

Control difuso mediante la estimación mejorada de la distancia inter-electrodos en un proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos

Octavio Catarino Aguilar, Iván Gallegos Miranda,
Everardo Efrén Granda Gutiérrez, José Luis Tapia Fabela,
José Arturo Pérez Martínez

Universidad Autónoma del Estado de México,
México

octavio_ca@outlook.com, igallegosmiranda@outlook.es,
eegrandag@uaemex.mx, joseluis.fabela@gmail.com,
japerezm@uaemex.mx

Resumen. El Micro-Maquinado Electroquímico por Pulsos es un método de manufactura no convencional, en donde la herramienta y la pieza de trabajo no están en contacto, por lo que no se presenta desgaste, se evita la generación de microgrietas y rebabas metálicas, siendo esto una virtud para la fabricación de piezas de tamaño reducido. Para garantizar la precisión del proceso, es necesario mantener la distancia inter-electrodos constante, para una remoción homogénea de material. Esta distancia no se puede medir directamente, por lo que se debe estimar de manera indirecta mediante otras variables del proceso: voltaje y corriente. Durante el maquinado, el área expuesta del electrodo se modifica conforme este penetra en la pieza de trabajo, por lo que la corriente medida no indica de manera directa la dimensión de la distancia inter-electrodos. Para ello, se debe considerar la evolución del área de exposición del electrodo, ajustando de forma automática el valor de esta. Una vez que se determinó la distancia interelectrodos, se diseñó un controlador difuso cuyo objetivo es asegurar que esta distancia se mantenga en el orden de 240 μm , inclusive si cambia el área de exposición del electrodo, controlando el avance vertical del mismo. La implementación del control difuso con ajuste automático de la estimación de la distancia inter-electrodos demuestra ser una alternativa eficaz para alcanzar la profundidad deseada, manteniendo una remoción de material uniforme. Los resultados muestran que el esquema propuesto permite estimar el valor real de la distancia inter-electrodos logrando alcanzar la profundidad deseada a lo largo de la trayectoria horizontal, maquinando un canal de manera homogénea con una precisión limitada solamente por la resolución de movimiento del sistema mecánico, en el orden de 20 μm .

Palabras clave: Control por lógica difusa, micro-maquinado electroquímico por pulsos (PECMM), procesos de manufactura no convencional.

Fuzzy Control through Improved Estimation of Inter-Electrode Gap in a Pulsed Electrochemical Micro-Machining Process

Abstract. Pulsed Electrochemical Micro-Machining is a non-conventional manufacturing process where the tool electrode and the work piece are not in direct

contact, avoiding wear, microcracks as well as the production of metallic burrs; thus, making it virtuous for the machining of reduced-dimension pieces. To ensure the precision of the process, the inter-electrode distance must be kept constant, to allow a homogeneous removal of material. Such a distance cannot be directly measured; then, it must be indirectly estimated through another process variables: voltage and current. During the process, the exposed area of the electrode is modified due to the incursion of the tool electrode into the workpiece; therefore, the measured current does not necessarily indicate the dimension of the inter-electrode distance. Then, the evolution in the exposed electrode area must be considered, automatically adjusting its value. Once the inter-electrode distance was determined, a fuzzy logic controller was designed in order to ensure a constant inter-electrode distance in the range of 240 μm , even if variations on the exposed area of the electrode occur, by means of the vertical movement of the electrode. The implementation of the fuzzy controller with automatic adjustment of inter-electrode distance calculation, demonstrates to be an effective alternative to reach the desired depth, keeping a uniform material removal. Results show that the proposed scheme allows estimating the correct value of the inter-electrode distance, homogeneously machining a channel along a horizontal trajectory with a precision limited by the resolution of movement of the mechanical system, in the order of 20 μm .

Keywords: Fuzzy logic control, pulsed electrochemical micro-machining (PECMM), non-conventional manufacturing processes.

1. Introducción

La creciente demanda en la fabricación de componentes de tamaño reducido en áreas como robótica, biología, microelectrónica, material biomédico, entre otros; da auge a la investigación en el desarrollo de procesos de micro manufactura [1]. Como aplicaciones de este proceso se pueden mencionar: la fabricación de micro boquillas, micro engranes, instrumentos quirúrgicos (bisturíes), microtubos, micro inyectores, micro bujes entre otras aplicaciones [2].

El proceso de micro manufactura se realiza mediante los métodos convencional y no convencional. El proceso de manufactura convencional se genera mediante fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo, produciendo micro fisuras y residuos metálicos; por otra parte, el proceso de manufactura no convencional realiza la remoción de material sin tener contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo, de tal manera que no son generadas micro fisuras ni rebabas metálicas, lo cual ayuda a que la pieza de trabajo mantenga su integridad física, por ejemplo, en el fuselaje de un avión [3].

Uno de los procesos de manufactura no convencional es el Micro-Maquinado Electroquímico por Pulsos (PECMM, por sus siglas en inglés), en donde la herramienta y la pieza de trabajo no tienen contacto entre sí, existiendo una brecha entre ambas; a la que se denomina *gap* (distancia inter-electrodos) [4]. Dicho proceso aprovecha la corriente eléctrica y el fenómeno de disolución anódica para la remoción de material metálico [5].

