

ALGORITMO DIFUSO MULTICRITERIO PARA EL CONTROL DE UN PROCESO DE MICRO MAQUINADO ELECTROQUÍMICO PULSADO BIPOLAR

Catarino Aguilar Octavio¹, Granda Gutiérrez Everardo Efrén², Pérez Martínez José Arturo², Ojeda Misses Manuel Alejandro³

Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del progreso¹, Universidad Autónoma del Estado de México², Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo³

Ingeniería Informática

San Felipe del Progreso, Estado de México

7121546934

octavio.ca@sfelipeprogreso.tecnm.mx

RESUMEN.

En el presente trabajo se expone el desarrollo y validación de un algoritmo multicriterio basado en lógica difusa para el control de un proceso de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar (BPECMM por sus siglas en inglés). Este algoritmo se enfoca en permitir la fabricación de maquinados lineales tanto a profundidades deseadas como en superficies de trabajo que presentan perturbaciones. El algoritmo permite la evaluación de múltiples variables de entrada y generar respuesta para múltiples variables de salida convirtiéndolo en un sistema MIMO, generando una adaptación precisa a las variaciones en el proceso de manufactura. La validación del algoritmo se llevó a cabo en una estación compacta de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar, especialmente diseñada y fabricada para este propósito. Esta validación incluyó pruebas exhaustivas que demostraron la efectividad del algoritmo en la reducción del sobre corte y la mejora del acabado final del maquinado.

Palabras clave: Maquinado electroquímico, Lógica difusa, Manufactura, Sistema computacional.

ABSTRACT.

This work presents the development and validation of a multi-criteria algorithm based on fuzzy logic for the control of a bipolar pulsed electrochemical micro machining (BPECMM) process. This algorithm focuses on allowing the manufacture of linear machining both at desired depths and on work surfaces that present disturbances. The algorithm allows the evaluation of multiple input variables and generate response for multiple output variables, converting it into a MIMO system, generating a precise adaptation to variations in the manufacturing process. The validation of the algorithm was carried out in a compact bipolar pulsed electrochemical micromachining station, specially designed and manufactured for this purpose. This validation included extensive testing that demonstrated the effectiveness of the algorithm in reducing overcutting and improving the final machining finish.

Keywords: Electrochemical machining, Fuzzy logic, Manufacturing, Computational system.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de mecanizado electroquímico (ECM, por sus siglas en inglés) y su variante BPECMM donde se incorpora una fuente pulsada bipolar, es una técnica de manufactura avanzada que utiliza la disolución anódica controlada para remover material de una pieza de trabajo [1] [2] [3]. En el BPECMM, la herramienta de trabajo comúnmente polarizada al cátodo y la pieza de trabajo polarizada al ánodo de la fuente de voltaje se sumergen en un electrolito conductor. Cuando se aplica un voltaje, el material de la pieza de trabajo se disuelve en el electrolito debido a la acción electroquímica. Este proceso no genera fuerzas mecánicas ni calor significativo, lo que lo hace ideal para maquinado de materiales duros y frágiles, así como para la creación de formas complejas y detalladas [4]. El ECM se emplea ampliamente en la industria aeroespacial, médica y de fabricación de moldes, debido a su capacidad para producir acabados superficiales de alta calidad y tolerancias precisas [5].

La lógica difusa emula el razonamiento humano en situaciones de incertidumbre y vaguedad mediante el uso de conjuntos y reglas difusas. En el maquinado electroquímico, se emplea para gestionar y ajustar dinámicamente parámetros como la corriente eléctrica, el voltaje y el flujo de electrolito, con el fin de mejorar la precisión y calidad del mecanizado. [6].

La implementación de la lógica difusa en el maquinado electroquímico ha demostrado eficacia al minimizar el sobre corte y las imperfecciones superficiales. Este enfoque permite una respuesta adaptable y continua a las variaciones del proceso, mejorando el acabado superficial y la precisión dimensional del producto final. Los sistemas de control basados en lógica difusa pueden integrar múltiples criterios y variables, ofreciendo una solución flexible y optimizada para el control de procesos complejos como el Maquinado Electroquímico y sus variantes, como el BPECMM[7].

