

CONTROL DIFUSO APLICADO A LA REGULACIÓN DEL FLUJO DE ELECTROLITO EN EL PROCESO DE MAQUINADO ELECTROQUÍMICO

De Jesús González Iván¹, Granda Gutiérrez Everardo Efrén¹, García Mejía Juan Fernando¹, Vázquez Robledo Ricardo Arturo², Flores Fuentes Allan Antonio¹

¹ Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto Literario Ote. No. 100, Col. Centro, Toluca, CP 50000, Toluca, Estado de México. e-mail: eegrandag@uaemex.mx

² Centro Regional de Desarrollo Espacial EdoMex, Agencia Espacial Mexicana. Anillo Perimetral 101, Parque Industrial ST, Atlacomulco, CP 50450. Atlacomulco, Estado de México.

RESUMEN.

En este artículo se describe el desarrollo de un controlador que utiliza la lógica difusa, la cual intenta emular el razonamiento aproximado presente en el proceso cognitivo humano. La lógica difusa ha encontrado diversas aplicaciones en campos industriales, especialmente en el diseño de sistemas de control inteligente. El objetivo principal de este trabajo es diseñar un controlador difuso que emplea funciones trapezoidales y triangulares, junto con un sistema de inferencia Mamdani de múltiples entradas y una salida. El enfoque se centra en regular el flujo de electrolito en un proceso de Micro-Manufactura no convencional basado en el maquinado electroquímico. Los resultados obtenidos demuestran que el controlador presenta una respuesta transitoria adecuada, logrando estabilizar el flujo frente a una respuesta escalón. También se demuestra que el controlador es capaz de ajustar el flujo ante perturbaciones externas.

Palabras clave: controlador difuso, maquinado electroquímico, control de flujo de electrolito.

ABSTRACT.

This article presents the development of a controller that utilizes fuzzy logic to emulate the approximate human reasoning and cognitive processes. This methodology has found applications in various industrial fields, particularly in the design of intelligent control systems. The focus of this work is to design a fuzzy controller that employs trapezoidal and triangular membership functions, along with a multi-input, single-output Mamdani inference system. The specific objective is to regulate the electrolyte flow in a non-conventional Micro-Manufacturing process based on electrochemical machining. The results demonstrate that the controller exhibits an adequate transient response, effectively stabilizing the flow in the presence of a step input. Also, the controller can adjust the flow when an external perturbation is applied.

Keywords: fuzzy controller, electrochemical machining, electrolyte flow control.

1. INTRODUCCIÓN.

El maquinado electroquímico (ECM, del inglés *Electrochemical Machining*) es un proceso no convencional de manufactura que aprovecha fenómenos como el transporte de masa, la transferencia de masa y energía y las reacciones electroquímicas, para obtener formas y acabados de alta calidad en metales [1]. El

proceso consiste en sumergir la pieza de trabajo y la herramienta de corte en un electrolito, formando un circuito eléctrico. Al aplicar una corriente eléctrica controlada, se produce una reacción electroquímica que remueve material de la pieza de trabajo. El electrolito, compuesto por una solución conductora, desempeña un papel fundamental en el proceso, proporcionando los iones necesarios para la reacción y disipando el calor generado. La herramienta de corte, generalmente un cátodo, se mueve con precisión cerca de la superficie de la pieza de trabajo, creando una separación conocida como gap. El proceso de ECM se utiliza ampliamente para mecanizar materiales duros y difíciles de trabajar, como aleaciones de titanio y superaleaciones de níquel, permitiendo la fabricación de componentes con geometrías complejas y alta calidad superficial [2].

En la búsqueda de mejorar el control de este proceso, se han llevado a cabo investigaciones utilizando inteligencia artificial con el objetivo de reducir el sobre corte (la diferencia entre el material removido y el tamaño de la herramienta de corte) y mantener una separación constante entre los electrodos [3]. Se ha demostrado que la implementación de un sistema de control difuso puede reducir el sobre corte hasta en un 21% en comparación con los resultados reportados en la literatura [4]. Asimismo, se ha estudiado el efecto de diferentes formas de onda en el sobre corte, revelando que la forma de onda triangular produce un menor sobre corte, pero menor profundidad del barreno, mientras que la forma de onda cuadrada genera más sobre corte, pero mayor profundidad [5]. Estos estudios subrayan la importancia de un control preciso en el maquinado electroquímico para mejorar tanto la calidad como la eficiencia del proceso.