El controlar PECMM presenta cierta complejidad, debido a que los resultados obtenidos al término del proceso tales como: tasa de remoción de material (MRR por sus siglas en inglés), diámetro de sobre corte (DOC por sus siglas en inglés) y

profundidad de maquinado, dependen de diversos parámetros de entrada. Dentro de estos parámetros se encuentran: frecuencia de la señal, ciclo de trabajo, distancia inter-electrodos, flujo del electrolito, corriente de maquinado y voltaje de polarización [6, 7].

El proceso de Maquinado Electroquímico (ECM por sus siglas en inglés), presenta la dificultad de medición de la distancia inter-electrodos, al estar en el orden de los micrómetros, y sin un rango visible, al estar inmersa en el fluido de trabajo, y dentro de la pieza, por lo que es muy complejo realizar la medición de dicha distancia implementando sensores tradicionales [8, 9]. Es por ello que, para saber la magnitud de la distancia inter-electrodos se estima indirectamente mediante la corriente de maquinado [10].

De acuerdo con [11], el utilizar técnicas de control convencionales resulta ineficiente para poder controlar el proceso ECM; por tal motivo, el implementar sistemas de control moderno resulta ser una alternativa viable, debido a que el proceso de maquinado electroquímico es no lineal; es decir, su comportamiento con respecto al tiempo tiene una variación que no es constante y sus variables necesitan ser reajustadas en tiempo real. Por tal motivo en [12] se reporta la experimentación del proceso ECM, en donde afirman que el controlar el proceso únicamente controlando los parámetros voltaje y flujo del electrolito resulta insuficiente debido a que nunca alcanza la estabilización.

En [13] se presenta un estudio para mantener constante la remoción de material, simulando el proceso utilizando la técnica de lógica difusa, la cual asemeja el control al actuar del ser humano, ya que se basa en comprender los cuantificadores de calidad para nuestras inferencias y así determinar qué grado de pertenencia tienen el criterio a evaluar a los denominados conjuntos difusos. Resultó que, para mantener una remoción de material constante, es indispensable mantener la misma distancia inter-electrodos en todo el transcurso del proceso y con ello se garantiza una profundidad homogénea. Por tal motivo, en un trabajo previo mostrado en [14] se establece una propuesta para controlar la distancia inter-electrodos utilizando la técnica de lógica difusa, manteniendo constante la corriente de maquinado inclusive si la pieza de trabajo presenta perturbaciones; el control actúa ajustando y manteniendo constante la corriente de maquinado.

En [15], se implementa un control difuso para la estimación de la tasa de remoción de material en un proceso de maquinado por descarga; su planta, basada en el modelo Mamdani recibe 3 parámetros, los cuales son: corriente de descarga, tiempo del pulso en alto, y tiempo de pulso en bajo. Considera 6 reglas de pertenencia para así predecir la tasa de remoción de material. El control difuso fue evaluado usando el software Matlab y comparando los resultados con pruebas de maquinado reales; bajo los mismos criterios, el modelo difuso probó tener una remoción de material en un 97.36% de similitud con las pruebas experimentales reales, lo cual permite considerar a la lógica difusa viable para ser usada como técnica de modelado.

Si bien en el trabajo no es implementada como técnica de control, comparando los resultados estimados y los obtenidos puede ser considerada como prospecto para su implementación como técnica de control en un sistema de maquinado electroquímico por pulsos.

Técnicas basadas en redes neuronales también han sido puestas a prueba para la estimación de tasa de remoción de material y avance de la pieza de trabajo, tal como se explica en [16], donde se implementa una red neuronal que admite 4 criterios: la

corriente de maquinado, el tiempo de encendido y pagado de la fuente y la frecuencia; en su capa oculta cuenta con 3 neuronas y como salida se obtiene la tasa de remoción que permite determinar la velocidad de avance de la herramienta de trabajo. Para entrenar la red neuronal se usaron 19 muestras y 3 para su validación. Comparadas con las pruebas reales, se tuvo una diferencia del 1 al 5 %; sin embargo, la implementación de una red neuronal no considera que la pieza posiblemente puede presentar irregularidades en su superficie, lo cual en el peor de los casos podría llevar al sistema a un corto circuito.

En [14], se identifica que al finalizar el proceso la profundidad de avance de la herramienta de trabajo en comparación a la profundidad deseada presenta una diferencia. Por tal motivo, en este trabajo se presenta el desarrollo de un control basado en lógica difusa donde se mantiene constante la distancia inter-electrodos y la remoción de material, a través del monitoreo de la corriente de maquinado, generando el cálculo real de la distancia inter-electrodos al considerar dentro del sistema el incremento del área de exposición del electrodo, que se modifica cada vez que la herramienta de trabajo desciende y que, al estar en movimiento durante las trayectorias lineales, alteran la magnitud de la corriente de maquinado.