Los investigadores responden al comportamiento impredecible de las variables en el maquinado electroquímico incorporando técnicas de control adaptativas. En el artículo [8], se presenta una técnica difusa adaptativa que ajusta dinámicamente la corriente y el voltaje del proceso en tiempo real, según las condiciones actuales de maquinado. Aunque los resultados experimentales muestran mejoras significativas en precisión y calidad

superficial comparado con métodos tradicionales, el sistema se limita al ajuste de variables eléctricas, excluyendo aspectos críticos como la distancia inter electrodos y el flujo de electrolito. El artículo [9], destaca la aplicación de un sistema de control difuso en el maquinado de microcomponentes mediante procesos electroquímicos. Utilizando sensores en tiempo real, el sistema monitorea y ajusta continuamente los parámetros de maquinado. Los resultados muestran una notable reducción en las desviaciones dimensionales y una mejora significativa en el acabado superficial de los microcomponentes, posicionándolo como una solución efectiva para la manufactura de alta precisión en sectores como la electrónica y la biomédica.

El avance tecnológico ha permitido que numerosos investigadores desarrollen técnicas basadas en soft computing [10] [11] [12] [13], como las redes neuronales, las cuales pueden aprender a partir de las magnitudes de las variables involucradas en los procesos de maquinado electroquímico para determinar los valores ideales de estos parámetros. Aunque cada estudio se enfoca en un criterio específico, al considerar todos estos trabajos como un conjunto, es posible interrelacionar sus hallazgos y crear un sistema que aproveche sus resultados, eliminando la necesidad de realizar experimentación para cada caracterización. Implementar técnicas de este tipo en trabajos previos para obtener parámetros ideales de configuración para futuros proyectos resulta sumamente atractivo. Sin embargo, es fundamental contar con una cantidad considerable de datos para entrenar una red neuronal de manera efectiva y confiar en los resultados generados.

La incorporación de más de una estrategia de control permite generar algoritmos robustos que puedan atacar de varios frentes al problema, tal como se menciona en el trabajo [14], donde se introduce un sistema híbrido que combina lógica difusa con algoritmos genéticos para controlar y optimizar el proceso de maquinado electroquímico. La combinación de lógica difusa y algoritmos genéticos gestiona la incertidumbre y la variabilidad del proceso, optimizando los parámetros de control en tiempo real. Aunque este enfoque híbrido mejora la eficiencia del proceso, reduce el tiempo de maquinado y mejora el acabado superficial respecto a los sistemas convencionales, requiere una cantidad considerable de datos para la optimización de los parámetros mediante algoritmos genéticos. Además, la mayoría de los estudios se centran en variables eléctricas, descuidando aspectos críticos como el flujo de electrolito, la distancia inter-electrodos y la pendiente de la corriente de maquinado, que deben ajustarse continuamente durante la penetración en la pieza de trabajo.

2. DESARROLLO

2.1. Estación compacta de micro maquinado.

Como parte indispensable del proyecto y para satisfacer una necesidad fundamental, se diseñó y construyó una estación compacta de micro maquinado electroquímico de 3 ejes coordinados para la incorporación y validación del algoritmo de control. Este prototipo cumple con las exigencias actuales de esta

línea de investigación. Su diseño compacto y estructura rígida facilitan el transporte, mientras que la integración de todas las secciones en una única estructura optimiza la operatividad. Además, la centralización de las conexiones electrónicas en un solo punto simplifica el mantenimiento y las actualizaciones, dicha estación puede ser apreciada en la Figura 1.

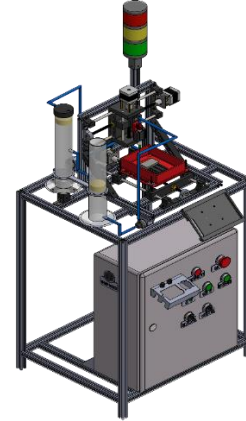


Figura 1: Estación Compacta de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar.

2.2. Control difuso de Múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO).

Basado en la revisión de la literatura y en el análisis del comportamiento de las variables del proceso BPECM, se diseñó un sistema de control utilizando lógica difusa, cuyo diagrama se muestra en la Figura 2.