En este contexto, es importante destacar que los trabajos previos no han abordado el análisis del efecto de la variación en el flujo del electrolito en el sobre corte. Sin embargo, el estudio titulado "Control difuso para la regulación de flujo de electrolito en un proceso no convencional de Micro-Manufactura" [6], propone un sistema de control difuso capaz de regular el flujo. Mediante simulaciones, en dicho trabajo se demostró que este enfoque permite reducir el sobre impulso de tensión eléctrica aplicado sobre la planta.

Dado que el electrolito desempeña un papel crucial en el proceso de maquinado electroquímico, el objetivo de este estudio es desarrollar un sistema de control difuso capaz de regular físicamente el flujo de electrolito en dicho proceso. Se busca proponer una estrategia de control que permita minimizar las variaciones en el flujo y potencialmente mejorar la calidad del mecanizado.

2. MÉTODO.

2.1. Diseño del circuito y componentes físicos

En el proceso ECM, el electrolito es transportado por un sistema de recirculación y filtrado mediante una bomba eléctrica centrífuga, desde un contenedor hasta la herramienta de trabajo (ver Fig. 1). La herramienta es un electrodo cilíndrico hueco por el que se hace pasar el electrolito; esta herramienta se desplaza en un eje vertical mediante un motor a pasos y una guía lineal. Aunque no se abordan en esta investigación, es importante mencionar que el proceso requiere de un control de la posición de la herramienta y de un voltaje de polarización de los electrodos para realizar la remoción de material. El presente estudio únicamente se centra en el control del flujo del electrolito.

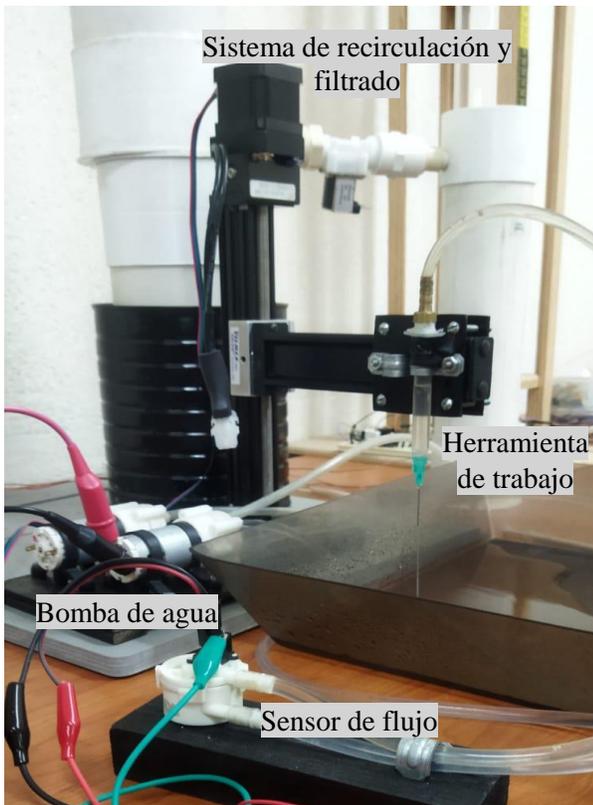


Fig. 1. Prototipo ECM (implementación propia).

Para el diseño físico del sistema, se emplearon los siguientes componentes: un Arduino Mega, un controlador de motores

L298 para ajustar el voltaje suministrado a la bomba de agua, un sensor de flujo FM-HL3012 y una bomba eléctrica equipada con un motor de corriente continua de 12 voltios. En la Fig. 2 se presenta el diagrama del circuito electrónico utilizado en el presente estudio.