2. Metodología

En la Fig. 1. se muestra el esquema de los elementos del sistema de micro maquinado electroquímico por pulsos; se integra por un recipiente donde se coloca la pieza de trabajo, la cual está inmersa parcialmente en un electrolito de $H_2O + NaCl$ en una concentración del 16.6% (en masa), con una conductividad de $217.1 \frac{mS}{cm}$ o $4.7 \Omega * cm$. El electrolito fluye por un tubo de acero inoxidable de $700 \mu m$ de diámetro externo y $490 \mu m$ de diámetro interno, con un flujo de 1 L/min.

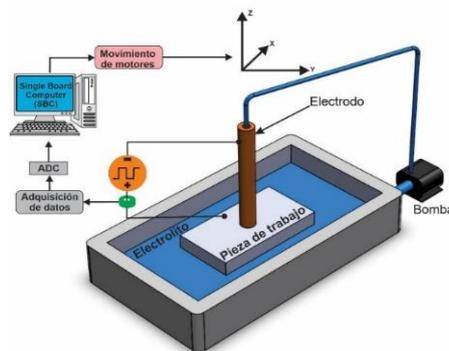


Fig. 1. Diagrama general del sistema.

Se realizaron pruebas de maquinado con la finalidad de determinar la causa del aumento en la profundidad final obtenida, mediante el análisis de los datos como se presenta en la Fig. 1. Se observa que el tiempo entre un ajuste y otro se prolonga; cada ajuste corresponde al descenso de un paso ($20 \mu m$) de la herramienta de trabajo que se actualiza una vez que la corriente vuelve a un valor mínimo debido al aumento en la

distancia inter-electrodos. Este descenso ocasiona un incremento en la corriente de maquinado tras cada ajuste, pues el electrodo se vuelve a acercarse a la pieza. Esto da como resultado que la velocidad real de remoción de material disminuye, debido a que mientras se realiza el proceso de maquinado, la herramienta de trabajo penetra en la pieza de trabajo agregando área de exposición entre ambas, y reduciendo la densidad de corriente que se distribuye en dicha área. De esta forma, el valor real de la distancia inter-electrodos que estima el sistema no es el correcto y por ello el tiempo entre un ajuste y otro se prolonga; tras este aumento el tiempo de exposición es mayor y da como resultado una profundidad final mayor a la esperada, puesto que la distancia real a la que corresponde no ha sido determinada adecuadamente.

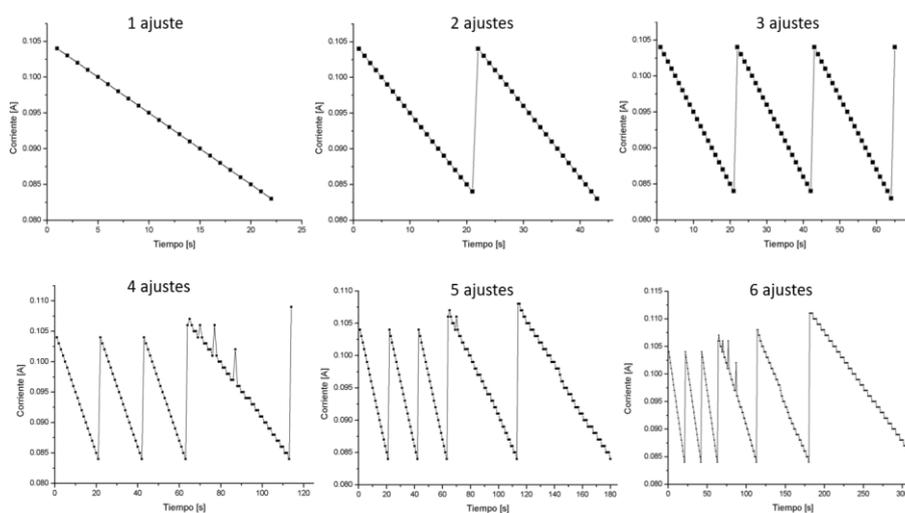


Fig. 2. Comportamiento de la corriente de maquinado: tras cada ajuste, el tiempo necesario para actualizar el valor de la corriente se incrementa debido al error en la estimación de la distancia inter-electrodos.

Tras visualizar el comportamiento de la corriente de maquinado después de cada ajuste, se analizó la pendiente de esta, implementando la ecuación (1):

$$Pendiente = \frac{I_2 - I_1}{S_2 - S_1}. \quad (1)$$

donde:

I_1 =punto máximo en la corriente,

I_2 =punto mínimo en la corriente,

S_1 =punto máximo en el tiempo,

S_2 =punto mínimo en el tiempo.

En la Fig. 3 (a) se muestra el patrón de cambio de la magnitud del valor de la pendiente de la corriente de maquinado; al graficar el valor de la misma con respecto a los ajustes realizados Fig. 3 (b), presenta un comportamiento creciente. Entonces, lo que se propone es generar un ajuste para mantener constante la magnitud de la pendiente de la corriente de maquinado; así, en cuanto el sistema identifique una variación en la

pendiente, este, elevará o hará descender la herramienta de trabajo y de esta forma el sistema difuso recibirá un valor más cercano al real de la distancia inter-electrodos, compensando de manera natural el incremento en el área de exposición debido a la penetración del electrodo en la pieza.

