

Influencia del flujo del electrolito en orificios micrométricos realizados con maquinado electroquímico

Iván de Jesús González^a, Everardo Efrén Granda Gutiérrez^a, Juan Fernando García Mejía^a, Ricardo Arturo Vázquez Robledo^b.

^a Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto Literario Ote. No. 100, Col. Centro, Toluca, CP 50000, idejesusg002@alumno.uaemex.mx, egrandag@uaemex.mx, fgarciam@uaemex.mx. Toluca, Estado de México.

^b Centro Regional de Desarrollo Espacial EdoMex, Agencia Espacial Mexicana. Anillo Perimetral 101, Parque Industrial ST, Atlacomulco, CP 50450, vazquez.ricardo@aem.gob.mx. Atlacomulco, Estado de México.

Resumen

Este trabajo describe la instrumentación electrónica asociada a un prototipo de Maquinado Electroquímico de un solo eje que se implementó con el objetivo de analizar la influencia del flujo del electrolito en el sobre corte producido en barrenos micrométricos. Se analizó el efecto de la interacción del flujo (37.3, 66.1 y 102.4 ml/min), voltaje de polarización del electrodo (3, 5 y 7 V) y frecuencia de la señal de polarización (1, 50 y 100 kHz), sobre el diámetro, profundidad y sobre corte resultante. Adicionalmente, se describe el método empleado para estimar el flujo y el desplazamiento de la herramienta de trabajo. La experimentación del maquinado se realizó 27 veces con 3 repeticiones donde los resultados mostraron que a mayor flujo el diámetro y sobre corte disminuye. Esto permite identificar condiciones adecuadas para incrementar la precisión del proceso de maquinado.

Palabras clave—Flujo de electrolito, Maquinado Electroquímico, Sobre corte, ESP 32.

Abstract

This paper describes the electronic instrumentation associated with a single-axis Electrochemical Machining prototype, which was implemented to analyze the influence of electrolyte flow on the overcut produced in micrometric holes. The effect of the interaction of the electrolyte flow (37.3, 66.1, and 102.4 ml/min), electrode polarization voltage (3, 5, and 7 V), and frequency of the polarization signal (1, 50, and 100 kHz) on the diameter, depth and resulting overcut, was analyzed. Additionally, the method used to estimate the electrolyte flow and displacement of the electrode tool is described. The experimentation was carried out 27 times with 3 repetitions; the results showed that the greater the flow, both: the diameter, and the overcut decrease. This allows the identification of suitable conditions to increase the precision of the machining process.

Keywords— *Electrolyte Flow, Electrochemical Machining, Overcut, ESP 32.*

1. INTRODUCCIÓN

El maquinado electroquímico (ECM, por las siglas en inglés de *Electrochemical Machining*) es un proceso de manufactura

en el cual intervienen diversos fenómenos como transporte de masa y energía, transferencia de calor y reacciones electroquímicas. Esta tecnología permite dar forma y acabados de alta calidad en aceros y otros metales [1]. El proceso incorpora varios componentes, principalmente: fuente de polarización, electrolito, sistema de recirculación y filtrado del electrolito y sistema mecánico. Durante el proceso, y como condición necesaria para que este se lleve a cabo, los electrodos deben estar separados por una distancia en el orden de los micrómetros, conocida como separación inter-electrodos (*gap*).

La remoción del material ocurre en una celda electrolítica debido al fenómeno de disolución que se produce en el ánodo (también llamado pieza de trabajo). La pieza se encuentra sumergida en un flujo rápido de electrolito que cierra el circuito, al suministrar una corriente eléctrica. Los iones metálicos se desprenden de la pieza de trabajo (ánodo) fluyendo hacia la herramienta de trabajo (cátodo) tomando la forma de esta [2].

Durante el maquinado de micro orificios la remoción del material se lleva a cabo en las cercanías de los electrodos, y en el orden de la distancia de separación entre ellos. Por lo tanto, se asocia un efecto de sobre corte; es decir, la eliminación de material en exceso, por lo cual es un indicador de la precisión del maquinado.