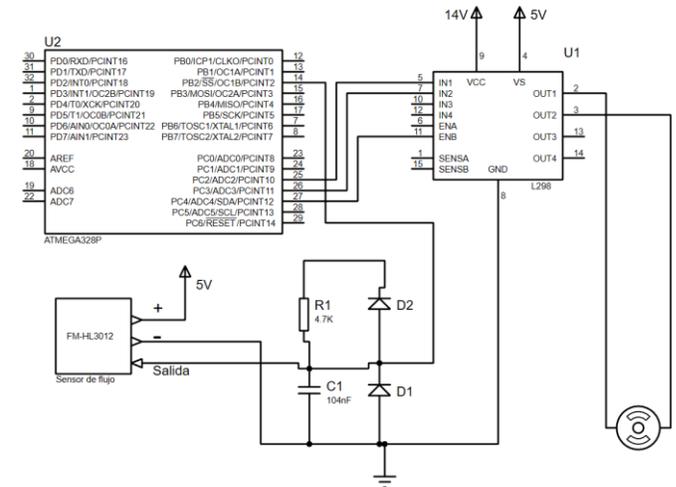


Fig. 2. Esquema del circuito del prototipo del control del flujo.

2.2. Caracterización del flujo

Para caracterizar y medir el flujo suministrado, se ha incorporado un caudalímetro en el sistema, basado en un sensor de efecto Hall (FM-HL3012). Con el fin de obtener mediciones precisas, se ha llevado a cabo el cálculo del factor de conversión, que permite transformar la frecuencia de pulsos registrada en un caudal. La variable que se puede medir con exactitud es la cantidad de pulsos, utilizando Arduino, mientras que el volumen de agua puede ser medido mediante recipientes graduados. Estas dos variables resultan fundamentales para el cálculo del factor de conversión, para lo cual se emplea la ecuación (1):

$$K = \frac{n^{\circ}Pulsos}{volumen} \quad (1)$$

Donde K representa el factor de conversión, mientras que $n^{\circ}Pulsos$ corresponde a la cantidad de pulsos detectados por el sensor del flujo en relación con el volumen que ha pasado a través de éste.

Dadas las pruebas realizadas para el factor de conversión, se determinó un valor $K= 35.5$. Este valor es crucial para llevar a cabo la conversión a caudal, junto con el número de pulsos por segundo, que representa la frecuencia de los pulsos [7]. De este modo, se puede emplear la ecuación (2) para calcular el caudal.

$$Q = \frac{frecuencia}{K} \quad (2)$$

La frecuencia de pulsos (K) se mide en pulsos por segundo y Q es el caudal, en ml/min.

Ahora bien, en el proceso de control y regulación del flujo de una bomba hidráulica, es primordial comprender la relación entre el voltaje suministrado a la bomba y la señal de modulación por ancho de pulso (PWM, del inglés *Pulse Width Modulation*), que permitirá ajustar el voltaje aplicado al motor de la bomba para modificar su velocidad y, por lo tanto, regular la cantidad de fluido que se desplaza. Esta caracterización permite establecer una correlación precisa entre la señal de control y la respuesta de la bomba.

Para llevar a cabo esta caracterización, se midió el voltaje suministrado a la bomba de agua en función de diferentes niveles de PWM generados por el microcontrolador. Se realizó una serie de experimentos donde se variaron los niveles de PWM desde el 0 hasta 255, en incrementos de 10; para cada nivel de PWM, se registraron las mediciones de voltaje y flujo del electrolito correspondientes, como se ilustra en la Fig. 3. Como se aprecia, los intervalos de flujo en el sistema van desde cero hasta 148.8 ml/min, siguiendo un comportamiento proporcional.