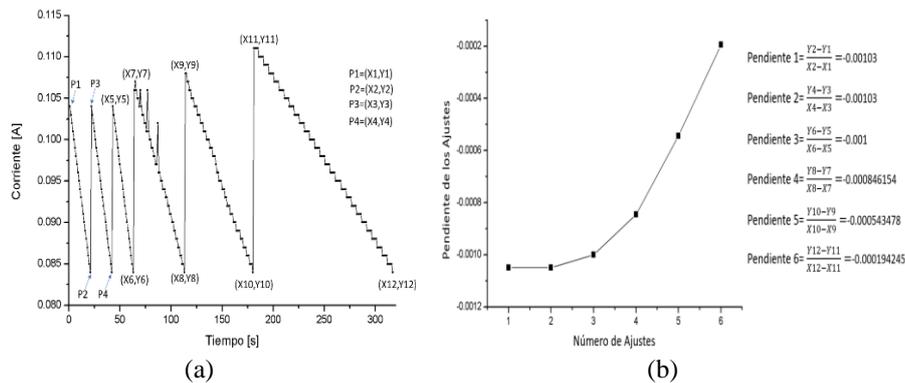


Fig. 3. Patrón del comportamiento de la pendiente, previo a la incorporación del cálculo mejorado de la distancia inter-electrodos.

2.1. Ajuste de la distancia inter-electrodos con base en la pendiente

Para considerar el área expuesta adicional y entonces poder reajustar la corriente de maquinado de referencia que usa el control difuso para estimar y controlar la distancia inter-electrodos durante el proceso, se implementó el cálculo de la pendiente de la corriente de maquinado y su reajuste correspondiente como parte complementaria al estimar la distancia inter-electrodos por parte del sistema computacional.

En la Fig. 4 se presenta el diagrama de flujo de esta adecuación, donde se establecen los parámetros iniciales de la distancia inter-electrodos. Se crea un arreglo del tamaño de 5 elementos vacío, donde se almacenará la corriente de maquinado; una vez que el arreglo está lleno, se obtiene un promedio para después calcular la pendiente, que se compara con la pendiente inicial. Si presenta una variación significativa, se hace una solicitud de reajuste al sistema computacional que determinará si la herramienta de trabajo se eleva o descende. Como respuesta habrá un cambio en el valor de la corriente de referencia que usa el sistema computacional para la estimación de la distancia inter-electrodos. Con este reajuste se pretende mantener una remoción de material controlada y constante que, como resultado, genere que la profundidad de maquinado final sea la deseada.

Se ha comprobado que, implementando técnicas de control difuso se puede controlar el proceso PECMM [14], manteniendo la distancia inter-electrodos lo más cercana a los $240 \mu m$ [19], por ello para alcanzar la profundidad deseada se incorporó el reajuste de la corriente de maquinado de referencia basada en el cálculo de su pendiente al modelo difuso ya existente, integrándose en la sección de retroalimentación de la planta, como se puede observar en la Fig. 5. El sistema de control se basa en el diseño Mamdani y el modelo SISO (single input- single output), la entrada al sistema de control es el error de la distancia inter-electrodos, que es estimada mediante el

monitoreo de la corriente de maquinado y el reajuste de la pendiente de la corriente de referencia, haciendo uso de la ecuación (2):

$$g = \frac{A}{I_{RMS} * (R * c)}, \tag{2}$$

donde:

g = distancia inter-electrodos,

A= área de exposición del electrodo,

I_{RMS}= corriente RMS de maquinado,

R= resistividad del electrolito,

c= (densidad²*velocidad de remoción específica) = (7.87²) (3.0*10⁻²).

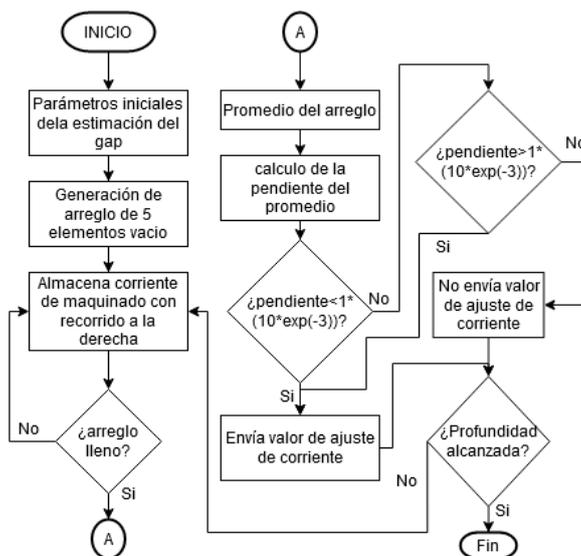


Fig. 4. Diagrama de flujo para ajuste de distancia inter-electrodos con base en el valor de la pendiente en la corriente de maquinado.

