



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO

“Sistema embebido basado en lógica difusa para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico”

T E S I S

Que para obtener el Grado Académico de:
Maestro en Ciencias de la Computación

Presenta:

Iván De Jesús González

Director de Tesis:

Dr. Everardo Efrén Granda Gutiérrez

Directores adjuntos:

Dr. Allan Antonio Flores Fuentes

M. en I. Ricardo Arturo Vázquez Robledo

Noviembre de 2024

RESUMEN

El maquinado electroquímico (ECM, por sus siglas en inglés de *Electrochemical Machining*) es un proceso de manufactura no convencional que utiliza la electrólisis para dar forma a piezas metálicas conductoras. En este método, una fuente de energía polariza la herramienta y la pieza de trabajo, actuando como cátodo y ánodo respectivamente en una celda electrolítica. La interacción entre los electrodos y un electrolito provoca una reacción de oxidación, que libera iones de la pieza de trabajo, lo que permite que ésta tome la forma de la herramienta. Dado que este proceso no es abrasivo, la herramienta no sufre desgaste. Además, las propiedades del material, como la dureza, no afectan el maquinado.

Para que el proceso funcione correctamente, debe mantenerse una separación controlada entre los electrodos, conocida como *Inter Electrode Gap* (IEG), en el orden de micrómetros. Esta distancia no se puede medir directamente, y debe ser controlada con precisión debido a su influencia en la remoción de material. Asimismo, el flujo del electrolito afecta tanto la velocidad de remoción como la precisión del proceso.

Este trabajo propone un sistema embebido que utiliza dos controladores difusos tipo MISO (*Multiple Inputs – Single Output*) para controlar y optimizar el ECM. El sistema, basado en un microcontrolador ESP32 de doble núcleo, gestiona dos controladores: uno para regular la distancia inter-electrodos a 240 micrómetros y otro para ajustar el flujo del electrolito en función de dicha distancia. El controlador de distancia utiliza como variables de entrada la corriente y el área de exposición, mientras que el controlador de flujo emplea el error y la derivada del flujo para mantener un caudal constante.

Palabras clave: *Maquinado electroquímico, lógica difusa, distancia inter-electrodos, flujo del electrolito, sistema embebido.*

ABSTRACT

Electrochemical machining (ECM) is a non-conventional manufacturing process that uses electrolysis to shape conductive metal parts. In this method, a power source polarizes the tool and the workpiece, which act as the cathode and anode, respectively, in an electrolytic cell. The interaction between the electrodes and the electrolyte triggers an oxidation reaction that releases ions from the workpiece, allowing it to take the shape of the tool. Since this process is non-abrasive, the tool does not wear out. Additionally, material properties such as hardness do not affect the machining process.

For the process to work correctly, a controlled gap between the electrodes, known as the Inter Electrode Gap (IEG), must be maintained in the micrometer range. This distance cannot be measured directly and must be precisely controlled due to its influence on material removal. Moreover, the electrolyte flow affects both the material removal rate and the precision of the process.

This work proposes an embedded system that utilizes two fuzzy controllers of the MISO (Multiple Inputs – Single Output) type to control and optimize the ECM process. The system, based on a dual-core ESP32 microcontroller, manages two controllers: one to regulate the inter-electrode distance at 240 micrometers and another to adjust the electrolyte flow based on this distance. The distance controller uses current and exposure area as input variables, while the flow controller employs the error and flow derivative to maintain a constant flow rate.

Keywords: *Electrochemical machining, fuzzy logic, inter-electrode gap, electrolyte flow, embedded system.*

PRODUCTOS ACADÉMICOS

Artículos publicados

De Jesús, G. I., Granda, G. E. , E., García, M. J. F. & Vázquez, R. R. A., 2023. Influencia del flujo del electrolito en orificios micrométricos realizados con maquinado electroquímico. *Revista Aristas, Ciencias Básicas y Aplicada* , pp. 254 - 259.

De Jesús, G. I., Granda, G. E., García, M. J., Vázquez, R. R. & Flores, A.A., 2024. Control Difuso Aplicado a la Regulación del Flujo de Electrolito en el Proceso de Maquinado Electroquímico. *Revista Electro*, en prensa.