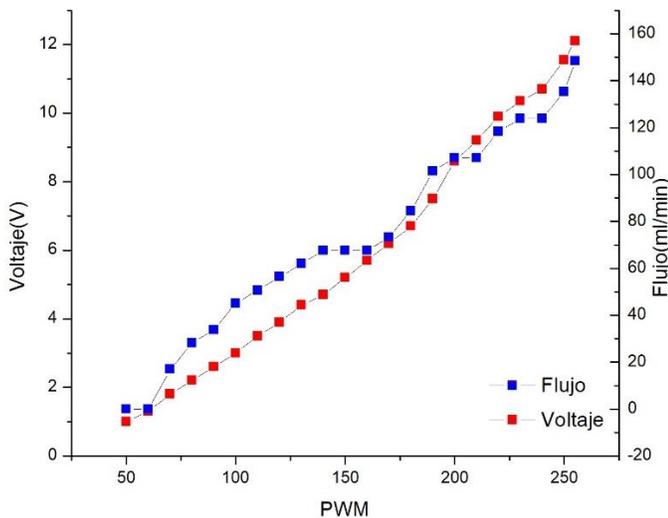


Fig. 3. Gráfica de correlación entre el voltaje, PWM y el flujo

2.3. Diseño del control difuso

El controlador difuso, de tipo Mamdani, con dos entradas y una salida, se implementó en el microcontrolador Arduino, para un prototipo de maquinado electroquímico de un solo eje (ver Fig. 1). Este prototipo utiliza como herramienta de corte un electrodo hueco de acero inoxidable AISI-316L, con 565 μm de diámetro interno, a través del cual circula un electrolito basado en una solución acuosa de cloruro de sodio (NaCl), impulsado por una bomba de agua desde un sistema de recirculación y filtrado.

En la Fig. 4 se presenta el esquema general del controlador difuso propuesto, el cual es del tipo Múltiples Entradas – Una Salida

(MISO, del inglés *Multiple Input – Single Output*). Se observa que en el controlador se utilizan como entradas a la diferencia entre el valor deseado y el valor actual (error), junto con la tasa de cambio del flujo de salida (dy/dt). El error indica la desviación de la variable de respuesta (flujo) del valor deseado, mientras que su derivada indica la rapidez con que esta desviación está sucediendo. Con estas variables se pretende regular el flujo, para mantenerlo lo más cercano posible al valor de referencia establecida. Este ajuste se realizará mediante la modificación del voltaje aplicado a la bomba, mediante el ajuste del ciclo de trabajo del PWM, por lo que dicha variable constituye la salida del controlador difuso.

Considerando las condiciones identificadas y la referencia definida a partir de la caracterización con la ecuación (2), se estableció un rango de valores para el universo de discurso del error, en un intervalo de tres conjuntos difusos para evaluar este parámetro. El primer conjunto, identificado mediante la etiqueta lingüística "POCO" (PO), se define mediante una función trapezoidal con puntos de inflexión en -117, -117, -37.4 y 0. El segundo conjunto, denominado "CERO" (CE), se representa con una función triangular en el intervalo de -84.5, 0 y 84.5. Por último, el conjunto "MUCHO" (MU) se define mediante una función trapezoidal con puntos de inflexión en 0, 80, 117 y 117. En cuanto a la segunda variable de entrada, se definen los términos lingüísticos "Bajo" (BAJ), "Normal" (NOR) y "Demasiado" (DEM) en el rango de -200 a 200. El conjunto "Bajo" se representa mediante una función trapezoidal con puntos de inflexión en -200, -200, -56.3 y 80. El conjunto "Normal" se define con una función triangular en el intervalo de 0, 112.676 y 150. Por último, el conjunto "Demasiado" se evalúa con una función trapezoidal en los puntos 130, 180, 200 y 200. En la Figura 5(a) se muestran las funciones de membresía para la fusificación del error, mientras que en la Figura 5(b) se representan los tres criterios de fusificación sobre el rango de valores para la variable dy/dt .

Es importante mencionar que los intervalos para los conjuntos, así como el tipo de funciones de membresía para las variables de entrada, han sido establecidos de forma empírica, considerando los intervalos comunes observados para estas variables.

En cuanto a las funciones de membresía para la variable de salida se proponen los términos lingüísticos "Mínimo" (MI), "Óptimo" (OP) y "Alto" (AL) para la salida PWM que se aplica al motor de la bomba. El conjunto "Mínimo" se define con una función trapezoidal en los puntos de inflexión 0, 0, 60 y 150. El conjunto "Óptimo" se representa con un conjunto triangular en los valores 140, 160 y 180. El conjunto "Alto" se evalúa mediante una función trapezoidal en los puntos 170, 230, 255 y 255. Estos términos lingüísticos se establecen considerando un rango de PWM de 0 a 255, como se muestra en la Fig. 6, donde 0 corresponde a un ciclo de trabajo de cero, y 255 al máximo valor de 100%.