Se han llevado a cabo diversas investigaciones en cuanto al control del proceso mediante inteligencia artificial, con el objetivo de mantener una separación constante entre electrodos y perfeccionar el proceso, reduciendo el sobre corte. Un ejemplo de ello es el trabajo titulado "*Multiple input multiple output fuzzy control for pulsed electrochemical micro machining*" [3], en el que se implementa un sistema de control difuso que estima la posición del *gap* y la polarización de los electrodos, basándose en la evaluación del error en la pendiente de la corriente y el área de exposición. Como resultado, se redujo el sobre corte hasta en un 21% en comparación con la literatura.

Otro trabajo relevante es el estudio sobre "*Polarización con distintas formas de onda para la reducción del sobre corte en un proceso de maquinado electroquímico*" [4], en el que se concluye que la forma de onda triangular produce un menor sobre corte, pero con una menor profundidad del barreno, mientras que la forma de onda cuadrada genera el mayor sobre corte y una mayor profundidad.

En este contexto, se aprecia que los trabajos señalados no han contemplado el análisis del efecto de la variación en el flujo del electrolito en el sobre corte. Siendo el electrolito uno de los principales elementos que intervienen el proceso, en este trabajo, se pretende caracterizar el efecto que tiene el flujo de este en el sobre corte, con la finalidad de incrementar la precisión del proceso ECM. Para ello, se integra un prototipo que incorpora un sistema de posicionamiento lineal operado por un motor a pasos, y un microcontrolador ESP 32, una fuente de polarización con señales cuadradas, y un sistema de recirculación del electrolito con caudal ajustable mediante la modificación del voltaje de polarización de una bomba eléctrica.

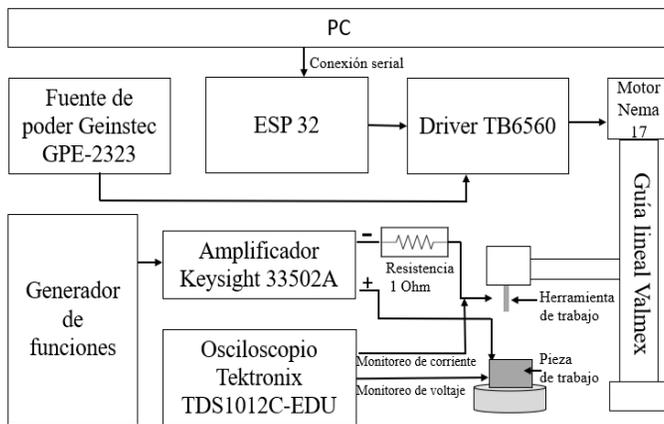
2. CONTENIDO

2.1 Instrumentación del proceso ECM

Para la construcción del prototipo se utilizó una guía de desplazamiento lineal impulsada por un motor a pasos NEMA 17 de 1.8° por paso, controlado por el integrado TB6560, el cual recibe un tren de pulsos enviados de forma serial por la placa de desarrollo DevKit, que incorpora un microcontrolador ESP 32.

En la Fig. 1 se observa el diagrama a bloques del prototipo ECM, que integra un generador de funciones configurado para producir una señal cuadrada. En el trabajo "Pulsed Power Supply for Electrochemical Machining" [5], Martínez-Alvarado y su equipo presentaron el diseño, construcción y validación experimental de una fuente de alimentación pulsada para ser aplicada en un proceso de maquinado electroquímico. Los resultados mostraron que la polarización con corriente continua produce deformaciones en la pieza de trabajo, pero cuando se aplica una señal cuadrada de alta frecuencia al electrodo con la fuente de alimentación pulsada, las deformaciones se reducen, motivo por el cual se utilizó esta forma de onda.

Fig. 1. Diagrama a bloques del prototipo ECM



Fuente: Elaboración propia a partir del ensamble de los componentes.

Para polarizar los electrodos se utilizó un generador de funciones Tektronix AFG1022, cuya salida se conecta a un amplificador de aislamiento Keysight 33502A. Este instrumento amplifica 5 veces la amplitud de la señal provista por el generador, y tiene una capacidad de corriente de salida de hasta 200 mA, suficiente para realizar el maquinado.