Trabajos de divulgación

Memoria de congreso, De Jesús, G. I., Pastrana, G. V., Granda, G. E., García, J. F., & Flores, A. A. (2022). Sistema de Internet de las Cosas para monitoreo del riego de forraje verde hidropónico. *Avances en ciencia de frontera y tecnología de vanguardia en América Latina, un espacio para la divulgación* (págs. 57-60). Toluca, Estado de México.: Amat Editorial.

Ponencia “Sistema de internet de las cosas para el control y monitoreo del riego de forraje verde hidropónico” celebrado el marco del 1er Congreso internacional de divulgación de la ciencia y la ingeniería CIDICI, que se llevo a cabo del 19 al 21 de octubre de 2022 en el Instituto Tecnológico Toluca.

Actividades de retribución social

Taller de Introducción al Internet de las cosas en el 1er. Congreso Nacional de Informática y Tecnologías Aplicadas 2023(CNITA 2023), realizado del 28 de noviembre al 01 de diciembre de 2023 en el Tecnólogo de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso.

Taller “Introducción al protocolo MQTT para dispositivos IoT” en el marco de las actividades seminario de divulgación otoño 2023 “Transformando datos en

conocimiento”. Impartido en CREDES Agencia Espacial Mexicana Atlacomulco Estado de México, el 11 de octubre de 2023.

Conferencia “Sistemas de control aplicados a procesos de maquinado electroquímico” en el marco de las actividades del coloquio de investigación de ingeniería y ciencias de la computación edición 2023 realizado en la Universidad Autónoma del estado de México, Centro Universitario Atlacomulco, el día 15 de noviembre del 2022.

Entrevista en Uniradio UAMEX sobre un sistema de riego controlado por Inteligencia artificial, realizada por video llamada y transmitida en Uniradio.

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
PRODUCTOS ACADÉMICOS	iii
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2.1 Definición del problema.....	3
2.2 Objetivos de investigación	3
2.3 Pregunta de investigación	4
2.4 Hipótesis.....	5
2.5 Justificación	5
2.6 Impactos	7
3 ESTADO DEL ARTE	8
3.1 Maquinado electroquímico	9
3.1.1 Proceso de disolución anódica como base del ECM.....	9
3.1.2 Velocidad de remoción del material	12
3.1.3 Distancia inter-electrodos.....	14
3.1.4 Sobre corte como indicador de la precisión	15
3.2 Estructura de un equipo para ECM	16
3.2.1 Sistema mecánico.....	16
3.2.2 Sistema eléctrico	19

3.2.3	Instrumentación.....	20
3.2.4	Sistema de recirculación de electrolito	21
3.2.5	Accesorios.....	23
3.3	Lógica difusa.....	23
3.3.1	Conjuntos difusos.....	24
3.3.2	Variables lingüísticas	25
3.3.3	Fusificación y funciones de membresía	26
3.3.4	Reglas de inferencia	30
3.3.5	Defusificación	30
3.4	Control inteligente aplicado al ECM	31
3.5	Sistemas embebidos	33
3.6	Conclusiones del análisis del estado del arte	35
4	MÉTODO	36
4.1	Requerimientos	36
4.2	Arquitectura del prototipo	40
4.3	Diseño del subsistema de desplazamiento	42
4.4	Diseño del subsistema de monitoreo de corriente y voltaje.....	44
4.4.1	Monitoreo de voltaje	45
4.4.2	Monitoreo de corriente.....	48
4.4.3	Calibración de distancia inter-electrodos inicial.....	49
4.5	Diseño del subsistema de recirculación del electrolito	50
4.5.1	Bombeo y filtrado del electrolito	51
4.5.2	Medición y caracterización del flujo del electrolito.....	53
4.6	Diseño del controlador difuso de flujo.....	55

