

# Control Automático de Acabado Superficial en un Centro de Maquinado

Miriam B. González-Conzuelo, Federico Guedea Elizalde, Rubén Morales-Menéndez  
Centro de Innovación en Diseño y Tecnología  
Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey  
Avenida Eugenio Garza Sada 2501 Sur  
64849 Monterrey, NL México  
mibegoco@hotmail.com, {fguedea, rmm}@itesm.mx

**Resumen**—Uno de los indicadores mas importantes de calidad de un producto mecanizado es el acabado superficial, medido a partir de la rugosidad del material. En mecanizado de alta velocidad, los parámetros de corte normalmente son determinados a partir de la experiencia de los operadores y permanecen fijos a lo largo del proceso, sin tomar en cuenta los factores que inciden directamente en el acabado superficial como la velocidad de corte, la velocidad del giro de husillo, la profundidad de corte, entre otros. En este trabajo se presenta un sistema de control de rugosidad en línea basado en la lógica difusa. Dada la imposibilidad de medir en línea la rugosidad, se utilizó una red neuronal que fusiona la vibración entre la herramienta de corte y la pieza a maquinar con señales adicionales para mejorar la calidad de la predicción. Resultados iniciales muestran la factibilidad de la solución propuesta.

**Palabras clave:** Rugosidad; Acabado superficial; Modelo; Control Difuso.

## I. INTRODUCCIÓN

Las empresas manufactureras se enfrentan a las crecientes demandas de una mejor calidad, mayor variabilidad de producción, menores ciclos de vida del producto, reducción de costos, y competitividad global. Uno de los factores de los de mayor influencia es el desarrollo de las nuevas políticas mundiales de mercados abiertos y globalización, una libre competencia de donde ha surgido la necesidad de adecuar a la industria a fin de que pueda satisfacer el reto de los próximos años. Uno de los elementos importantes de la automatización de la industria manufacturera son las máquinas herramienta de Control Numérico Computarizado (CNC).

En una máquina herramienta, un procesador es el que controla la posición y velocidad de los motores asociados a los ejes de la máquina, siendo capaz de mover la herramienta al mismo tiempo en tres o más ejes para ejecutar trayectorias tridimensionales como las que se requieren para el mecanizado de moldes complejos y troqueles.

Las dificultades evidentes para la automatización de los procesos de mecanizado se han incrementado con la aparición de dos nuevos paradigmas: la incorporación de funciones objetivo y variables de mérito, y el mecanizado de alta velocidad [1].

El control de procesos, que no es común que se integre en máquinas herramientas, se refiere al ajuste automático de los parámetros del proceso (velocidad de avance, velocidad de giro del husillo) con el fin de incrementar la productividad y la calidad de las piezas. Los elementos críticos para el proceso de control en máquinas herramienta incluye modelos dinámicos, algoritmos de control, respuesta de actuadores, entre otros.

La importancia de investigar sobre el acabado superficial radica en las demandas actuales de la industria automotriz y aeronáutica; las cuales requieren acabados superficiales de gran calidad y tolerancias dimensionales más pequeñas.

En el presente trabajo se expone el diseño de un controlador para una máquina-herramienta CNC basado en lógica difusa para lograr un acabado superficial. Se utiliza un controlador difuso por su facilidad para modelar el conocimiento y experiencia humana, debido a la imposibilidad de utilizar un modelo matemático por la complejidad del proceso.

En la actualidad no existen sistemas de monitoreo directo del acabado superficial debido a la ausencia de sensores capaces de medir los diferentes parámetros en un ambiente hostil como el mecanizado. Por esto, se utilizarán mecanismos de medición indirecta basados en Redes Neuronales Artificiales (ANN por sus siglas en inglés) para estimar en línea la rugosidad de la pieza que está siendo mecanizada.

El artículo está organizado en 5 secciones. La sección II presenta una revisión del estado del arte, la sección III presenta el diseño del controlador basado en lógica difusa. El sistema experimental se describe en la sección IV y finalmente las conclusiones se presentan en la sección V.