Por otra parte, el movimiento de la guía lineal que ajusta la posición del electrodo de trabajo es controlado por el microcontrolador ESP 32, que está programado para recibir la cantidad de pulsos necesarios para el movimiento a través del monitor serial que incorpora el IDE de Arduino. Para ello, el controlador TB6560 utiliza los pines CLK+, CLK-, CW+, CW- que se conectan al ESP 32 en los pines D22, GND, D23 y GND respectivamente.

2.2 Movimiento lineal

Para realizar la experimentación fue necesario conocer la distancia que recorre la herramienta de trabajo por pulso suministrado al motor a pasos. Para ello se utilizó un indicador de dial y se estableció un punto de inicio. Se realizaron dos configuraciones en el controlador TB6560: 1/8 y 1/16 de paso; en cada una de ellas se enviaron pulsos hasta encontrar la cantidad necesaria para avanzar 1 milésima de pulgada. Las pruebas se realizaron de forma ascendente (subiendo la herramienta) y para confirmar que no existiera pérdida de pasos, se repitió la prueba de forma descendente, para de esta forma descartar un posible efecto de histéresis en las mediciones. Los resultados se muestran en la Tabla 1, que presenta el incremento de pulsos y su relación con el desplazamiento de la herramienta de trabajo para la configuración de 1/8 de paso.

Tabla 1. Datos de desplazamiento en milésimas de pulgada (mil) para 1/8 de paso

Número de pulsos	Movimiento ascendente (mil)	Movimiento descendente (mil)
0	0	0
64	0.8	1
128	1.8	2
192	2.8	3
256	3.8	4
320	4.8	5
384	5.8	6
448	6.8	7
512	7.8	8
576	8.9	9
640	10	10.2
704	11	11.2
768	12	12.2
832	13	13.2
896	14	14.2
960	15	15.2
1024	16	16.2
1088	17	17

Fuente: Elaboración propia a partir la experimentación.

De acuerdo con los datos observados en la Tabla 1, se presenta en la Fig. 2 (a) que la herramienta de trabajo siempre regresa al punto inicial. Este comportamiento no se aprecia en la Fig. 2 (b), dando un indicio de que existe una histéresis en el movimiento, lo que podría afectar la precisión. Por tal motivo, se decidió hacer la experimentación con la configuración de 1/8 de paso; de este modo, se tiene que el movimiento del electrodo tiene una resolución de 0.3968 μm por cada pulso que se envía al controlador.

2.3 Flujo volumétrico

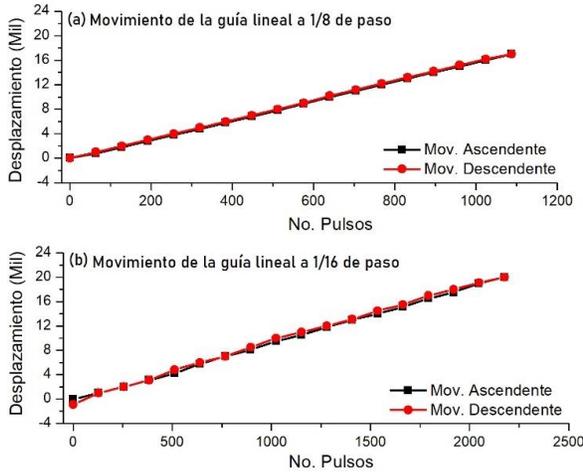
Para estimar el caudal del electrolito circulante en la herramienta de trabajo se empleó el método volumétrico utilizando la siguiente expresión (1):

$$Q = V/t \quad (1)$$

Donde:

- Q Caudal (ml/min)
- V Volumen (ml)
- t Tiempo (min)

Fig. 2. Grafica del movimiento de la guía de desplazamiento lineal a 1/8 (a) y 1/16 (b) de paso, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la experimentación del movimiento lineal.