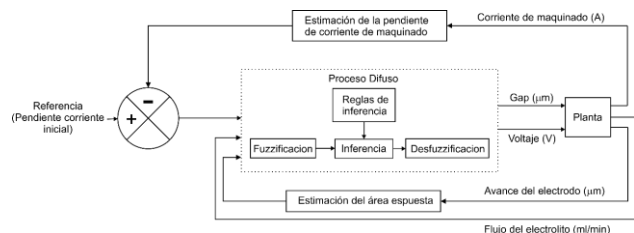


Figura 2: Control difuso (MIMO) para proceso BPECM.

El control toma como primera variable de entrada la pendiente de la corriente de maquinado debido a su relación con la velocidad de remoción de material y que a su vez se relaciona directamente con la distancia inter electrodos [15].

A medida que el proceso progresa y la herramienta penetra en la pieza de trabajo, la corriente de maquinado se ve alterada debido al incremento del área expuesta entre la herramienta y la pieza de trabajo. Por consiguiente, el área expuesta se convierte en la segunda variable de entrada en el sistema difuso, dado que su variación afecta directamente la magnitud de la corriente de maquinado. La tercera variable de entrada en el sistema de control difuso es el flujo de electrolito, cuyo impacto en la corriente de maquinado y el efecto de sobre corte se ha verificado en experimentos anteriores. La inclusión de esta variable añade un criterio adicional para evaluar el rendimiento del sistema.

Como resultado del control, se generan dos variables de salida: en primer lugar, se ajusta la distancia inter electrodos según sea necesario, y también se controla el voltaje de polarización para compensar lo que el desplazamiento mecánico no logra. Este enfoque asegura maquinados uniformes que alcanzan la profundidad y geometría deseadas, reduciendo el sobre corte y dispersando los remanentes del proceso de manera efectiva.

2.3. Variables Difusas.

Las variables difusas ofrecen la capacidad de manejar medidas de incertidumbre al permitir categorizar un valor según su grado de pertenencia, a diferencia de las variables binarias que adoptan valores de verdadero o falso. Estas variables utilizan etiquetas lingüísticas para su identificación. El sistema de control difuso desarrollado y validado en la estación de micro maquinado emplea un conjunto de 15 etiquetas lingüísticas, distribuidas en conjuntos de 3 para cada variable de entrada y salida. Estas etiquetas se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Etiquetas lingüísticas de variables difusas

Tipo Variable	Variable	Etiqueta lingüística
Entrada	Error de la pendiente de corriente de maquinado	NE (Negativo)
		CE (Cero)
		PO (Positivo)
	Área Expuesta	IN (Inicial)
		ME (Media)
		AV (Avanzada)
	Flujo Electrolito	BA (Bajo)
		ES(Estable)
		AB(Abundante)
Salida	Distancia Inter Electrodos	CR (Cerca)
		NO (Normal)
		LE (Lejos)
	Voltaje	MI (Mínimo)
		RE (Regular)
		AL (Alto)

2.4. Conjuntos Difusos.

Cada variable de entrada y salida se representa mediante un conjunto difuso, que utiliza funciones de membresía del tipo Z, S y Gaussianas en esta investigación. Para normalizar las variables, se aplicó el método de máximos y mínimos, ajustándolas a un intervalo específico: de -1 a 1 para evaluar el parámetro del error de la pendiente de corriente de maquinado, y de 0 a 1 para las demás variables involucradas en el estudio.

2.4.1. Variable de entrada “Error en la pendiente de maquinado”.

La variable de error permite estimar de manera indirecta la distancia inter electrodos. Los movimientos permitidos de la herramienta de trabajo tienen una resolución de 10 μm gracias al sistema mecánico. A través de experimentos, se ha determinado que la distancia óptima inter electrodos para el proceso de

maquinado es de 240 μm , mientras que el rango aceptable varía entre 230 y 250 μm . Cuando el valor del error cae dentro de los límites del conjunto NE (Negativo) durante el mecanizado, indica que la distancia inter electrodos ha disminuido por debajo del umbral de 230 μm , lo que puede afectar negativamente el proceso. Por otro lado, cuando el error se encuentra dentro de los límites del conjunto CE (Cero), la distancia es cercana o igual a los 240 μm , ideal para un maquinado efectivo. Si el error está dentro del conjunto PO (Positivo), la distancia supera los 250 μm , lo que puede reducir la eficiencia de la remoción de material las funciones de membresía se observan en la Figura 3.