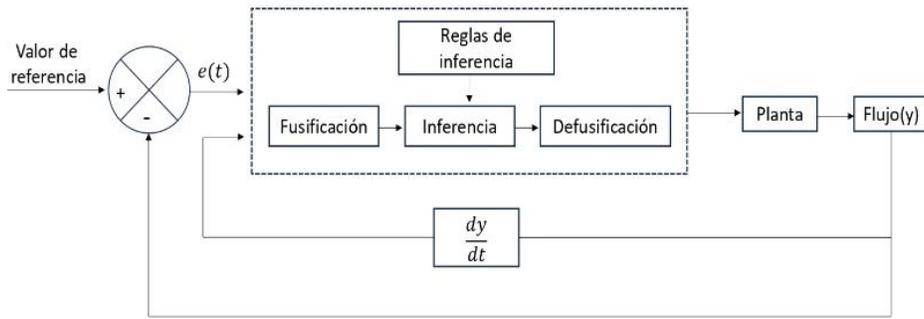


Fig. 4. Diagrama de bloques del sistema de control difuso.

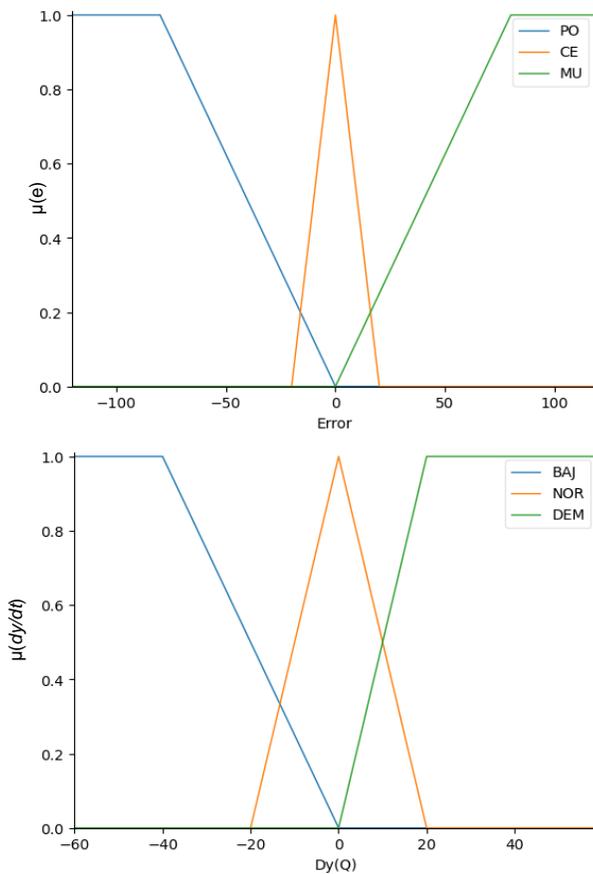


Fig. 5. Funciones de membresía para el universo del discurso de la variable error (a) y la derivada del flujo (b)

Los conjuntos difusos se ajustaron empíricamente para lograr una respuesta de flujo estable y rápida. El universo de discurso del error se determinó previamente mediante la caracterización del comportamiento del flujo en función del voltaje, abarcando caudales de 0 a 110 mil/min con voltajes de 0 a 12 V aplicados a la bomba de agua [8]. Tanto el error como la derivada del flujo

(dy/dt) pueden ser valores negativos debido a la referencia establecida entre el flujo actual y deseado, con un rango de cambio de -60 a 60 mil/min. De la misma manera para el universo de discurso de la variable de salida (PWM), se realizó una caracterización previa que involucró rangos de PWM de 0 a 255 para analizar la relación entre el voltaje y el flujo, (Ver Fig. 3).