4.6.1	Conjuntos difusos del controlador de flujo	56
4.6.2	Reglas difusas para el controlador de flujo	60
4.7	Controlador difuso de la distancia inter-electrodos	61
4.7.1	Estimación de la <i>IEG</i>	61
4.7.2	Conjuntos difusos del controlador de gap	63
4.7.3	Reglas difusas para el controlador del gap	69
4.8	Implementación de los controladores en el sistema multinúcleo	70
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	72
5.1	Integración del prototipo de maquinado	72
5.2	Caracterización del movimiento de la herramienta de trabajo	75
5.3	Verificación del funcionamiento del circuito de medición	76
5.3.1	Ajuste de la ganancia de voltaje y corriente	77
5.3.2	Filtro de media móvil y estimación de la distancia inter-electrodos	80
5.4	Caracterización del flujo	80
5.5	Resultados del control del flujo	83
5.6	Resultados del control del gap y flujo	88
5.7	Pruebas en el maquinado de acero	93
5.8	Comparación de resultados con trabajos previos	96
	CONCLUSIONES	99
	REFERENCIAS	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de las entradas para el control difuso del flujo del electrolito.	57
Tabla 2. Descripción de las entradas y salida para el control difuso del Gap.	64
Tabla 5.1. Datos de la caracterización del desplazamiento en milésimas de pulgada (mil) para 1/8 de paso.....	76
Tabla 2. Tabla con valores mínimos y máximos que monitore el subsistema de corriente y voltaje.....	79
Tabla 3. Datos obtenidos en la experimentación del flujo del electrolito sin el control activo (lazo abierto).....	85
Tabla 4. Valores monitoreados en el proceso de maquinado electroquímico con ambos controles activados.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Representación gráfica del sobre corte.	16
Figura 3.2. Representación gráfica del sistema mecánico de un prototipo ECM obtenida del trabajo de (Lovera, 2023)	17
Figura 3.3. Prototipo de maquinado electroquímico- electro descarga adaptado del trabajo de (Skoczypiec & Ruszaj, 2014).....	18
Figura 3.4. Representación gráfica de la herramienta de trabajo con micro agujeros; imagen modifica de (Xu, et al., 2020).....	22
Figura 3.5. Ejemplo de conjuntos difusas para la variable lingüística “Temperatura”....	26
Figura 3.6. Descripción grafica de las características de las funciones de membresía. Adaptada de (Leyva Bravo, 2018).	27
Figura 3.7. Función de membresía Singleton adaptada de (Leyva Bravo, 2018).	27
Figura 3.8. Función de membresía Trapezoidal adaptada de (Leyva Bravo, 2018).	28
Figura 3.9. Función de membresía Triangular adaptada de (Leyva Bravo, 2018).....	28
Figura 3.10. Función de membresía Gaussiana adaptada de (Leyva Bravo, 2018)	29
Figura 3.11. Función de membresía Sigmoidal adaptada de (Leyva Bravo, 2018)	29
Figura 4.1. Diagrama a bloques del prototipo.....	41
Figura 4.2 Representación del eje vertical (Z) que desplaza la herramienta de trabajo...43	
Figura 4.3. Diagrama esquemático del circuito que controla el movimiento del eje Z. ..44	
Figura 4.4. Diagrama esquemático del circuito de monitoreo y acondicionamiento de las señales de voltaje de polarización y corriente de maquinado.	46
Figura 4.5. Diagrama de flujo de la secuencia para establecer la separación inicial de los electrodos en 240 μm	50
Figura 4.6. Representación gráfica del sistema de recirculación del electrolito	52

Figura 4.7. Conexión del controlador L298N con la bomba de inyección del electrolito.	53
Figura 4.8. Acoplamiento del sensor de flujo mediante un adaptador de nivel TTL a CMOS, para reducir el voltaje a 3.3V (voltaje máximo soportado por el ESP 32).	54
Figura 4.9. Diagrama de control difuso MISO para la regulación del flujo.	56
Figura 4.10 Conjuntos difusos para la variable Error.	58
Figura 4.11. Conjuntos difusos de la derivada del flujo.	59
Figura 4.12. Conjuntos difusos para la variable de salida PWM (ciclo de trabajo).	60
Figura 4.13. Posición de la herramienta de trabajo: a) La herramienta se encuentra en la separación inicial, donde el área de exposición corresponde al área de la base; b) La herramienta ha descendido hasta la frontera entre la pieza de trabajo y el barreno, manteniéndose el área de exposición igual al área de la base; y c) La herramienta ha penetrado en la pieza, y el área de exposición se calcula utilizando la ecuación (4.9). ...	62
Figura 4.14. Diagrama de control difuso MISO para el control del Gap	64
Figura 4.15. Conjunto difuso de la deriva de la corriente (dI).	66
Figura 4.16. Conjunto difuso para el error en el IEG.	67
Figura 4.17. Conjunto difuso para la salida (Ajuste) del control difuso.	68
Figura 4.18. Diagrama de secuencia que ilustra la distribución de las funciones en los núcleos.	71
Figura 5.1. Fotografía del prototipo ECM completo.	73
Figura 5.2. Graficas que muestran el desplazamiento de la guía lineal a configuraciones de 1/8 (a) y 1/16 (b) de paso, respectivamente.	77
Figura 5.3. Visualización grafica de la amplificación de la corriente a un factor de 16.5	78
Figura 5.4. Comparación entre los datos de estimación del gap sin aplicar filtro (a) y aquellos procesados con un filtro de media móvil (b).	81
Figura 5.5. Representación gráfica del algoritmo para el filtro de media móvil.	81