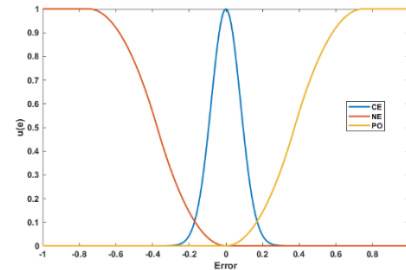


Figura 3: Funciones de membresía usadas para evaluar el error de la pendiente de maquinado (mA/S).

2.4.2. Variable de entrada “Área Expuesta”.

Durante el proceso de maquinado, a medida que la herramienta avanza verticalmente, el área expuesta entre la herramienta y la pieza de trabajo aumenta, afectando la corriente de maquinado. Considerar este criterio permite ajustar las variables de salida del proceso. Específicamente, se define que hasta una profundidad de 160 μm , el área expuesta pertenece al conjunto inicial (IN). Cuando el área expuesta está en el rango de más de 160 μm y menos de 640 μm , pertenece al conjunto intermedio (ME), y cuando supera los 640 μm , forma parte del conjunto avanzado (AV). Estos criterios de pertenencia ayudan a gestionar eficazmente las condiciones del proceso de maquinado, estas funciones de membresía e se muestran en la Figura 4.

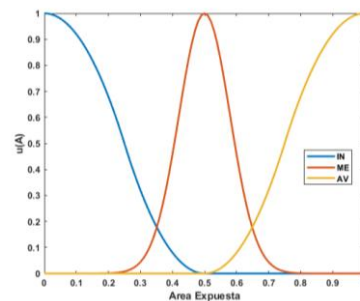


Figura 4: Funciones de membresía usadas para evaluar el área expuesta (mm^2).

2.4.3. Variable de entrada “Flujo del electrolito”.

A través de experimentos previos, se estableció una correlación entre la variación del flujo de electrolito suministrado en el proceso BPECMM y los efectos resultantes en la Corriente de

maquinado y el sobre corte. En consecuencia, se decidió incluir esta variable como una tercera entrada en el sistema. El conjunto BA (Bajo) indica que el flujo de electrolito está por debajo de los 105 ml/min. Cuando se encuentra en un rango mayor a 105 ml/min, pero menor a 120 ml/min, pertenece al conjunto ES (Estable), y superando los 120 ml/min pertenece al conjunto AB (Abundante). Las funciones de membresía que evalúan esta variable se detallan en la Figura 5.

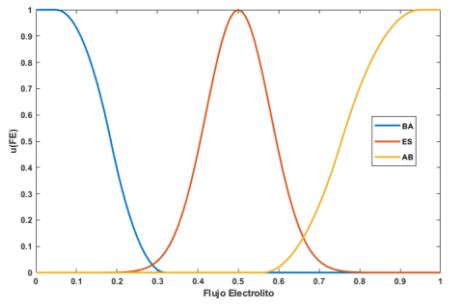


Figura 5: Funciones de membresía usadas para evaluar el flujo de electrolito (ml/min).

2.4.4. Variable de salida "Distancia Inter electrodos".

La corriente de maquinado se destaca como la variable más crucial del proceso, ya que proporciona una estimación indirecta de la distancia inter electrodos. Además, su evolución a lo largo del tiempo permite determinar la pendiente de la corriente de maquinado, reflejando así el área expuesta entre la herramienta y la pieza de trabajo. El sistema mecánico ofrece una resolución de 10μm, lo que permite ajustar el movimiento de la herramienta a esta escala precisa. El término "LE" (lejos) se emplea cuando la distancia inter electrodos excede los 250μm. Por el contrario, cuando esta distancia es inferior a 230μm, se considera que pertenece al conjunto "CE" (cerca). Si la distancia se mantiene alrededor de 240μm y no supera los límites de los conjuntos anteriores, se clasifica como perteneciente al conjunto "NO" (normal). Esta clasificación detallada permite una precisión óptima en el control del proceso, dichas funciones de membresía se muestran en la Figura 6.