## II. HISTORIA DEL ARTE

El Mecanizado de Alta Velocidad (HSM, por sus siglas en inglés) se diferencia del mecanizado común en que utiliza altas velocidades de corte y mayor potencia (generalmente mayores a 10,000 rpm y 10 hp) para remover el material a razones de magnitud mayores. El nuevo paradigma de mecanizado es *maximizar la tasa de arranque de viruta, minimizando la tasa de desgaste de las herramientas y manteniendo la calidad, tanto dimensional como superficial*

de todas las piezas mecanizadas dentro de unas especificaciones dadas [1].

Algunos aspectos a considerar para la automatización de procesos de mecanizado son [4]:

- *Sensores y técnicas de sensado.* Los sensores se dividen en cinco categorías: textura superficial, integridad superficial, precisión dimensional, condición de la herramienta, y detección de vibraciones regenerativas (chatter).
- *Estrategias de procesos de control.* Las principales estrategias incluyen optimización de control adaptable, control adaptable con restricciones, control adaptable geométrico.
- *Sistemas de arquitectura abierta.* Para este caso se busca la modularización y apertura por parte del equipo para que cualquier persona pueda modificar aspectos internos (ejecución de códigos, prioridades, etc.)

#### A. Calidad Superficial en HSM

La calidad superficial de una pieza se mide con la integridad superficial que parte de la topología de la superficie, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas y metalúrgicas. La topología de la superficie se identifica por su textura superficial, en la que se miden varias cantidades relacionadas con las desviaciones producidas en la pieza con respecto a la superficie nominal. La rugosidad superficial tiene gran repercusión en el HSM considerando una de sus importantes características como lo es una velocidad de avance alta que, por definición, conllevarían a pobres niveles de acabado superficial [2].

De acuerdo a Pamies [7] los factores que afectan la rugosidad superficial son:

- *Factores del proceso,* que afectan a la máquina herramienta (como rigidez, sistemas de accionamiento, entre otros), a la pieza a mecanizar (geometría y material) y a la sujeción de la pieza a la máquina herramienta (rigidez del montaje y acceso a la zona a mecanizar).
- *Factores indirectos del proceso,* que afectan a la herramienta (material, sujeción, geometría, desgaste y alineación de los filos de la herramienta) y a las condiciones de corte (parámetros de corte y estabilidad de corte).

Debido a la imposibilidad de medir la rugosidad en línea, se desarrolló un modelo para predecir el valor de la rugosidad basado en redes neuronales. La aplicación de ANN en sistemas de monitoreo de procesos en línea ha sido de gran interés ya que tienen una gran capacidad de aprendizaje reduciendo los errores, obteniendo así un valor aproximado al deseado, sobre todo en procesos no lineales [6].

Una ANN es un sistema de procesamiento de información que tiene ciertas características análogicas a las redes neuronales biológicas. Las redes neuronales, tanto biológicas como artificiales, están formadas por elementos simples llamados *neuronas*.

En la Fig. 1 se muestra la estructura de la red neuronal utilizada. Las entradas a la red son la velocidad de corte la cual se calcula a partir de la velocidad del giro del husillo, el avance por diente el cual se calcula a partir de la velocidad de avance y giro del husillo, el desgaste de la herramienta que se mide a través de un microscopio y la vibración entre la herramienta de corte y la pieza a maquinar. Se utilizó un acelerómetro para la medición de la vibración, y por medio de comunicación entre una computadora y el PLC del centro de maquinado fue posible monitorear las otras tres variables de proceso para predecir la rugosidad superficial. Esta red funcionará como sensor virtual que fusiona cuatro variables del proceso para predecir la variable a controlar.

La red corresponde tiene una estructura de antealimentación multicapas. Los parámetros de la red fueron aprendidos utilizando el método de retropropagación. No se realizó un estudio minucioso para definir la estructura de la red y su método de entrenamiento, únicamente se realizó una simulación de Monte Carlo para validar estadísticamente los resultados, tal como se muestran en la Figura 2.