Figura 5.6. Grafica del flujo del electrolito con relación al voltaje	82
Figura 5.7. Grafica de comparación entre el PWM, Voltaje y flujo dl electrolito.....	83
Figura 5.8. Graficas de comparación del diámetro (a) y sobre corte (b) a 50 kHz con respecto al flujo y voltaje	86
Figura 5.9. Grafica de control de flujo	87
Figura 5.10. Grafica que muestra la respuesta del control del flujo ante perturbaciones	88
Figura 5.11. Grafica de los datos del gap.....	89
Figura 5.12. Comportamiento de la herramienta de trabajo durante el maquinado, a) muestra un comportamiento constante y b) muestra un comportamiento de ajuste.	90
Figura 5.13. Comportamiento de la corriente cuando la pieza de trabajo permanece inmóvil durante el maquinado en un lapso de 60 segundos.....	91
Figura 5.14. Comportamiento del gap durante el maquinado cuando la pieza de trabajo permanece inmóvil en lapso de 60 segundos.	91
Figura 5.15. Comportamiento de la corriente con el control del gap y flujo activos en el maquinado en un lapso de 250 segundos.	92
Figura 5.16. Comportamiento del flujo del electrolito con el control del gap y flujo activos en el maquinado en un lapso de 250 segundos.	93
Figura 5.17. Barrenos realizados con los controles difusos, gap y flujo.....	95
Figura 5.18. Barrenos realizados en la caracterización del flujo sin control.	96

1 INTRODUCCIÓN

El maquinado electroquímico (ECM, por las siglas en inglés de *Electrochemical Machining*) se destaca como un proceso de manufactura no convencional que emplea la electrólisis para dar forma a piezas metálicas de alta dureza, caracterizado por que la herramienta no presenta el desgaste característico de los métodos abrasivos. Este proceso transforma la herramienta y la pieza de trabajo en electrodos (cátodo y ánodo, respectivamente), generando una reacción de oxidación que facilita la remoción controlada de material. El ECM es particularmente valorado en aplicaciones de alta precisión, donde la calidad del acabado superficial y la exactitud en la geometría son esenciales (Kalpakjian & Schmid, 218).

En el ECM, la eficacia del proceso depende de variables críticas, entre las cuales se destacan la distancia inter-electrodos (*Inter Electrode Gap* o IEG, también conocido solamente como *gap*) y el flujo del electrolito. La distancia inter-electrodos, que debe mantenerse en el rango de micrómetros, es fundamental para asegurar una remoción uniforme de material y evitar cortocircuitos entre los electrodos. El control de esta variable es complejo, ya que la distancia no puede medirse directamente y debe gestionarse mediante un sistema de control en tiempo real que ajuste continuamente la posición de la herramienta (Nopalera Angeles, Algoritmo de control difuso para el ajuste de polarización de un proceso de maquinado electroquímico pulsado, 2021). El flujo del electrolito, por su parte, regula la tasa de eliminación de material y afecta la precisión del proceso; un flujo constante y bien ajustado es necesario para evitar la acumulación de residuos y asegurar la estabilidad del proceso electroquímico (Liua, Zhang, & Natsu, 2019).

Para optimizar el ECM, se requiere un sistema de monitoreo que capture variables como la corriente de maquinado, el voltaje de polarización, el caudal del electrolito y la exposición del área de trabajo. Estas variables, integradas en un sistema de control inteligente, permiten ajustar dinámicamente el proceso, manteniendo un equilibrio entre la eficiencia de remoción y la precisión del acabado. La lógica difusa, una técnica de *soft-computing* que maneja la incertidumbre y los valores intermedios, se presenta como una solución viable para este tipo de control adaptativo en el ECM, debido a su capacidad para

gestionar la variabilidad de las condiciones del proceso y proporcionar un control continuo de las variables críticas (Sadegh, 2017).