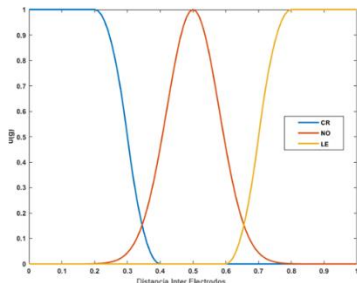


Figura 6: Funciones de membresía para la variable distancia inter electrodos.

2.4.5. Variable de salida "Voltaje".

La segunda variable de salida es el voltaje de polarización suministrado durante el proceso BPECMM, cuyas funciones de membresía se ilustran en la Figura 7. Este voltaje se regula dentro de un rango de 3 a 7 V, considerando las limitaciones del sistema mecánico. Esta regulación complementa el ajuste de la distancia inter electrodos y permite modificar la magnitud de la corriente de maquinado y su pendiente, asegurando una remoción constante de material. Para lograr esto, se utilizan los conjuntos MI (mínimo), RE (regular) y AL (alto).

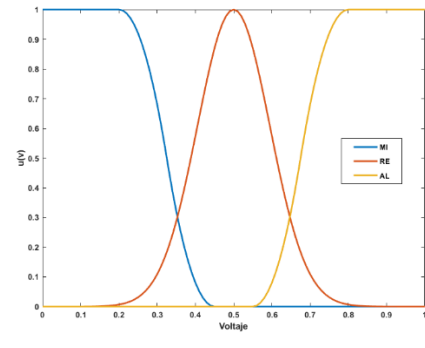


Figura 7: Funciones de membresía para la variable de salida Voltaje (V).

3. PRUEBAS Y RESULTADOS.

Se decidió evaluar la respuesta del sistema desarrollado mediante un maquinado con desplazamiento lineal que no siguiera una trayectoria uniformemente plana. Se propuso colocar la pieza de trabajo con una inclinación de 8.9°, como se observa en la Figura 8.

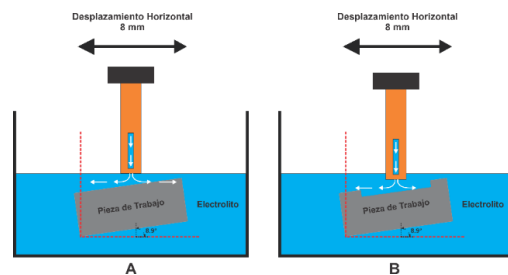


Figura 8. Prueba de maquina lineal con inclinación de 8.9° al inicio del proceso (A), transcurrido un periodo de tiempo de maquinado (B).

Para fines prácticos se definirá a la prueba de barrenado lineal con perturbación como (PLCP) por sus siglas. Para esta prueba los parámetros de configuración se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de configuración para Prueba PLCP

Variable	Magnitud
Frecuencia	25 kHz
Amplitud pulso de maquinado	5 V
Amplitud pulso limpieza	3 V
Ciclo de trabajo	50%
Electrolito	H ₂ O con una concentración en masa de 16.6% de NaCl
Material de trabajo	Acero AISI 1018
Distancia Inter electrodos inicial	240 μ m
Electrodo	Estructura tubular de acero con un diámetro de 603 μ m
Relación de pulsos bipolares	12:1
Flujo electrolito	110 ml/min
Presión Sistema neumático	6.3 kPa
Profundidad deseada	250 μ m
Desplazamiento lineal	10 mm
Inclinación de la pieza de trabajo	8.9°

Para conocer la profundidad final se establecieron 8 puntos de medición tal como se muestra en la Figura 9.

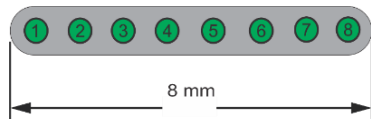


Figura 9: Puntos de medición para prueba

Los resultados de esta prueba se presentan en la Tabla 3. En ellos se observa que la distancia final alcanzada disminuye en función de la dirección de la inclinación. Las diferencias entre los distintos puntos de medición no superan los 10 μ m, resolución mínima de desplazamiento vertical del sistema mecánico. Este dato sugiere que el material se está removiendo de manera homogénea a lo largo de la trayectoria y que el sistema está realizando ajustes precisos de descenso y ascenso conforme a la dirección de avance y la inclinación de la pieza de trabajo.