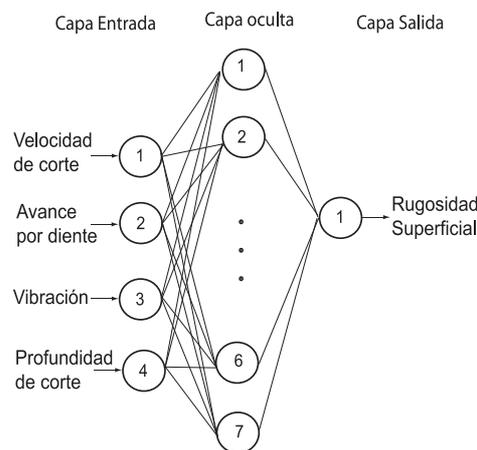


Figura 1. Arquitectura de la red neuronal ANN(4,7,1). Incluye 4 neuronas en la capa de entrada para las variables independientes, una capa oculta con 7 neuronas y una capa de salida con 1 neurona

Para el entrenamiento de la red se han utilizado los datos normalizados y así mismo se hizo un mapeo entre  $\{-1, 1\}$  para los valores de rugosidad superficial. La salida otorgada por la red y los datos reales se puede observar en Fig. 2.

### III. CONTROL LÓGICO DIFUSO PARA PROCESO DE MECANIZADO

El control lógico difuso (FLC, por sus siglas en inglés) es una estrategia de control retroalimentado basado en lógica difusa, la cual procesa información de forma cualitativa, permitiendo así la emulación y reproducción de la experiencia y el conocimiento humano. Tales características han permitido el control, en ciertas aplicaciones, donde las estrategias convencionales no son factibles [9].

En éste trabajo, se han combinado técnicas de lógica difusa con redes neuronales. El sistema neuro-difuso genera

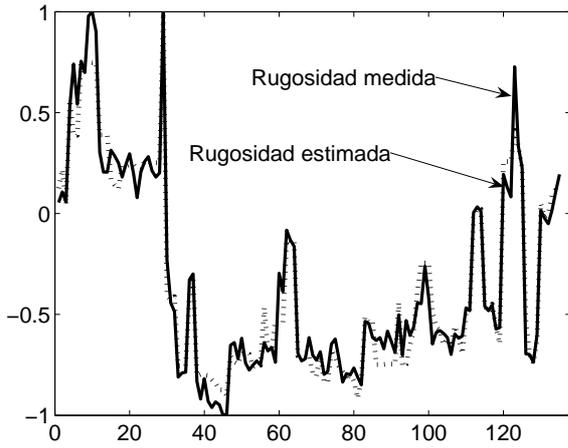


Figura 2. Desempeño de la red neuronal ANN(4,7,1), se presentan la rugosidad medida y la rugosidad estimada

una manipulación, en base al error de la rugosidad superficial y su derivada. Dicha manipulación llega al proceso y al modelo de ANN, retroalimentando el valor estimado de Ra, Fig. 3.

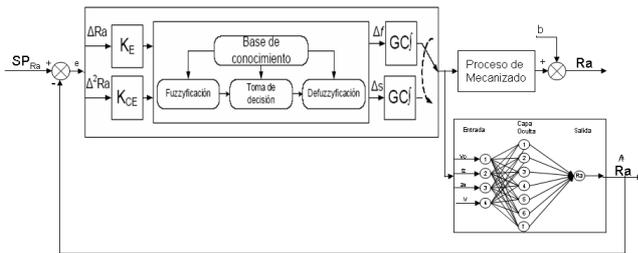


Figura 3. Esquema del Control Neuro-Difuso implementado. En base al error entre la referencia y el valor estimado de Ra, se evalúa y genera una manipulación en el controlador difuso, donde el usuario puede escoger que sea  $f$  ó  $s$ , con este cambio en la entrada del proceso y del modelo de ANN el valor de Ra va a tender a la referencia deseada.

El controlador difuso desempeña acciones en línea, las tareas básicas para el cálculo de la manipulación son:

- 1) Normalización de los datos.
- 2) Fuzzificación.
- 3) Reglas de Inferencia.
- 4) Defuzzificación.

