas que controlan el sistema. Con estas condiciones, un bloque de reglas para, por ejemplo, el sensor de vibración, es el siguiente:

**Tabla 5. Ejemplo de bloque del SE: riesgo 1 y vibración en estado 6 proveniente de 5.**

ESTADO	Nivel de riesgo asociado	Caudal	ACCIÓN1 SPINDLE r.p.m	ACCIÓN2 FEED mm/min	ACCIÓN3 CAUDAL l/min
VIBRACIÓN MESA nivel 6 desde 5	1	1	± 5%S hasta 115%	± 10%F hasta 50%	± 5% hasta 15%, si F ó S cambian
	2	1	± 5%S hasta 115%		± 5% hasta 15%, si F ó S cambian
	3	1	± 5%S hasta 115%		± 5% hasta 15%, si F ó S cambian

El bloque de la tabla 5 hace referencia a la reacción del sistema sobre los tres parámetros de ejecución cuando la vibración YZ de la mesa se encuentra en el nivel 6, proveniente del 5. Según el nivel de riesgo asociado, la regla se comporta de manera distinta, como se puede ver en las columnas spindle, feed y caudal de la tabla 5.

Una primera batería de 300 experimentos (con nivel de riesgo 2, calidad y tiempo) se realizó para la validación de la aplicación en acero utilizando tres sensores, los dos de vibración y el de temperatura, en distintas combinaciones, con el sistema experto activo y sin él. Se comenzó haciendo pruebas mecanizando en vacío (sin material) y sin el sistema experto, para los que se detectaron valores de vibración comprendidos entre 0.5 y 4 m/s<sup>2</sup> para velocidades del spindle comprendidas entre 500 y 3000 r.p.m. Con la información obtenida referente a la vibración los experimentos realizados sin SE, se determinó el valor de los seis estados que debe controlar el SE. El estado óptimo de vibración (estado 4) al que la aplicación debe aproximarse en nivel de riesgo 1 quedó definido en el intervalo de vibración 6 y 9 m/s<sup>2</sup>. Introducidos estos valores en la aplicación, y volviendo a realizar los experimentos se obtuvieron resultados positivos.

## 5.2. Resultados

Respecto de la temperatura de la plaquita, experimentando con el sensor de temperatura en solitario y posteriormente en combinación con los demás sensores, y teniendo en cuenta la media de los resultados de los experimentos, se constató para el acero AISI 1045 y el tipo de herramienta utilizada, que cuando el SE actúa, la temperatura de la misma se encuentra

entorno al 9% más fría que cuando el mecanizado se realiza sin la vigilancia del sistema experto.

Para las vibraciones, el comportamiento depende de varios factores. En general para revoluciones bajas (750 rpm ó 58,87 m/min) la diferencia entre el mecanizado con sistema experto (CS) y sin sistema experto (SS), es pequeña, aunque siempre con menor vibración con CS, figura 2, la tendencia lineal también indica ese mismo comportamiento. Si se mantiene constante la revolución a 750 y aumenta el avance, figura 3, el sistema experto CS acentúa su control manteniendo la vibración constante mientras que el mecanizado sin SS tiene a crecer, en este caso la pendiente de la línea de tendencia es horizontal para el mecanizado CS lo que indica que para este grupo de experimentos se consiguió estabilizar totalmente la vibración en los niveles óptimos predeterminados.

Por otro lado, para revoluciones medianas (1500 rpm) se observa también la intervención CS manteniendo la vibración siempre por debajo del proceso SS, figura 4, en este caso la pendiente de la línea de tendencia es menor para el mecanizado con SE lo que indica un menor crecimiento de la vibración. Para las revoluciones altas de la máquina (3750 rpm) el comportamiento es irregular aunque la tendencia hacía la estabilidad es más clara el proceso gobernado por el SE, figura 5. La tendencia en este caso, debido a la distribución de los datos, se calculó en base logarítmica. La calidad superficial de las probetas ensayadas guarda una relación similar las vibraciones descritas en las figuras 2,3,4 y 5.

En las gráficas, además de las datos referentes a la vibración se ha representado las tendencias de los mismos con objeto de apreciar si existe una convergencia, o no. Esta tendencia se ha ajustado según la distribución de los datos obtenidos, siendo en la mayoría de los casos ecuaciones lineales ( $y = mx + b$ ), o logarítmicas ( $y = bmx$ ).