Por otro lado, la salida es el movimiento descendente o ascendente de la herramienta de trabajo, que se lleva a cabo mediante el sistema mecánico y los motores a pasos. La sección de reajuste de la corriente de referencia, se calcula y aplica fuera del regulador y antes del cálculo de distancia inter-electrodos; de esta manera, si el sistema detecta una variación en la magnitud de la pendiente se realizará un reajuste en la corriente de referencia. Este reajuste será contemplado al momento de estimar la distancia inter-electrodos, ya que se estará contemplando el área expuesta adicional para que de esta forma se pueda realizar una remoción de material controlada y constante a lo largo de la trayectoria de maquinado alcanzando la profundidad final deseada.

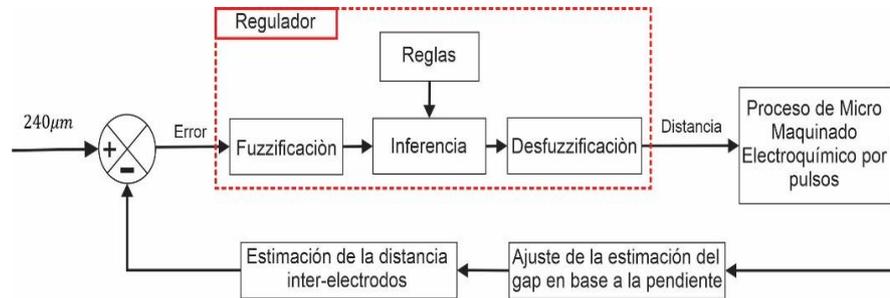


Fig. 5. Modelo SISO del sistema control implementando reajuste por pendiente.

Tabla 1. Conjuntos difusos del universo de discurso error.

Variable Lingüística	Función	Pertenencia a los conjuntos difusos
Negativo	μ_L	$(-60, 60)$
Nulo	μ_T	$(-60, 0, 60)$
Positivo	μ_L	$(-60, 60)$

Tabla 2. Conjuntos difusos del universo de discurso distancia.

Variable Lingüística	Función	Pertenencia a los conjuntos difusos
Desciende electrodo	μ_L	$(120, 480)$
Mantén electrodo	μ_T	$(120, 240, 480)$
Eleva electrodo	μ_L	$(120, 480)$

Los conjuntos difusos de la entrada o “error” de la distancia inter-electrodos que implementa el control se muestran en la **Tabla 1**, los parámetros fueron definidos con base en la caracterización y a la resolución del sistema mecánico.

En la **Tabla 2** se muestran los conjuntos difusos de la distancia requerida para desplazar el electrodo verticalmente y mantener el punto de referencia.

Los conjuntos difusos de entrada utilizados para el control, son representados en 3 intervalos, teniendo representación de saturación abierta como μ_L , y representaciones triangulares como μ_T , tal como se aprecia en la **Tabla 1**. Por otro lado, los conjuntos difusos de salida del universo de discurso “Distancia”, se definen con 3 intervalos con formas μ_L y μ_T .

La relación de los conjuntos difusos de entrada y salida dan como resultado las reglas de inferencia mostradas en la Tabla 3, que permiten definir el comportamiento del sistema. De esta manera, si el control difuso a su entrada tiene un error negativo significa que la distancia inter-electrodos está en un valor mayor a los $240 \mu m$; como respuesta, el sistema descenderá el electrodo en intervalos de $20 \mu m$ hasta que la distancia inter-electrodos se encuentre lo más cercana al punto de referencia. De forma contraria, si el error a la entrada del control difuso es positivo como respuesta el sistema elevará el electrodo en intervalos de $20 \mu m$ hasta alcanzar el punto de referencia,

Tabla 3. Reglas de inferencia.

Regla	Reglas de inferencia
1	Si (Error es negativo) entonces (Desciende electrodo)
2	Si (Error es nulo) entonces (Mantén electrodo)
3	Si (Error es positivo) entonces (Eleva electrodo)

Tabla 4. Parámetros iniciales y finales en pruebas de maquinado.

Prueba	Duración del proceso PECMM [min.]	Longitud preestablecida en el sistema [mm]	Longitud resultante del proceso PECMM [mm]	Profundidad del canal resultante [μm]
1	16	10	10.78	240
2	33	10	10.89	500

mientras el error a la entrada del control sea nulo, el electrodo se mantendrá sin movimiento vertical.

La técnica de defusificación empleada fue el centroide, la cual transforma la salida difusa en un número real, ubicando la coordenada *zeta* (*z*) del centro de gravedad del conjunto difuso resultante a la salida y se explica en la ecuación (3) [17]:

$$\text{centroide} = \frac{\int z\mu_Y(z)dz}{\int \mu_Y(z)dz}, \quad (3)$$

donde:

z = universo de discurso,

μ_Y =función de pertenencia al conjunto de salida.

Para la validación del sistema de control se realizaron dos pruebas de maquinado lineal de 1 cm de longitud, a profundidades de 240 μm y 500 μm , respectivamente. El voltaje de la fuente usada fue de 5 V con un ciclo de trabajo al 50 % y con pulsos a una frecuencia de 40 kHz. Como material de trabajo se usó acero estructural AISI-1018, y como electrolito una mezcla de $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ en una concentración en masa del 16.6%. Las mediciones de profundidad se realizaron con un medidor de alturas digital de la marca FLOWLER modelo 48976.