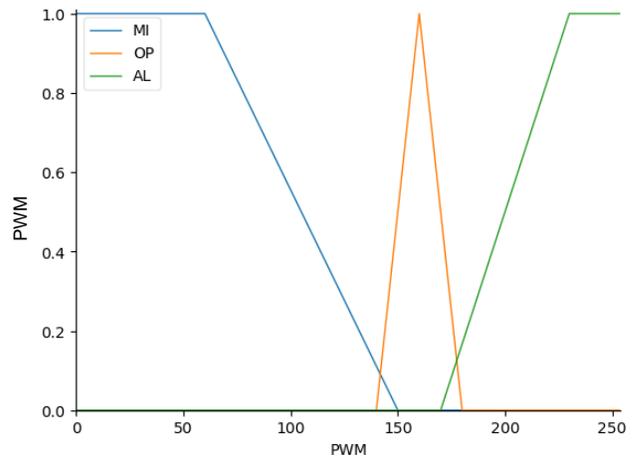


Fig. 6. Funciones de membresía para el universo del discurso de la variable de salida (Voltaje).

En este trabajo se implementó una Memoria Asociativa Difusa (FAM, del inglés *Fuzzy Associative Memory*) para determinar y mostrar las reglas de inferencia. La FAM permite establecer reglas difusas que relacionan las variables de entrada con los conjuntos difusos de control [9]. Esta representación de reglas difusas en la FAM se muestra en la Tabla 1. Con esta FAM, se visualiza de manera efectiva la relación entre las variables de entrada y los conjuntos difusos de control, lo que es fundamental para el análisis y la toma de decisiones en este estudio. Estas reglas se configuraron en función de las entradas y los valores deseados en la salida del sistema.

Tabla 1. Memoria Asociativa Difusa.

ERROR	$dy/dt (Q)$		
	BAJO	NORMAL	DEMASIADO
POCO	MÍNIMO	MÍNIMO	MÍNIMO
CERO	ÓPTIMO	ÓPTIMO	ÓPTIMO
MUCHO	ALTO	ALTO	ALTO

3. RESULTADOS.

El funcionamiento del controlador difuso diseñado se verificó en el prototipo de maquinado electroquímico. Es importante mencionar que únicamente se consideró la operación independiente del sistema hidráulico; es decir, que no se realizaron maquinados, sino únicamente se encontraba en marcha el sistema de bombeo del electrolito, compuesto por el contenedor de electrolito, el filtro, la bomba y el electrodo. Lo anterior para no tener influencia o ruido de los otros subsistemas que se requieren para efectuar un maquinado.

Para la realización de las pruebas experimentales, se estableció un valor de referencia de 66 ml/min, que se encuentra en el intervalo medio del flujo máximo del sistema, como se ha reportado en la sección 2.2.

Durante el proceso, se observó un sobre impulso del 15.19%, lo que significa que el sistema excedió temporalmente el valor de referencia en un 15.19% antes de estabilizarse. El tiempo que tomó al sistema estabilizarse fue de 33.6 segundos, como se puede observar en la Fig. 7, en donde la línea de color turquesa indica la posición de la referencia de flujo. También se observa la medida del error en estado estable, ubicado en -1.6 ml/min (aproximadamente 2.4 %).

El controlador difuso fue sometido a perturbaciones, incluyendo la obstrucción parcial de la herramienta de trabajo, para restringir intencionalmente el flujo del electrolito. En este escenario, el controlador demostró su capacidad para estabilizar el flujo cuando la referencia se encuentra en un intervalo de flujo medio (50 a 68 ml/min), tal como se ilustra en la Fig. 8, lo cual resulta de suma utilidad en el proceso de maquinado electroquímico. Sin embargo, es importante mencionar que cuando la referencia es alta, el control enfrenta dificultades para mantenerse estable.

Se ha identificado una posible causa fundamental del problema relacionada con la frecuencia de pulsos adquiridos por segundo. Se ha observado que el sensor emite aproximadamente tres pulsos por segundo (ante un flujo mínimo), lo que afecta negativamente la estabilidad de las mediciones al calcular el caudal mediante la fórmula caudal = frecuencia / factor de conversión (K). Esta variabilidad se debe al desfase entre las tres muestras y a la escasa cantidad de pulsos obtenidos en un segundo, lo que resulta en mediciones inestables que impactan en el funcionamiento adecuado del control difuso. Esto conlleva a una mayor demora en la estabilización del sistema y, en

ocasiones, la falta de estabilidad en flujos específicos (tanto altos, como bajos).