Este trabajo propone un sistema embebido basado en el microcontrolador ESP32 de doble núcleo, que aloja dos controladores difusos tipo MISO (*Multiple Inputs – Single Output*). Un controlador regula la distancia inter-electrodos, utilizando la corriente y el área de exposición como variables de entrada, mientras que el segundo controlador ajusta el flujo del electrolito en función del error y la derivada del flujo. El objetivo es mantener una separación inter-electrodos constante de 240 micrómetros, garantizando un proceso ECM estable y eficiente. La arquitectura de doble núcleo del ESP32 permite la implementación simultánea de ambos controladores, maximizando la eficiencia y capacidad de respuesta del sistema.

A pesar de los avances previos en el uso de lógica difusa y otras técnicas de control en procesos de manufactura, la integración de estos enfoques en sistemas embebidos para el control del ECM sigue siendo limitada. Investigaciones anteriores han abordado el ECM desde perspectivas diversas, pero aún existen desafíos significativos en la implementación de controles inteligentes embebidos que integren todas las variables relevantes en un único sistema compacto y de bajo costo. Esta investigación contribuye a cerrar esa brecha, proponiendo una solución embebida que optimiza el control del gap y del flujo, con el potencial de mejorar la precisión y calidad del maquinado electroquímico.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Definición del problema

El avance tecnológico y la creciente demanda de procesos industriales de alta precisión han impulsado la necesidad de desarrollar sistemas embebidos con capacidades inteligentes. Estos sistemas, reconocidos por su versatilidad y eficiencia en la ejecución de tareas específicas, han encontrado aplicaciones en una amplia gama de campos. Sin embargo, en el ámbito del maquinado electroquímico (ECM), un proceso no convencional de remoción de material que se distingue por su capacidad para mecanizar materiales difíciles de cortar con alta precisión y acabado superficial, el potencial de los sistemas embebidos como plataforma de control ha sido poco explorado.

La problemática central que aborda esta investigación reside en la necesidad de diseñar e integrar controladores inteligentes en sistemas embebidos específicamente adaptados para mejorar algunas de las características del proceso de ECM. Aunque las técnicas de *soft-computing*, como la lógica difusa, han demostrado ser eficaces en la mejora de sistemas de control, su implementación en dispositivos embebidos dentro del contexto del maquinado electroquímico presenta desafíos significativos que aún no han sido suficientemente estudiados. Por lo tanto, es relevante investigar la viabilidad de incorporar técnicas de lógica difusa en sistemas embebidos para el control del proceso ECM, con el objetivo de mejorar la precisión y el acabado superficial de las piezas trabajadas. Este enfoque no solo busca mejorar el rendimiento del proceso, sino también abrir nuevas posibilidades para el uso de sistemas embebidos en aplicaciones industriales de alta complejidad, dentro de los que potencialmente se pueden incluir posteriormente otros métodos de manufactura no convencional.

2.2 Objetivos de investigación

General

Desarrollar dos controladores difusos para un proceso de maquinado electroquímico, implementados mediante un sistema embebido de dos núcleos basado en el microcontrolador ESP32. Cada núcleo alojará un control específico: uno para regular

la distancia inter-electrodos y otro para controlar el flujo del electrolito. El control de la distancia inter-electrodos utilizará la corriente y el área de exposición como variables de entrada, mientras que el control del flujo utilizará el error, la derivada del flujo como entradas. Para el control del flujo, se busca mantener un caudal constante ajustado a una separación inter-electrodos de 240 micrómetros.

Específicos

1. Implementar la instrumentación electrónica necesaria para la obtención y monitoreo de las variables implicadas en el proceso de maquinado electroquímico (corriente de maquinado, voltaje de polarización de la herramienta y flujo del electrolito).
2. Integrar un sistema de control basado en lógica difusa para variar el voltaje de alimentación de la bomba de electrolito y de esta forma ajustar el flujo de este.
3. Diseñar un algoritmo de control difuso que se retroalimente con el monitoreo de la corriente, voltaje y área de exposición del electrodo, para mantener la distancia inter-electrodos constante a 240 μm .
4. Construir un prototipo para la verificación del correcto funcionamiento de los sistemas en el maquinado de barrenos en acero, que contemple: el sistema de recirculación del electrolito, los sensores utilizados para la medición del flujo del electrolito, el sistema de monitoreo de voltaje y corriente, y el sistema mecánico para el desplazamiento de la herramienta.
5. Evaluar si el proceso de maquinado ha mejorado mediante la comparación de los barrenos obtenidos en esta investigación con los obtenidos en trabajos anteriores.