3. Resultados

La **Tabla 4** presenta los resultados tras implementar el control difuso agregando el ajuste de la pendiente de la corriente de referencia al calcular la distancia inter-electrodos. La **prueba 1** tuvo una duración de 16 minutos, con una longitud lineal resultante de 10.78 mm, .78mm más de lo esperado y dentro del margen de error esperado, la profundidad homogénea alcanzada fue la deseada, de 240 μm . Por otra parte, la **prueba 2**, tuvo una duración de 33 minutos, su longitud lineal resultante fue de 10.89 mm, 0.89 mm más de lo esperado, debido a que el control está enfocado en el eje Z, mientras que en el desplazamiento horizontal del eje Y y X aún no se implementa

dicho control; la profundidad final fue de $500 \mu\text{m}$, al igual que la prueba número 1 se alcanzó la profundidad deseada.

En la Fig. 6 y Fig. 7 se muestra el comportamiento de la corriente de maquinado a lo largo de todo el proceso de las pruebas realizadas. Es visible el continuo ajuste de la pendiente, donde cada ajuste corresponde a un movimiento de $20 \mu\text{m}$ de la herramienta de trabajo. Se observa el crecimiento en el valor de referencia de la corriente de maquinado que toma el sistema de control difuso para realizar el avance vertical de la herramienta. El aumento de este valor en la corriente se debe a que, mientras el proceso se realiza, la herramienta de trabajo se introduce cada vez más en la pieza de trabajo aunado al movimiento horizontal de la misma, originando que el área expuesta entre pieza y herramienta aumente debido a que los bordes laterales de la herramienta de trabajo entran en contacto con el proceso de maquinado electroquímico. De este modo, la corriente requerida para realizar la misma remoción debe incrementarse si se desea mantenerla constante.

Para poder estimar la distancia inter-electrodos real, el sistema considera el valor de la pendiente del primer ajuste que realiza el control difuso, y lo toma como referencia durante todo el proceso, manteniendo el valor de esa pendiente lo más cercano al primer valor. En el momento que se detecta un cambio, se realiza un reajuste en el valor de la corriente de maquinado; a su vez, la etapa de estimación de distancia inter-electrodos toma ese valor y lo despeja en la ecuación (2) para obtener el área de exposición de la herramienta de trabajo.

Con ello, este parámetro es recalculado en cada ajuste y es posible estimar el valor real de la distancia inter-electrodos considerando el aumento del área de exposición conforme la herramienta de trabajo penetra en la pieza de trabajo. El control difuso, al tener el valor real de la distancia inter-electrodos puede realizar el descenso de la herramienta de trabajo en periodos más cortos, siempre manteniendo la distancia inter-electrodos cercana a los $240 \mu\text{m}$ (dentro de los límites de resolución de movimiento del sistema mecánico, de $20 \mu\text{m}$).

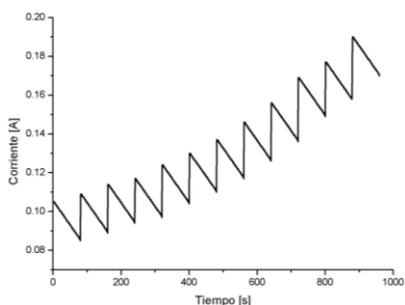


Fig. 6. Corriente de maquinado en prueba de $240 \mu\text{m}$ de profundidad.

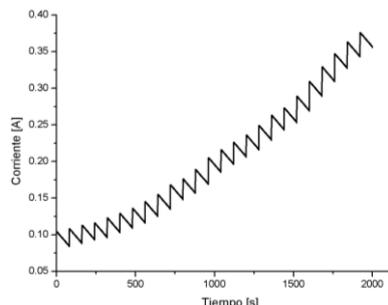
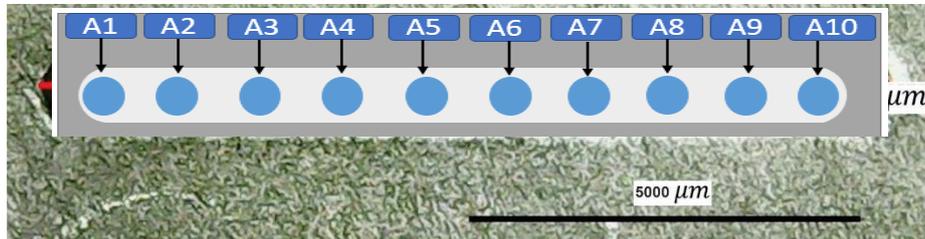


Fig. 7. Corriente de maquinado en prueba de $500 \mu\text{m}$ de profundidad.

El aumento en la corriente de maquinado que se puede observar tanto en la Fig. 6 y Fig. 7, es resultado de la compensación del aumento en el área de exposición entre la herramienta y pieza de trabajo y los ajustes escalonados se dan como resultado del ajuste de área de exposición en la ecuación (2), que es usada para la estimación de la distancia inter-electrodos.



cercana al valor deseado.