El método volumétrico consiste en la medición directa del tiempo que tarda en llenarse (o vaciarse) un recipiente de volumen conocido [6]. Para estimar el caudal que pasa por la herramienta de trabajo se utilizó un recipiente con capacidad de 1 litro y una bomba de agua de 12 V CD (corriente directa) que hace circular el electrolito. En esta fase del experimento el objetivo consistió en variar el voltaje de polarización de la bomba, documentar el tiempo que se tarda en vaciar el contenedor de agua y calcular el flujo correspondiente a cada variación de voltaje aplicado a la bomba de agua. Para caracterizar la relación entre voltaje y flujo, se experimentó con 8 voltajes diferentes, cada uno con 3 repeticiones; la Tabla 2 muestra los valores promedio de los caudales obtenidos.

Tabla 2. Promedio de flujo con respecto al voltaje.

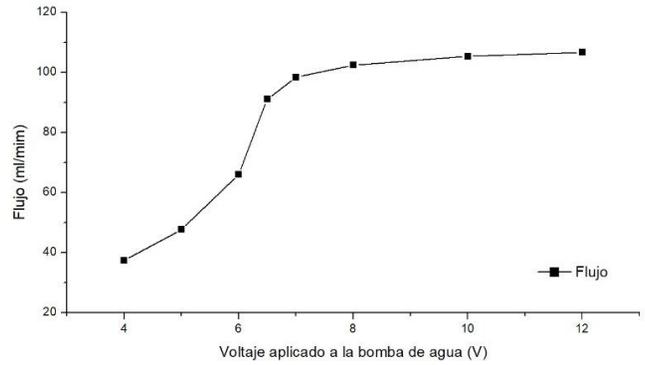
Voltaje(V)	Tiempo (min)	Flujo (ml/min)
4	26.77	37.4
5	20.95	47.7
6	15.12	66.1
6.5	10.97	91.2
7	10.16	98.4
8	9.76	102.4
10	9.48	105.5
12	9.37	106.8

Fuente: Elaboración propia a partir la experimentación.

Los resultados que se muestran en la Fig. 3 corresponden al flujo proporcionado por la bomba ante diferentes voltajes de

alimentación. Es notorio que en el intervalo de 4 a 8 V se identifica una variación significativa en el flujo, en tanto que, para voltajes más grandes, se obtiene prácticamente el mismo valor. Para efectos de estas pruebas, se determinó que, con los voltajes de 4, 6 y 8 V se caracteriza el flujo promedio mínimo, medio y alto de la prueba (37.4 ml/m, 66.1 ml/m y 102.4 ml/m respectivamente).

Fig. 3. Grafica de flujo respecto al voltaje aplicado a la bomba



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la experimentación.

2.4 Influencia del flujo del electrolito en el maquinado.

Con el propósito de identificar la relación entre el flujo del electrolito y el acabado obtenido en perforaciones realizadas con el proceso de maquinado electroquímico, se estableció una configuración con las siguientes variables:

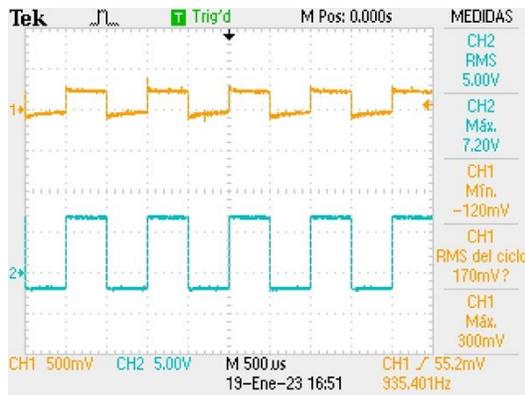
- Flujo de electrolito (ml/m): 37.4, 66.1 y 102.4
- Voltaje de polarización del electrodo (V): 3, 5 y 7
- Frecuencia de la señal de polarización (kHz): 1, 50 y 100

El experimento consistió en que por cada valor de flujo se evaluó cada valor de voltaje de polarización del electrodo con cada valor de frecuencia de la señal de polarización (forma de onda cuadrada, ciclo de trabajo del 50%), dando como resultado 27 experimentos con 3 réplicas cada uno.

El maquinado se realizó durante 2 minutos, monitoreando el comportamiento de la corriente que circula por la celda electrolítica y el voltaje de polarización (Fig.4). En esta figura, la forma de onda del canal 1 (arriba) corresponde a la señal de corriente obtenida mediante una resistencia en serie colocada al circuito de la celda electroquímica (ver Fig. 1), mientras que el canal 2 (abajo) es la señal de polarización proveniente del amplificador de aislamiento. El ejemplo corresponde a la polarización del electrodo con 7 V.