Tabla 3: Medición de profundidad en los distintos puntos

Prueba	Punto de medición	profundidad deseada (μ m)	profundidad alcanzada (μ m)	Diferencia (μ m)
PLCP	1	250	256	6
	2	250	253	3
	3	250	249	-1
	4	250	249	-1
	5	250	251	1
	6	250	249	-1
	7	250	249	-1
	8	250	252	2

La Figura 9 ilustra la evolución de la corriente de maquinado durante la prueba PLCP. Se observan ajustes en el descenso de la herramienta para mantener la distancia inter electrodos cercana a 240 μ m, mostrando una evolución similar a un maquinado lineal. Sin embargo, al ampliar una sección de la gráfica, se puede apreciar cómo, durante el desplazamiento

lineal, el sistema difuso, mediante el monitoreo constante de las variables de interés, detecta variaciones de altura reflejadas en la disminución espontánea de la corriente de maquinado. En ese momento, el error de la pendiente de la corriente de maquinado presenta un mayor grado de pertenencia al conjunto NE, indicando que la distancia entre la herramienta y la pieza de trabajo ha disminuido. Como respuesta, el sistema ajusta la altura de la herramienta hasta que el valor del error de la pendiente de maquinado tenga un mayor grado de pertenencia al conjunto CE.

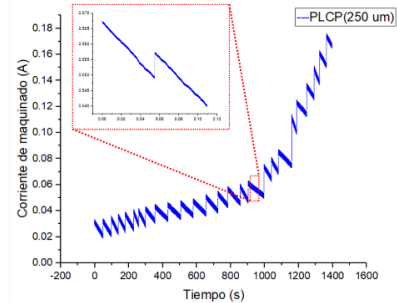


Figura 9: Corriente de maquinado para prueba PLCP

La micrografía presentada en la Figura 10 muestra los resultados de la prueba de maquinado, destacando el ensanchamiento de los laterales debido al tiempo de exposición y un ancho decreciente hacia la inclinación de la pieza. Los ajustes de descenso, distribuidos a lo largo de la trayectoria, responden a la resolución del sistema mecánico. La base de la herramienta de trabajo, al estar inclinada la pieza, no tiene una exposición uniforme, lo que prolonga el tiempo de remoción de material y los ajustes de descenso, así como la duración total de la prueba. La longitud final presenta un excedente de 126 μ m, es decir, 63 μ m por lateral, situando el error dentro del 10%, lo que confirma el correcto funcionamiento de la estación compacta de micro-maquinado y de la estrategia difusa incorporada para su control

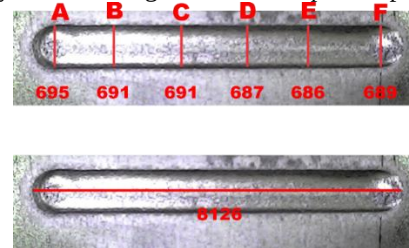


Figura 10: Micrografía de la prueba PLCP.

En esta prueba, la variable eléctrica del voltaje de polarización se ajustó dos veces para compensar las limitaciones del desplazamiento mecánico de la herramienta de trabajo, aumentando así la corriente de maquinado y manteniendo constante el valor de la pendiente del error. Los ajustes de descenso se realizaron con mayor frecuencia. La evolución del voltaje de polarización se puede apreciar en la Figura 11.

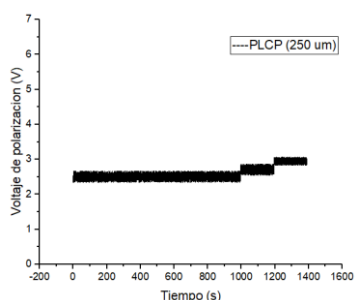


Figura 11: Voltaje de polarización de la prueba PLCP

Al incrementar la profundidad del maquinado, las variables de entrada adquieren una mayor relevancia. Un ejemplo claro es el flujo de electrolito, que, junto con el área expuesta y la pendiente del error de la corriente de maquinado, determina el momento específico para descender la herramienta de trabajo y, de ser necesario, ajustar el voltaje de polarización. En esta prueba, cuando el área expuesta incrementaba su pertenencia al conjunto ME y la pendiente del error de la corriente de maquinado se encontraba en el conjunto NE, el sistema difuso comenzaba a considerar el flujo del electrolito. Este flujo, al mantenerse en el conjunto ES y pasar al conjunto BA, indicaba una disminución en la distancia inter-electrodos. Por tanto, además de ajustar el descenso de la herramienta, era necesario modificar el voltaje para incrementar la remoción de material y alcanzar la distancia inter-electrodos inicial.