Fig. 8. Largo del Canal con profundidad de 240 μm.

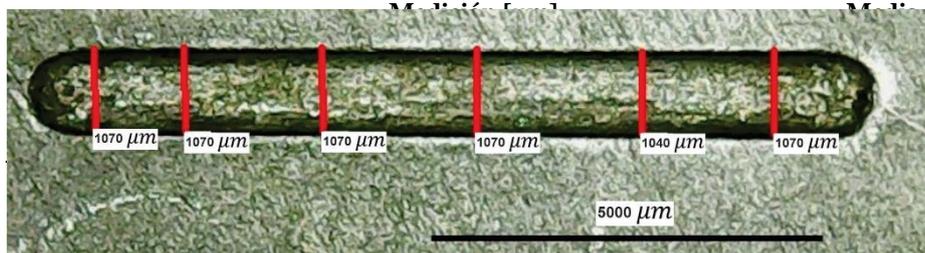


Fig. 9. Ancho del canal con profundidad de 240 μm.

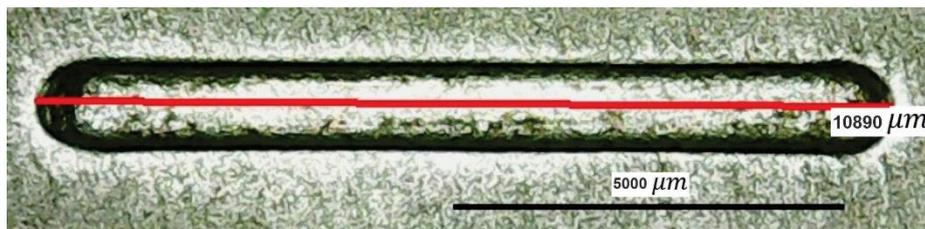


Fig. 10. Largo del Canal con profundidad de 500 μm

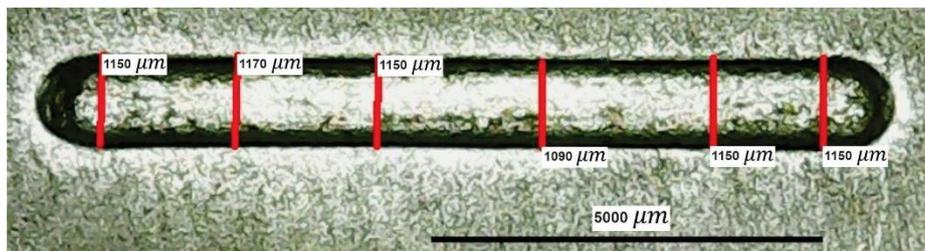


Fig. 11. Ancho del canal con profundidad de 500 μm.

La Fig. 8 muestra la longitud lineal de la prueba de maquinado número 1 cuya profundidad es de 240 μm, en la Fig. 9 se muestra el ancho del canal resultante de la prueba número 1, mismo que se aprecia ser homogéneo a lo largo de toda la trayectoria. La longitud lineal de la prueba número 2 cuya profundidad fue de 500 μm se puede apreciar en la Fig. 10 así mismo en la Fig. 11 se puede observar el ancho resultante del canal el cual es lo más homogéneo posible a lo largo de toda la trayectoria.

Para comprobar que se alcanzó la distancia deseada se realizaron 10 mediciones distribuidas equitativamente a lo largo los maquinados resultantes, tal y como se muestra en la Fig. 12.

Obteniendo el valor real de la distancia inter-electrodos mediante el reajuste de la corriente de maquinado de referencia por pendiente e integrándolo al sistema de control difuso, es posible obtener una remoción de material controlada y constante a lo largo de maquinados lineales, como se puede comprobar al analizar las mediciones de las dos pruebas realizadas en los 10 puntos establecidos y notar que el valor de la profundidad en todos ellos es similar a la deseada por el usuario tal y como se puede apreciar en la Tabla 5.

4. Conclusiones

PECMM es un proceso de maquinado no convencional, utilizado para el barrenado de orificios pequeños en materiales conductores. Este proceso es difícil de controlar debido a que en él intervienen fenómenos físicos, químicos, eléctricos, entre otros. Aunado a esto, aplicarlo a maquinados con movimientos en otros ejes, como en el caso del maquinado de canales, agrega un nivel de dificultad mayor, ya que la herramienta de trabajo ya no se encuentra estática como en la generación de barrenos ciegos, si no por el contrario se encuentra en movimiento constante mientras se adentra en la pieza de trabajo, lo cual genera que el área de exposición entre herramienta y pieza de trabajo se modifique constantemente y, por ello, el proceso no es candidato para la implementación de técnicas de control lineal o tradicional pero sí para técnicas alternativas como lo es la lógica difusa.

El presente trabajo tiene como finalidad estimar la distancia inter-electrodos de manera precisa, mediante la incorporación de la pendiente de la corriente de maquinado, que es un indicador de la velocidad de remoción de material, así como con la implementación de un control difuso, manteniendo dicha distancia constante en un valor cercano a los $240 \mu m$, y así poder alcanzar la profundidad homogénea cuando se realiza el maquinado de canales.