Como herramienta se utilizó un electrodo cilíndrico hueco de acero inoxidable AISI-316, de 565 μm de diámetro interno y 748 μm de diámetro externo. El electrolito es una solución acuosa de cloruro de sodio (NaCl) en una concentración al 20% en masa. La distancia inter-electrodos inicial fue de 240 μm, que se determinó utilizando el ESP 32 y el conteo de los pulsos a partir de la posición inicial en la superficie de la pieza de trabajo. El material de dicha pieza es acero al carbón AISI-1018, cuya superficie fue rectificadas y pulida.

Fig.4. Monitoreo de la corriente y el voltaje en el maquinado.

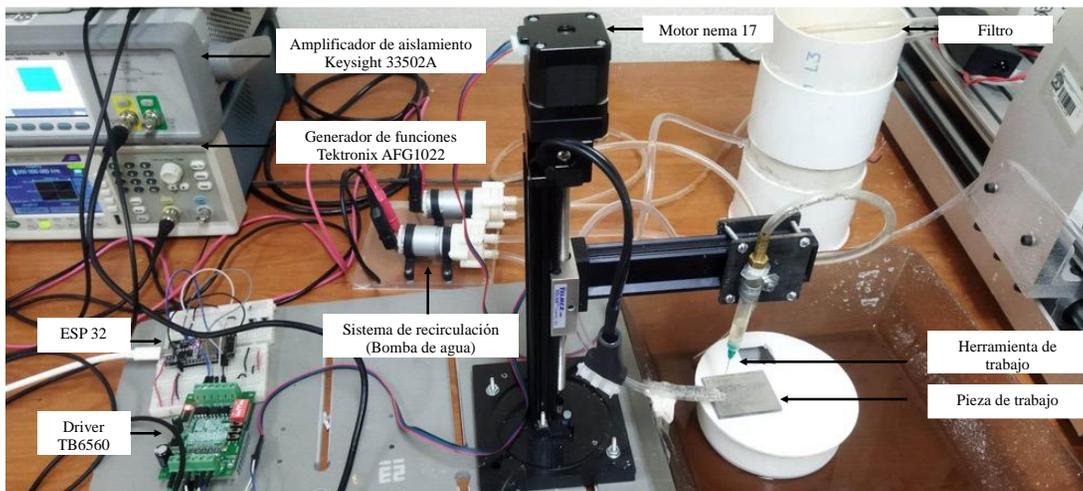


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la experimentación

En la Fig. 5 se presenta el prototipo utilizado, señalando sus principales componentes, tal como se describieron anteriormente (ver Fig. 1). Cabe mencionar que en el sistema de recirculación del electrolito se identifican dos bombas, ya que una de ellas es utilizada para inyectar el electrolito a la herramienta de trabajo y la segunda permite la recuperación del electrolito hacia el filtro, para su reutilización en el proceso. Sin embargo, solamente es modificado el voltaje de la bomba de inyección para el ajuste del flujo.

Después de la experimentación, las variables de salida evaluadas fueron el diámetro del orificio, la profundidad y el sobre corte. Es importante recalcar que la escala de maquinado de estos barrenos se encuentra en el orden de los micrómetros, por lo que para realizar las mediciones de sus dimensiones se utilizó un microscopio USB de 600X.

Fig.5. Prototipo físico utilizado para la realización de los experimentos de maquinado con ECM.



Fuente: Elaboración propia a partir del ensamble de los componentes.

La Tabla 3 muestra los resultados promedio de las variables de salida. Al analizarlos, se aprecia que el flujo tiene influencia en el sobre corte y diámetro, mas no en la profundidad. Es destacable que se encontró que a menor frecuencia (1 kHz) los barrenos se ven mejor definidos, como se muestra en la Fig.6 (a), en comparación con los que se evaluaron al mismo voltaje, pero con mayor frecuencia (100 kHz), en la Fig.6 (c). Sin embargo, los barrenos que se obtuvieron a 50 kHz, mostrados en la Fig.6 (b), es decir la frecuencia media, presentaron resultados más estables, por lo que fueron seleccionados para el análisis que se presenta más adelante.