Se ha realizado un diseño de controlador difuso tipo FUZZY-PI [3] para controlar Ra. Como entrada, el controlador tiene el error actual  $\epsilon_{Ra}(n)$  y el error en un tiempo de muestreo anterior  $\epsilon_{Ra}(n-1)$  y como salida el incremento (decremento) de la variable de manipulación ( $\Delta f$ ,  $\Delta s$ ).

$$e^T = [K_E \cdot \epsilon_{Ra}, K_{CE} \cdot \Delta \epsilon_{Ra}]; u = [GC \cdot \Delta f, GC \cdot \Delta s] \quad (1)$$

donde  $K_E$ ,  $K_{CE}$  y  $GC$  son factores escalares para las entradas y salidas respectivamente.

Para la construcción de las reglas de inferencia, se han hecho declaraciones lingüísticas con la siguiente sintaxis, utilizando la matriz de reglas que se muestra en la Fig. 4 para la velocidad de avance ( $f$ ) y de una manera muy similar para la velocidad del giro del husillo ( $s$ ):  
Si( $(\epsilon_{Ra}$  es NB) y ( $\Delta \epsilon_{Ra}$  es ZE)), entonces ( $\Delta u(n)$  es NB)

Siendo  $\Delta u(n)$  la manipulación, se puede elegir entre  $\Delta f$  ó  $\Delta s$ . Estas variables tienen cinco posibles conjuntos difusos (la nomenclatura utilizada es por sus siglas en inglés):

- NB "Negativo Grande"
- NS "Negativo pequeño"
- ZE "Cero"
- PS "Positivo Pequeño"
- PB "Positivo Grande"

Cada variable difusa tiene 5 funciones, generando 25 posibles combinaciones en la parte de antecedente y 5 opciones en el consecuente. Una matriz similar fue construida para la velocidad del husillo,  $s$ .

		$\Delta \epsilon_{Ra}$ CAMBIO EN EL ERROR				
		NB	NS	ZE	PS	PB
$\epsilon_{Ra}$	NB	NS	NB	NB	NB	NB
	NS	NS	NS	NS	NS	NB
	ZE	PS	PS	ZE	NS	NS
	PS	PB	PS	PS	PS	PS
	PB	PB	PB	PB	PB	PS

Figura 4. Matriz de Reglas para la velocidad de avance  $f$

Los valores o funciones activadas en cada celda representan el esquema de control FUZZY-PI.

La partición difusa utilizada para el control de velocidad de avance se muestra en la Fig. 5.

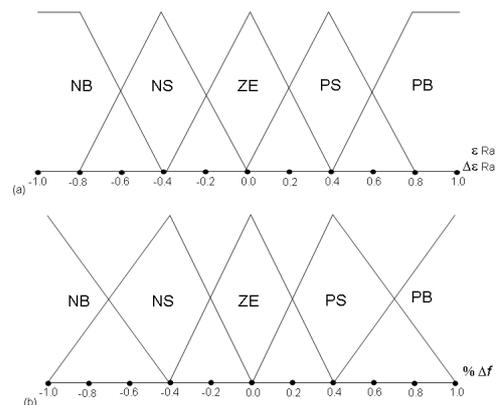


Figura 5. Partición difusa y funciones de membresía para (a)  $\epsilon_{Ra}$ ,  $\Delta \epsilon_{Ra}$  y (b)  $\Delta f$

La técnica de defuzzificación utilizada fue *centro de máximos*, siendo el mecanismo de inferencia **Max-Min**.

Similar información fue generada para la velocidad del husillo.

#### IV. SISTEMA EXPERIMENTAL

La experimentación se llevó a cabo en una máquina CNC de alta velocidad de tres ejes Huron KX-10 (Fig. 6) con capacidad de 20 KW, y un sistema de control de arquitectura abierta Siemens 840D. Este equipo es un sistema de alta precisión que permite alcanzar una velocidad de 30 m/min en los tres ejes. El centro de maquinado presenta alta rigidez y gran precisión.



Figura 6. Centro de maquinado vertical industrial CNC Huron KX-10

La herramienta de corte utilizada ha sido un cortador F511 con diámetro de 63 mm y un ángulo de  $90^\circ$ , cuenta con 5 insertos Komet BK 84 (APKT1203 PD-R), con 11 mm de largo y 3/16 plg. de grueso y un ángulo de  $11^\circ$ .