Tras analizar e identificar que la pendiente en la corriente de maquinado es un factor que también se debe considerar e integrar al control difuso, fue posible generar una remoción de material controlada y constante a lo largo del canal maquinado, generando reajustes en la corriente de maquinado en el lazo de retroalimentación que usa el control difuso para la estimación de la distancia inter-electrodos. Este ajuste considera la actualización del área expuesta entre herramienta y pieza de trabajo. Como resultado, la profundidad final alcanzada fue homogénea a lo largo de todo el maquinado del canal y del mismo valor al esperado; claro está que dicha distancia está determinada en un intervalo de $20 \mu m$, siendo este valor el mínimo permisible por la resolución de movimiento del sistema mecánico implementado.

La diferencia entre la profundidad final y la deseada ya no se presenta, ya que con la implementación propuesta se obtuvieron canales maquinados con profundidad homogénea a lo largo de toda su longitud.

Como trabajo a futuro, se pretende integrar esta solución a maquinados con formas complejas integrando al control difuso criterios que permitan controlar la velocidad de remoción, mediante la manipulación de la fuente de voltaje. Asimismo, implementar el

control en los dos ejes restantes del sistema mecánico, manteniendo una remoción controlada en todos los ejes del sistema cartesiano en donde se reproduce el proceso.

Referencias

1. Grover, M.: Fundamentos de manufactura moderna. Mc Graw Hill (2010)
2. Kalpakjian, S., Schmid, S.R.: Manufactura, ingeniería y tecnología. Prentice Hall (2005)
3. Hassan, A., Gawad, E.H.: Advanced machining processes. McGraw-Hill (2005)
4. Katz, Z., Tibbles, C.: Analysis of micro-scale ECM Process. The International Journal of Advance Manufacturing Technology, 35 (154), pp. 923–928 (2012)
5. Sengottuvel, P., Satishkumar, S., Dinakaran, D.: Optimization of multiple characteristics of EDM parameters based on desirability approach and fuzzy modeling. Procedia Engineering 64, pp. 1069–1078 (2013)
6. Shabgard, M., Badamchizadeh, M.G., Ranjbary, K.: Fuzzy approach to select machining parameters in electrical discharge machining (EDM) and ultrasonic-assisted EDM processes. Journal of Manufacturing Systems, 32 (1), pp. 32–39 (2013)
7. Mohd, A., Sarkheyli, A., Mohd-Zain, A., Habibollah, H.: Fuzzy logic for modeling machining process: a review. Artificial Intelligence Review 43(3), pp. 345–349 (2013)
8. Katz, Z., Tibbles J.C.: Analysis of micro-scale ECM Process. The International Journal of Advance Manufacturing Technology, 35 (154), pp. 923–928 (2012)
9. Klocke, F.: Results of surface integrity and fatigue study of PECM and PEO processed γ -TiAl for turbine applications. Procedia CIRP19 (3), pp. 131–136 (2016)
10. Lilong-Baoji, M., Cheng, P., Yun, K.: Effect of power signal waveform on shape accuracy in electrochemical drilling. Materials Science and Engineering, (392), pp. 1–8 (2018)
11. Hung Lea, V., Khanh Tran, D.: Extending fuzzy logics with many hedges. Fuzzy Sets and Systems, 1(1), pp. 45–52 (2018)
12. Keasberry, J.V., Labib, W.A., Atkinson, J., Frost, W.H.: A fuzzy logic control approach to electrochemical machining (ECM) In: Proceedings of the 34th International, Formerly the International Machine Tool Design and Research Conferences, 34, pp. 153–160 (2008)
13. Morteza-Sadegh, A.: Controlling electrochemical machining by using a fuzzy logic approach. Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production, 6(2), pp. 61–71 (2017)
14. Gallegos-Miranda, I., Pérez Martínez, J., Granda-Gutiérrez A.: Control de la distancia inter-electrodos en un proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos (PECM). Research in Computing Science 148(8), pp. 2015–2028 (2019)
15. Kohli, A., Wadhwa, A., Virmani, T., Jain, U.: Optimization of Material Removal Rate in Electrical Discharge Machining Using Fuzzy Logic. World Academy of Science. Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, 12, pp. 2839–2844 (2012)
16. Trias, A., Azli, Y., Nor, H., Kamal, K., Ade, E.: Predicting material removal rate of electrical discharge machining (EDM) using artificial neural network for high gap current, In: International conference on electrical, control and computer engineering (2011)
17. Sanahuja, S.: Sistemas de control con lógica difusa: métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK). Grado en matemática computacional. pp. 55–60 (2017)
18. Martínez-Alvarado, R., Granda-Gutiérrez, E.E., Zuñiga, L.M., Guerrero, R.: Pulsed power supply for electrochemical machining. In: IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC) 3(15), pp. 1–6 (2015)
19. Rajurkar, K.P., Wei, B., Kozak, J., McGeough, J.A.: Modelling and monitoring interelectrode gap in pulse electrochemical machining. In: CIRP Ann. - Manuf. Technol., 44(1), pp. 177–180 (1995)