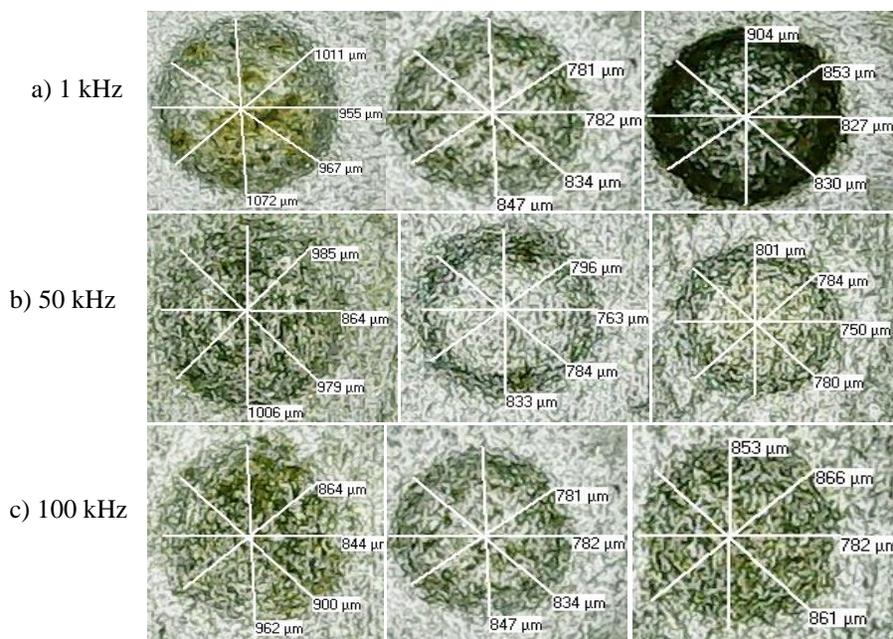
Tabla 3. Datos obtenidos en la experimentación

No	Flujo (ml/m)	Voltaje de P(V)	Frecuencia kHz	Profundidad (µm)	Err. Profundidad (µm)	Diámetro (µm)	Err. Diámetro (µm)	Sobre Corte (%)	Err. Sobre Corte (%)
1	37.3	3	100	130	20	931	46	24	6
2			50	120	4	918	17	23	2
3			1	90	4	924	51	24	7
4		5	100	110	20	866	23	16	3
5			50	140	30	962	26	29	3
6			1	150	20	998	40	33	7

7	102.4	7	100	130	10	891	12	19	1	
8			50	140	3	930	52	24	7	
9			1	190	20	1078	44	44	6	
10			3	100	110	0	845	20	13	3
11				50	100	30	828	29	11	4
12				1	90	7	775	48	4	6
13			5	100	120	1	782	31	8	3
14				50	100	4	801	12	7	2
15				1	160	0	882	19	18	3
16		7	100	130	10	801	22	7	3	
17			50	120	0	829	6	11	1	
18			1	170	10	863	11	15	1	
19		3	100	140	10	754	52	7	2	
20			50	130	10	809	11	8	1	
21			1	120	20	744	82	11	4	
22			5	100	100	10	783	6	5	1
23				50	90	4	794	20	6	3
24				1	150	10	825	29	10	4
25			7	100	120	10	809	21	8	3
26				50	120	4	789	9	5	1
27				1	250	10	914	41	22	6

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la experimentación.

Fig.6. Barrenos obtenidos con 37.3, 66.1 y 102.4 mil/min de izquierda a derecha respectivamente y a 1, 50 y 100 kHz de arriba hacia abajo.



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del maquinado.