**Figura 2. Comparación de la vibración XYZ en experimentos de 750rpm y 600 mm.**

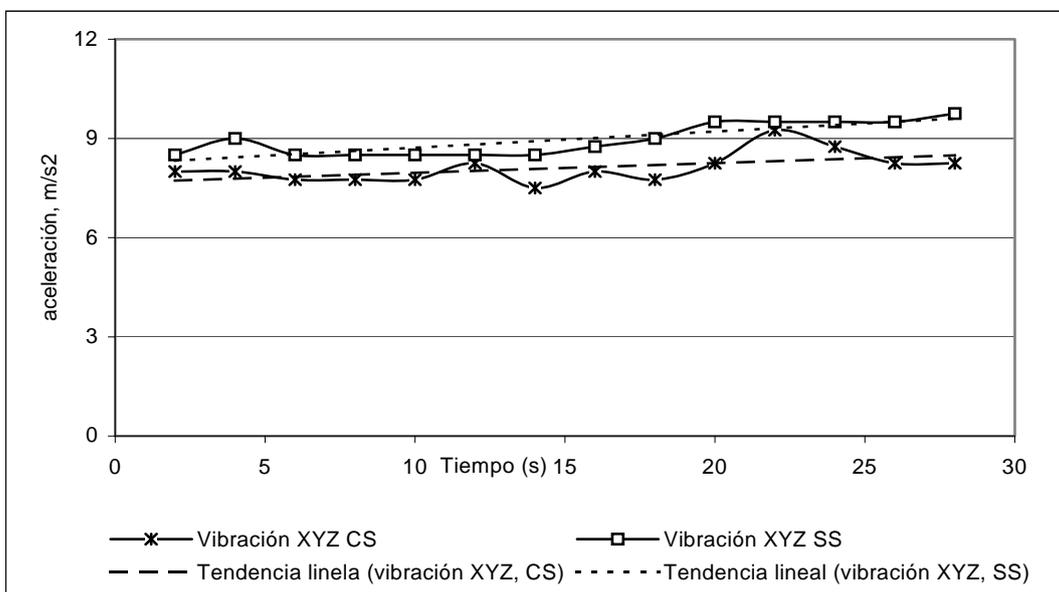


Figura 3. Comparación de la vibración XYZ en experimentos de 750rpm y 1000 mm.