Dentro de la instrumentación se tiene un acelerómetro IMI621B41 de 100 mV/g de sensibilidad con un rango de frecuencia de 20 Hz, conector coaxial 10-32, 100  $\mu\text{g}$  de resolución y rango de frecuencia (3 dB) 48 a 1200 k cpm (0.8 a 20 kHz), el cual lee la señal de vibración siendo la dirección de medición el eje y (Fig. 7).

Para la captura de la señal se tuvo que filtrar por medio de un acondicionador ICP 480C02, ganancia unitaria y respuesta a la frecuencia desde 0.05 Hz hasta 500 KHz, voltaje de excitación de 28 VDC, máximo offset DC de  $< 30$  mV y ruido de banda ancha (1 Hz a 10 KHz) de 3.25  $\mu\text{V}$  rms.

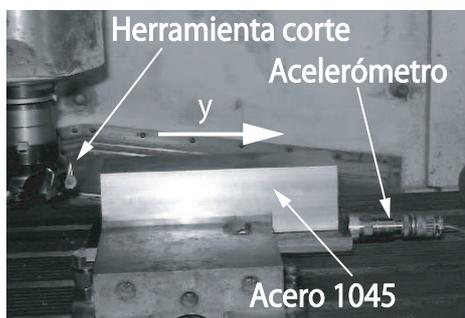


Figura 7. Sistema de Experimentación y evolución de la condición de corte

Para poder procesar la señal de vibración, se ha utilizado una tarjeta de adquisición de datos CompuScope, la cual

cuenta con una transferencia a sistemas RAM, 16 bit, 2.5 MS/s A/D, muestreo en dos canales simultáneamente y 75 dB de señal de ruido.

El sistema de adquisición de datos se puede observar en la Fig. 8.

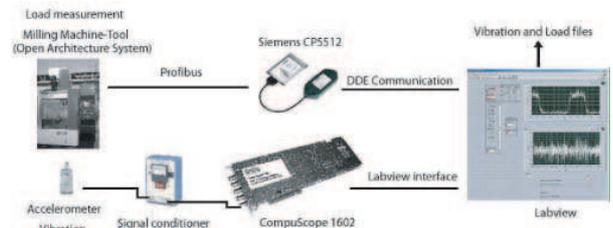


Figura 8. Sistema de adquisición de datos

Se realizaron pruebas para distintos valores de rugosidad superficial y con variaciones en los parámetros de corte programados, así como cambios en referencia durante el maquinado para verificar el desempeño de control del sistema.

Las pruebas fueron realizadas en acero 1045. Dentro de la interfaz hombre-máquina que se ha utilizado se han capturado los datos correspondientes a rugosidad superficial de referencia y la estimada por red neuronal. Al terminar un maquinado se mide el valor de rugosidad superficial real para cotejar los resultados y evaluar el desempeño del controlador.

En la Figura 9 se ha tomado la velocidad del giro del husillo ( $s$ ) como un valor fijo y se manipulará la velocidad de avance ( $f$ ). En esta figura se observa que el comportamiento que tiene el controlador al dar una manipulación hacia abajo, alcanzando la referencia.

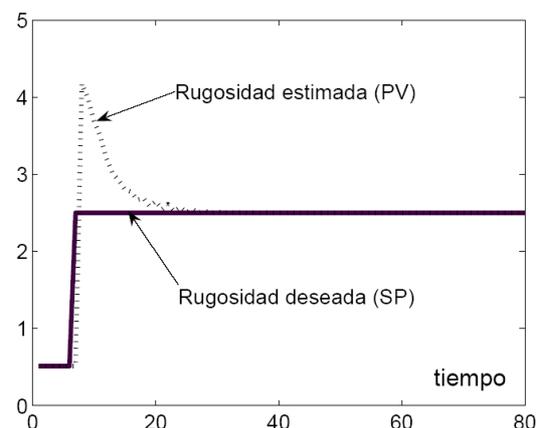


Figura 9. Se ha utilizado una velocidad fija en el giro del husillo  $s$  en 505 rpm, iniciando con una velocidad de avance  $f$  en 280 mm/min, realizando un cambio en referencia a un valor de Ra de 3.5 micras

En la Fig. 10 se han realizado experimentos donde se controla con la velocidad de giro del husillo  $s$  y se ha mantenido fija la velocidad de avance  $f$ . Se hizo una

prueba llevando la referencia hacia abajo obteniendo como resultado casi lo mismo que cuando la velocidad de avance era controlada.