Teniendo en cuenta que el sobre corte ($O.C.$) es el excedente de material removido [7], para calcularlo se utiliza la ecuación (2), como se indica enseguida:

$$O.C. = \frac{D_o - D_a}{D_a} \quad (2)$$

Donde:

- D_o Diámetro del barreno (μm)
- D_a Diámetro externo de la herramienta (μm)

Es decir, que el sobre corte es un indicador directo de la precisión del maquinado, en donde a menor sobre corte, el barreno realizado tendrá una mejor precisión. Es preciso notar que el sobre corte no puede ser cero, pues el diámetro resultante también debe asociarse a una separación entre electrodos para poder llevar a cabo la remoción del material. En este sentido, se presentan los resultados mostrados en la Fig. 7. Primero se analiza el diámetro del orificio (ver también Tabla 3), incluyendo las barras de error o dispersión entre el valor promedio y los valores obtenidos en cada una de las repeticiones, como se observa en la Fig. 7 (a). El flujo tiene un efecto en el diámetro, por lo que a menor flujo el diámetro del orificio es mayor. Si el flujo se incrementa del valor medio seleccionado, al máximo, el valor disminuye ligeramente. El mismo comportamiento se aprecia en el sobre corte en la Fig. 7 (b), puesto que depende directamente del diámetro, pero en este caso se hace notar que la precisión del maquinado es mejor en proporción al flujo del electrolito.

Con el objetivo de analizar si existen diferencias estadísticas entre los grupos mencionados anteriormente, se optó por utilizar la prueba t de Student (debido al tamaño de la muestra, con menos de 30 elementos). Para la comparación de los diámetros entre el grupo con flujo bajo (37.3 mil/m) y el grupo con flujo medio (66.1 mil/m) dio como resultado un valor de

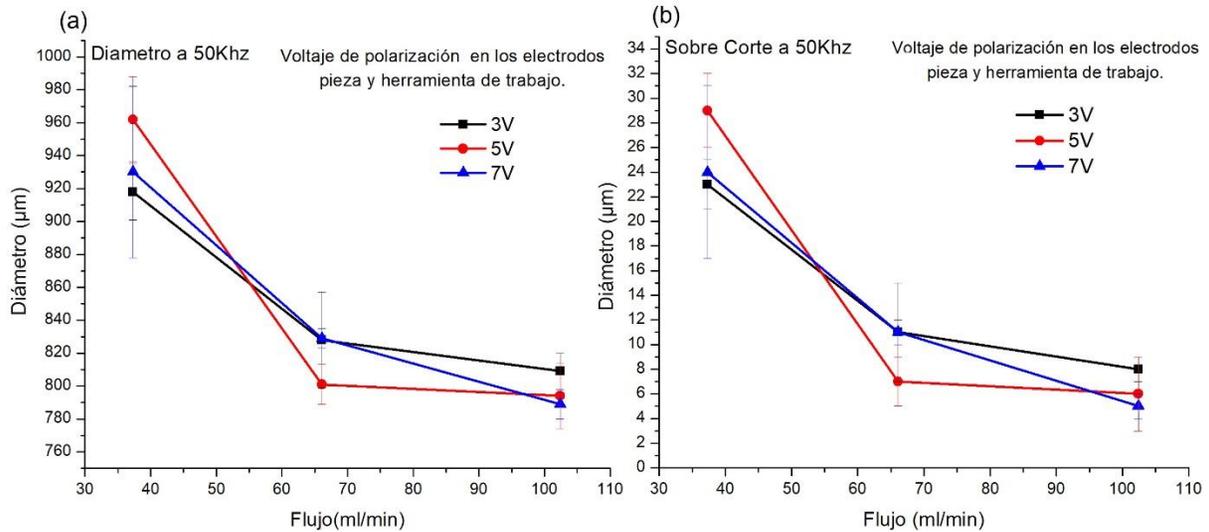
significancia $p=4.566 \times 10^{-06}$. Este valor es sensiblemente menor que el nivel de significancia convencional de $p=0.05$, lo que indica que existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula y concluir que hay una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de ambos grupos. En cuanto a la comparación entre el grupo con flujo medio y el grupo con flujo alto, el valor de $p=0.0594$, lo que indica una diferencia marginalmente significativa.

Este mismo patrón se repite en el caso del sobre corte. En la comparación entre el grupo con flujo bajo y el grupo con flujo medio, el valor de $p=5.717 \times 10^{-06}$, mientras que en la comparación entre el grupo con flujo medio y el grupo con flujo alto, el valor de $p=0.05472$.