4. CONCLUSIONES

La estrategia difusa propuesta para controlar la estación de micro maquinado ha demostrado ser efectiva, manteniendo un margen de error en el sobre corte del 8 al 15%, lo cual se encuentra dentro de la resolución mínima del sistema mecánico. La evaluación y ajuste de las salidas del sistema difuso se ven favorecidos por la incorporación de variables como el área expuesta, el error en la pendiente de maquinado y el flujo de electrolito. Este último actúa como un indicador clave para ajustar la distancia inter-electrodos y el voltaje de polarización.

Se confirma que a medida que se aumenta la profundidad a alcanzar, aumenta el efecto de sobre corte, lo que implica ajustes más frecuentes en el descenso y el voltaje, llegando al límite de las capacidades físicas y eléctricas.

Como trabajo a futuro se evalúa la posibilidad de integrar el control del flujo de salida del electrolito y del flujo de aire. Esto permitiría compensar lo que no pueda ser realizado por el sistema mecánico y la fuente de voltaje.

5. REFERENCIAS

- [1] P. K. Jain y V. K. Jain, «Recent developments and research issues in electrochemical machining,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 14711-14729, Enero 2020.
- [2] H. El-Hofy, *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes*, 3er ed., CRC Press, 2021.
- [3] K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, S. Mahajan y P. Veyssièr, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 2nd ed., Elsevier, 2021.
- [4] D. Landolt, «Fundamentals and applications of electrochemical machining,» *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, n° 3, pp. 1424-1437, 2019.
- [5] M. B. da Silva, J. L. O. Ferreira y A. R. Machado, «Electrochemical machining of complex geometries using pulsed current,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, n° 2, pp. 1823-1832, marzo 2020.
- [6] A. Mahmood, M. A. Razzaq y S. Masood, «Fuzzy Logic Control of Electrochemical Machining Process for Improved Surface Finish,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, n° 3, pp. 2305-2313, Marzo 2021.
- [7] P. Kumar y S. Singh, «Optimization of Electrochemical Machining Using Fuzzy Logic-Based Control System,» *IEEE Access*, vol. 9, pp. 45123-45134, 2021.
- [8] M. S. Ali y A. H. Ibrahim, «Adaptive Fuzzy Logic Control for Optimization of Electrochemical Machining Parameters,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, n° 5, pp. 3462-3470, Mayo 2021.
- [9] H. K. Lee y J. S. Park, «Fuzzy Logic-Based Control System for Precision Electrochemical Machining of Microcomponents,» *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 26, n° 2, pp. 897-905, Abril 2021.
- [10] D. K. Kasdekar, V. Parashar y C. Arya, «Artificial neural network models for the prediction of MRR in Electro-Chemical Machining,» p. 772-779, 2018.
- [11] K. Kumar y P. Sahoo, «Artificial Neural Network Modeling for the Prediction of Surface Roughness in ECM,» *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 9, n° 26, pp. 9251-9254, 2014.
- [12] D. Xu, Z. Yi y C. Cheng, «A Neural Network-based Ensemble Prediction using PMRS and ECM,» *th Hawaii International Conference on System Science*, n° 47, 2014.
- [13] G. Shang y C. Sun, «Application of BP Neural Network for Predicting Anode Accuracy in ECM,» *International Symposium on Information Science and Engineering*, 2008.
- [14] D. Singh y R. K. Gupta, «Intelligent Electrochemical Machining Process Control Using Fuzzy Logic and Genetic Algorithms,» *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 18, n° 3, pp. 1234-1242, Julio 2021.
- [15] I. Gallegos Miranda, *Sistema Computacional para la remoción controlada de Material en un proceso de Maquinado Electroquímico por Pulsos*, Atlacomulco: Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación de la Universidad Autónoma del Estado de México, 2019.