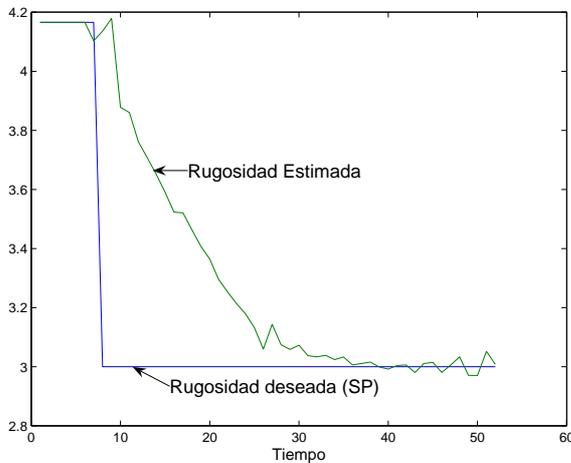


Figura 10. Se ha utilizado una velocidad de avance fija en  $f$  de 606 mm/min, iniciando con una velocidad de giro del husillos en 500 rpm, con un cambio en referencia de Ra a 3.0 micras

En la última figura se observa que al ir controlando con la velocidad de giro del husillo se alcanza la referencia deseada en un cambio en referencia hacia abajo.

## V. CONCLUSIONES

Uno de los beneficios de utilizar controladores difusos es que la experiencia y el conocimiento de los operadores pueden ser utilizados para generar la base de las reglas lingüísticas con menos esfuerzo. Otra de las ventajas que se puede observar a diferencia de un controlador convencional PID es que existe cierta flexibilidad en la manipulación gracias al manejo de las reglas de inferencia. En general un controlador difuso se adapta más a procesos que presentan no-linealidades y/o alta complejidad difícil de modelar, como es el caso de la rugosidad superficial.

## REFERENCIAS

- [1] Alique J.R. y Haber R.E. *Automatización de los Procesos de mecanizado a alta velocidad*, Automática e Instrumentación, Automatización de Procesos de Mecanizado, **351**, pp. 64-76, Mayo 2004
- [2] Correa M, Ramírez M, et.al., *Factores que afectan el acabado superficial en los procesos de mecanizado: técnicas de análisis y modelos*, 2004.
- [3] Driankov D, Hans Hellendoorn and Michael Reinfrank, *An Introduction to Fuzzy Control*, Ed. Springer-Verlag., 1993.
- [4] Ertekin Y. M. , Y. Kwon y Tzu-Liang Tseng *Identification of common sensory features for the control of CNC milling Operations under varying cutting conditions*, International Journal of Machine Tools and Manufacturing, **43**, pp. 897-904, 2003.
- [5] Guedea Elizalde F, *Aplicación de Lógica Difusa para Control de Temperatura en un Alimentador de Vidrio*, Tesis (Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería de Sistemas Computacionales), Tecnológico de Monterrey Campus Monterrey, México, 1996.
- [6] Morales-Menendez R, Aguilar M S, Rodríguez C, Guedea Elizalde F, Garza Castañón L, *Sensor-Fusion System for Monitoring a CNC-Milling Center*, LNCS, 2005.

- [7] Pamies, J.J., *Fundamentos Físicos do Corte dos Metais*, Edinova, Universidad Nova de Lisboa, 2001.
- [8] Peres C. R., Haber R.E., et. al. *Fuzzy model and hierarchical fuzzy control integration: an approach for milling process optimization*, Computers in Industry, **39**, pp. 199-207, 1999.
- [9] Reynoso M. G, *Modelación de un robot manipulador tipo Delta y diseño de un controlador supervisorio difuso para el control de posición*, Tesis (Maestro en Ciencias con Especialidad en Automatización), I Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, México, pp.35-42, 2005.
- [10] Wang Li-Xi, *A course in Fuzzy Systems and Control*, Ed. Prentice Hall, USA, 1997.