Contrastado con investigaciones de otros autores, principalmente el trabajo de B. M. Hussein [8] "Influence of electrochemical machining input parameters on material removal rate of 2024 T3 aluminium alloy" donde se demuestra que la tasa de remoción de material (MRR, por las siglas en inglés de *Material Removal Rate*) aumenta paralelamente con la tasa de flujo, dado que los nuevos iones generados incrementan la reacción química, por lo tanto fluye más corriente en el espacio entre la herramienta y la pieza de trabajo y el resultado es un MRR más alto.

Si bien los resultados de los artículos citados, como "Multiple input multiple output fuzzy control for pulsed electrochemical micro machining" [3] y "Polarización con distintas formas de onda para la reducción del sobre corte en un proceso de maquinado electroquímico" [4], son comparables debido a la existencia de antecedentes de técnicas de experimentación similares, es necesario seguir investigando sobre el efecto que tiene el flujo del electrolito en el proceso de maquinado, ya que no se ha indagado lo suficiente en este aspecto y, por lo tanto, no se puede contrastar con un grupo de control o con respecto a estos trabajos anteriores.

Fig.7. Graficas de comparación del diámetro (a) y sobre corte (b) a 50 kHz.



Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de los datos del maquinado.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante la integración del prototipo de maquinado electroquímico descrito en el presente trabajo, fue posible llevar a cabo el estudio del efecto del flujo del electrolito sobre algunas variables relevantes en el proceso en la realización de micro orificios en piezas metálicas.

Con base en los datos analizados de la experimentación, se observa que, a mayor flujo de electrolito, menor diámetro en los barrenos y, por consiguiente, menor sobre corte. Por lo anterior, y con base a la literatura, se concluye que el flujo del electrolito influye tanto en la velocidad de remoción como en el sobre corte y el diámetro resultante del maquinado, mas no tiene influencia importante en la profundidad.

Este estudio, además de proveer información para identificar las condiciones de operación que incrementan la precisión del maquinado en el proceso ECM, resulta relevante para proponer, como trabajo a futuro, la implementación de un sensor de flujo y el desarrollar un sistema de control basado en lógica difusa que incorpore el flujo como variable de entrada al proceso. Como propósito, se tendría la regulación del voltaje de la bomba de agua para controlar el flujo en un régimen normal de operación del sistema.

4. REFERENCIAS

[1] Catarino Aguilar, O., 2017. Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico. Atlacomulco, México: Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación.

[2] Hassan, A. & Gawad, E. H., 2005. Advanced Machining Processes. Primera ed. United States of America: McGraw Hill.

[3] Nopalera, E. Granda, J. A. Pérez y A. Flores, «Multiple input multiple output fuzzy control for pulsed electrochemical

micro machining,» IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, 2021.

[3] J. F. Segudo, E. Granda, J. F. García y J. A. Pérez, «Polarización con distintas formas de onda para la reducción del sobre corte en un proceso de maquinado electroquímico,» Aristas, vol. 8, n° 17, pp. 308-314, 2022.

[5] Martinez Alvarado, R., Granda Gutierrez, E. E., Zuñiga, L. M. & Guerrero, R., 2015. Pulsed Power Supply for Electrochemical Machining. 2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), 3(15), pp. 1-6.

[6] F. Flavio. H y D. Julio E., «Desarrollo de un caudalímetro digital para la medición de caudal en rios,» *Rev. Investig. Desarro. Innov.*, vol. 3, n° 1, pp. 44-51, 2012

[7] Gallegos Miranda, I., 2019. Sistema computacional para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico por pulsos. Atlacomulco, México: Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación.

[8] B. M. Hussein, «Influence of electrochemical machining input parameters on material removal rate of 2024 t3 aluminium alloy,» *Diyala Journal of Engineering Sciences*, vol. 10, n° 3, pp. 107-120, 2017.

[9] Liua, G., Zhang, Y. & Natsu, W., 2019. Influence of electrolyte flow mode on characteristics of electrochemical machining with electrolyte suction tool. Elsevier, Issue 142, pp. 66-75.