Para abordar esta problemática, se ha propuesto el desarrollo de un multiplicador de frecuencia con el objetivo de mejorar la estabilidad de las lecturas. Este enfoque no solo preserva la precisión temporal de los pulsos, sino que también minimiza el desperdicio de recursos de procesamiento del microcontrolador, en contraste con la extensión del tiempo de muestreo de pulsos.

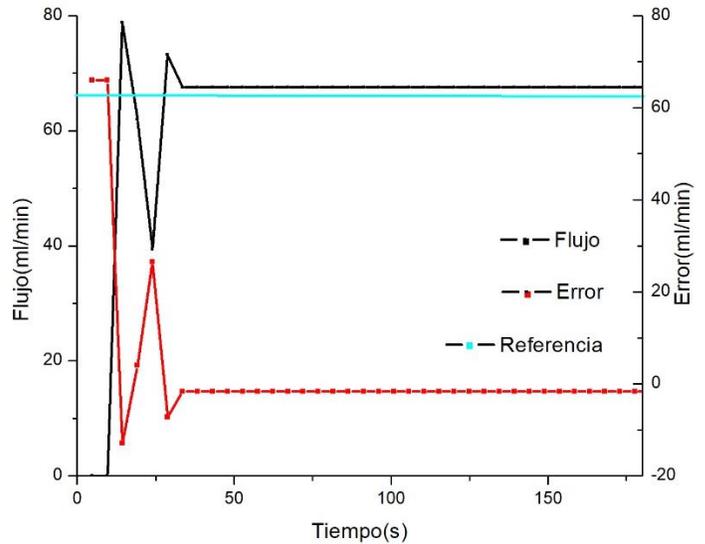


Fig. 7. Estabilización del flujo con relación al tiempo para una entrada escalón, en nivel de flujo medio.

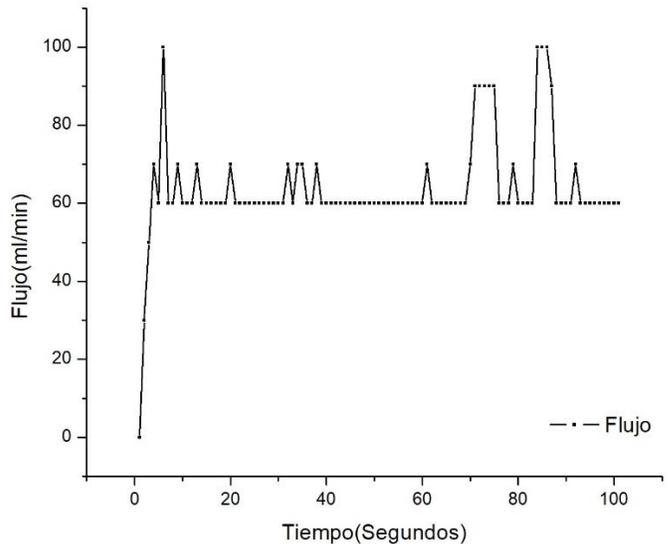


Fig. 8. Estabilización del flujo ante perturbaciones (restricción del flujo de salida).

Aunque actualmente existen varios métodos de control, como el PID y el control difuso, que se aplican para regular el flujo del electrolito, como se discute en el trabajo de I. Nopalera [6], donde se compara un control PID con un control difuso. Dicho trabajo demuestra que el control difuso presenta un menor sobre impulso y un tiempo de estabilización más rápido en comparación con el control PID. Sin embargo, es importante destacar que este trabajo no tiene como objetivo proponer un nuevo controlador, sino que forma parte de un desarrollo futuro en el que se pretende incorporar a un sistema de control MIMO (Múltiples Entradas y Múltiples Salidas), que no solo regule el flujo del electrolito, sino también la separación entre electrodos en el proceso de maquinado electroquímico.

4. CONCLUSIONES.

Tras analizar la referencia [10] y a partir de experimentaciones previas realizadas con el flujo del electrolito, se ha constatado que el flujo tiene un impacto significativo en el acabado de las piezas producidas mediante el método de maquinado electroquímico. A partir de esta premisa, se ha llevado a cabo la presente investigación, con el objetivo de estudiar y comprender mejor esta relación, así como proponer un esquema de regulación del flujo del electrolito, basado en lógica difusa, para su potencial aplicación en el proceso de maquinado electroquímico.