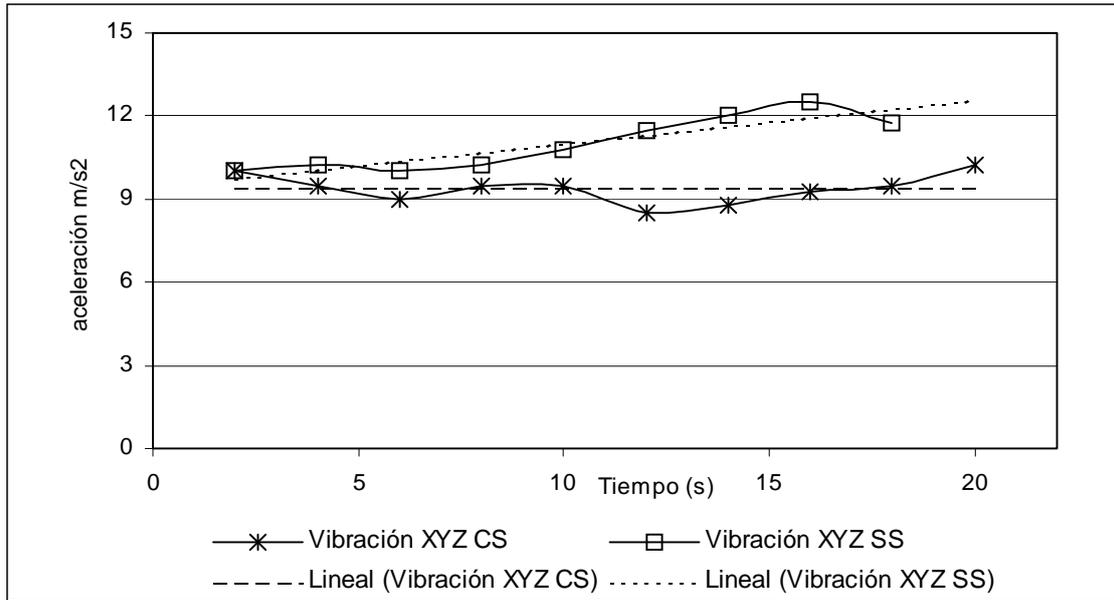
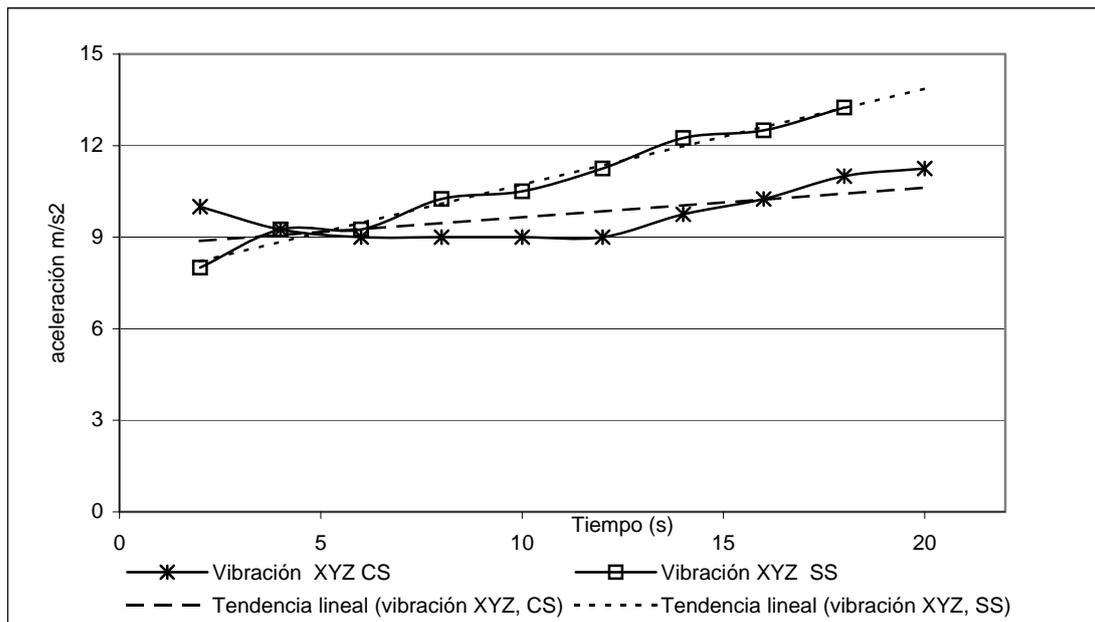
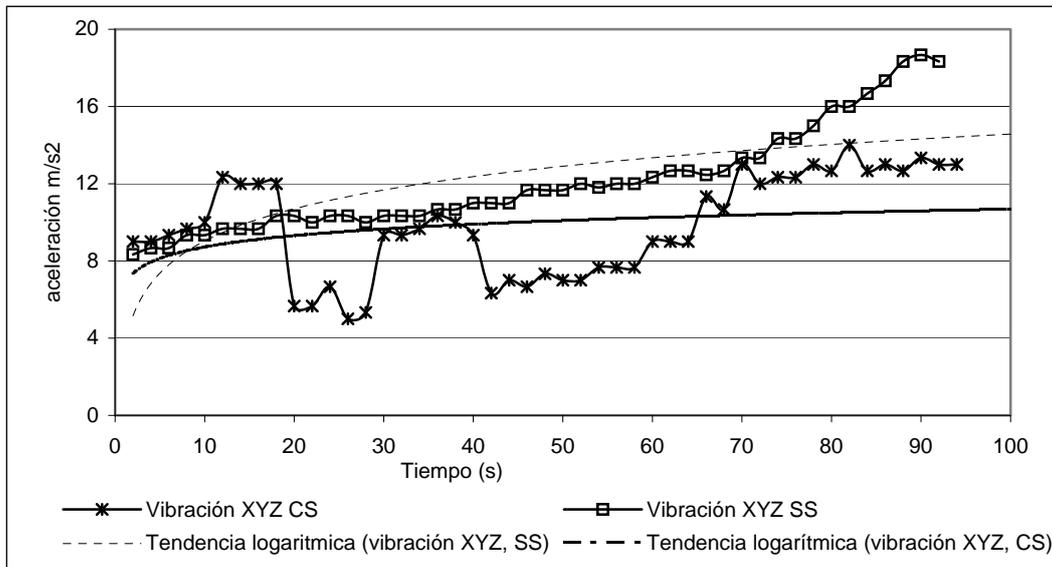


Figura 4. Comparación de la vibración XYZ en experimentos de 1500rpm y 1000 mm.



En las pruebas que se realizan en la actualidad también se controla el acabado superficial de la probeta y se comparan los resultados del proceso con sistema experto (CS) y sin sistema experto (SS). Los resultados obtenidos, medidos en términos de Ra, señalan, tal y como se esperaba, que en la medida en la que la vibración del proceso desciende, también lo hace la rugosidad, por lo que los esfuerzos se centran en la identificación de una función que relacione ambas variables con las controladas por el sistema experto.

Figura 5. Comparación de la vibración XYZ en experimentos de 3750rpm y 200 mm/min.