Durante el desarrollo del trabajo, se observó que el sistema de control difuso de tipo MISO es capaz de regular el flujo en el rango de 50 a 68 ml/min, el cual se estableció como el rango de flujo medio basado en una caracterización experimental. Los resultados obtenidos demuestran que el uso del controlador difuso brinda beneficios significativos, que pueden ser aprovechados en el proceso de maquinado electroquímico.

En primer lugar, se logra mantener un flujo constante, lo cual es esencial para garantizar la estabilidad y consistencia del proceso. El control difuso ajusta automáticamente las variables de entrada para compensar las variaciones en las condiciones de operación y mantener el flujo dentro del rango deseado. Esto podría contribuir a minimizar las variaciones en el mecanizado y mejorar la calidad de las piezas producidas.

Además, se observó una adecuada respuesta transitoria del controlador ante cambios repentinos en el flujo. Esto significa que el control difuso es capaz de adaptarse rápidamente a las perturbaciones y restablecer el flujo deseado en un tiempo de respuesta aceptable. Esto es crucial para evitar fluctuaciones indeseadas en el proceso de maquinado y asegurar una producción eficiente y precisa.

Sin embargo, se identificaron desafíos en la estabilización del control difuso en flujos superiores, específicamente en el rango

de 68 a 112 ml/min, clasificados como flujos altos. Para abordar este problema, se recomienda ampliar el universo de discurso y ajustar los conjuntos a esta nueva escala, lo que permitiría una regulación más efectiva en flujos altos y brindaría mayor flexibilidad en el rango de operación del proceso.

En resumen, los resultados obtenidos en este estudio respaldan la viabilidad y el beneficio del uso del controlador difuso en la regulación del flujo de electrolito en el maquinado electroquímico. Este enfoque de control ofrece la capacidad de mantener un flujo constante y una respuesta transitoria adecuada, lo que potencialmente tendría un impacto directo en la calidad y eficiencia del proceso.

Como trabajo a futuro se recomienda realizar pruebas adicionales en el proceso de maquinado para verificar el efecto satisfactorio del control del flujo en el acabado y precisión de las piezas producidas, lo cual sería un paso importante hacia la implementación práctica de esta estrategia de control.

5. REFERENCIAS

- [1] Catarino Aguilar, O., 2017. Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico. Atacomulco, México: Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación.
- [2] M. P. Groover, Fundamentos de manufactura moderna, Tercera edición, México: McGraw-Hil, 2007.
- [3] Hassan, A. & Gawad, E. H., 2005. Advanced Machining Processes. Primera edición, Estados Unidos de América: McGraw Hill.
- [4] 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.
- [5] J. F. Segundo, 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. 9, n° 17, pp. 308-314, 2022.
- [6] I. Nopalera, E. Granda, F. García, M. J. Pérez y F. A. Flores, «Control difuso para la regulación de flujo de electrolito en un proceso no convencional de Micro-Manufactura.» Coloquio de Investigación Multidisciplinaria, vol. 8, n° 1, pp. 1086 - 1093, 2020.
- [7] B. M. Hussein, «Influence of electrochemical machining input parameters on material removal rate of 2024 t3 aluminum alloy» *Diyala Journal of Engineering Sciences*, vol. 10, n° 3, pp. 107-120, 2017.
- [8] I. De Jesus, E. E. Granda, J. F. García y R. A. Vázquez, «Influencia del flujo del electrolito en orificios micrométricos realizados con maquinado electroquímico.» *Revista Aristas Ciencia Básica Aplicada*, vol. 10, n° 18, pp. 254-259, 2023.
- [9] L. Zadeh, «Is there a need for fuzzy logic» *Information Sciences*, vol. 178, pp. 2751-2779, 2008.
- [10] G. Liua, Y. Zhang y W. Natsu, «Influence of electrolyte flow mode on characteristics of electrochemical machining with electrolyte suction tool.» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 1, n° 142, pp. 66-75, 2019.