## 6. Conclusiones.

Los resultados extraídos de la prueba piloto indican que el sistema ideado funcionó con éxito al implementarse en una arquitectura para la optimización de un proceso de mecanizado en tiempo real mediante un sistema experto. Adicionalmente se pueden resumir las siguientes particularidades innovadoras:

- Puede tratar información “interna” –ofrecida por el CNC- o “externa” ofrecida por los sensores;
- Puede actuar sobre parámetros del proceso de mecanizado “internos” (p.ej.: la velocidad de avance) o externos (podría activar un envío de SMS o un correo electrónico, si se sobrepasan ciertos rangos).
- Hay controles modernos que controlan en cierta medida algunos parámetros del proceso, pero esta arquitectura es implementable sobre virtualmente cualquier control, por antiguo que sea.
- En la actualidad se trabaja en ensayos exhaustivos para la obtención de un conjunto de reglas más realístico, que abarque distintos tipos de metales, acero y aluminio y utilizando combinaciones de los 4 tipos distintos de sensores instalados en la máquina para ampliar la capacidad de respuesta del sistema experto.
- Los resultados de la primera batería de experimentos realizada con los recursos descritos en el apartado “Prueba Piloto”, dan un resultado positivo y demuestran la capacidad del sistema experto de mantener el proceso en los intervalos de actuación predefinidos, consiguiendo procesos con menor vibración de los carros, de los husillos y de la temperaturas de las plaquitas de la herramienta.
- El sistema desarrollado, como arquitectura, sirve para cualquier máquina de fabricación (siempre que esté controlada por CNC).

## 7. Agradecimientos

El proyecto SENSOR-IA ha contado con una ayuda con cargo a la Orden de Incentivos a los Centros Tecnológicos de la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía.

## 8. Referencias

- Agoniono AM, Srinivas S, Schneider KM. (1988). Multiple sensor expert system for diagnostic reasoning, monitoring and control of mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal processing*, 2,165-851988:.
- Alique JR, Gajate A, Novo M. (2008). Control adaptativo inteligente para la optimización de los procesos de fresado desatendido.
- Billatos SB, Tseng PC. Knowledge-based optimization for intelligent machining (1991). *Journal of Manufacturing Systems*, 10. 464-75.
- Bohez ELJ, Thieravarut M. Expert system for diagnosing computer numerically controlled machines: a case-study (1997). *Computers in Industry*, 32(3):233-48.
- Cus F, Zuperl U, Milfelner M. (2000). Dynamic neural network approach for tool cutting force modeling of end milling operations. *International Journal of General Systems*.
- Chen JC, Lou M.S. (2000). Fuzzy-nets based approach to using an accelerometer for an in-process surface roughness prediction system in milling operations. *International Journal Computational Integrated Manufacturing*. 13(4):358-68.
- Chang, Hun-Keun, et al. (2007). In-process surface roughness prediction using displacement signals from spindle motion. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, no. 6:1021-1026.
- Dey, S., and J. A. Stori. (2005). A Bayesian network approach to root cause diagnosis of process variations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45, no. 1:75-91.
- Haber Guerra, RE, Alique Palomar Á, Alique López, JR.. (2006). Control inteligente de los procesos de mecanizado. Instituto de Automática Industrial (CSIC).
- Hsu PL, Fann WR . (1996). Fuzzy adaptive control of machining processes with a self-learning algorithm. *Journal of manufacturing science and engineering* vol. 118, no4, pp. 522-530 (23 ref.)(no4,):p.p 522-530.
- Kuo L, Yen J. (2001). Servo parameter tuning for a 5-axis machine center based upon GA rules. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 41(11):1535-50.
- Rodríguez C, Haber R, Alique JR et al. (1994). Modeling of Machine-Tool Cutting Process Applying Fuzzy Logic and Clustering Analysis. *II European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing*; II:1071-5.
- Sam Park K, Hi Kim S. (1998). Artificial intelligence approaches to determination of CNC machining parameters in manufacturing: a review. *Artificial Intelligence in Engineering*. 12(1):127-34.
- Shachter R. (1988). Probabilistic inference and influence diagrams. *Operations research*. 36:589-604.

Shachter R. (1986). Evaluating influence diagrams. *Operations research*. 34:871-82.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Instituto Andaluz de Tecnología. Departamento de Diseño Industrial. c/ Leonardo Da Vinci, 2. 41092, España. Luis Carlos González Valencia, Rafael Serrano Bello.

Phone: + 0034 954468010

Fax: + 0034 954 460407

E-mail : rserrano@iat.es, luisca@iat.es

URL : [www.iat.es](http://www.iat.es)