2.3 Pregunta de investigación

¿Se puede lograr un rendimiento comparable en el proceso ECM utilizando dos algoritmos difusos para el ajuste de la distancia inter-electrodos y el flujo de electrolito, uno en cada núcleo de un sistema embebido, en comparación con trabajos previos que utilizan controladores independientes para cada variable?

2.4 Hipótesis

La implementación de dos algoritmos de control difuso programados en un sistema embebido de dos núcleos, ejecutados uno en cada núcleo, puede mejorar la distribución de tareas y los resultados en comparación con controladores programados de forma individual para las variables: distancia inter-electrodos y flujo de electrolito. Se espera que los controles en el sistema multinúcleo muestren un mejor desempeño en términos de acabado, profundidad y sobre corte de los barrenos realizados con ECM. Así mismo, demostrar la factibilidad de implementar controles inteligentes aplicados al maquinado electroquímico en sistemas embebidos con capacidades reducidas.

2.5 Justificación

Los sistemas embebidos se basan en la arquitectura SoC (*System on Chip*). Un SoC es un tipo de arquitectura de hardware donde todos los componentes necesarios para ejecutar un sistema completo están integrados en un único chip. Esto incluye el procesador principal (CPU, *Central Processing Unit*), memoria, controladores de dispositivos, interfaces de E/S (Entrada/Salida), y en algunos casos incluso unidades de procesamiento gráfico (GPU, *Graphic Processing Unit*) y otros componentes especializados.

Los sistemas en un chip han conformado una tendencia cada vez más frecuente de fabricación que integra todos los módulos de un sistema informático en un chip (G. Bleris, Garcia, V. Kothare, & Arnold, 2006). Se sabe que la integración de controladores inteligentes en SoC ofrece una serie de beneficios que pueden mejorar significativamente su rendimiento, confiabilidad y eficiencia (Arslan, Misha, Syeda, & Kanwal, 2021).

Estas características hacen que sea una buena propuesta para aplicarlo al maquinado electroquímico el cual ha generado gran relevancia debido a su capacidad para remover material de manera precisa. Sin embargo, el proceso aún enfrenta desafíos, en particular, la variabilidad en el flujo del electrolito. Se conoce que la velocidad con la que el electrolito fluye por los electrodos tiene un impacto directo en la tasa de eliminación de material y en el sobre corte resultante, lo que puede afectar la calidad y precisión del maquinado.

Por consiguiente, resulta de interés investigar el impacto del flujo del electrolito en el proceso de maquinado y explorar métodos para su control con el fin de mejorar la calidad del resultado. Actualmente, aunque existen sistemas de control que emplean variables como la corriente de maquinado, el voltaje de polarización y el área de exposición para estimar el gap en el maquinado electroquímico, aún no se ha integrado el monitoreo y control del flujo del electrolito. Además, se propone un enfoque que explore el desarrollo de un algoritmo de tipo difuso capaz de ejecutarse de forma embebida en un sistema de un solo chip ya que estos están diseñados para ser compactos, eficientes y de bajo costo.

De este modo, este trabajo propone el diseño de un sistema embebido con dos controladores difusos que integren el monitoreo y control del flujo del electrolito y el ajuste del gap en el proceso de ECM, con el objetivo de mejorar la calidad del maquinado tanto en el diámetro como en el sobre corte.

El enfoque implica el desarrollo de dos controladores implementados en un SoC de dos núcleos. Cada núcleo alojará un controlador específico: uno encargado de regular el espacio inter-electrodos y otro de gestionar el flujo del electrolito. El control del gap utilizará la corriente y el área de exposición como variables de entrada, mientras que el control del flujo empleará el error, la derivada del flujo y la salida del control del gap como parámetros de entrada. En cuanto al control del flujo, se busca mantener un caudal constante ajustado a una separación inter-electrodos de 240 micrómetros, la cual representa la salida del control del gap.

En relación con el medio de procesamiento, se propone el uso del microcontrolador ESP32 como tarjeta de desarrollo para el maquinado debido a su diseño SoC. El ESP32 integra en un solo chip un procesador de doble núcleo, memoria RAM (*Random Access Memory*), ROM (*Read Only Memory*), interfaces WiFi (*Wireless Fidelity*), y otros periféricos esenciales para el control de dispositivos electrónicos. Además, el ESP32 tiene canales ADC (*Analo-to-Digital Converter*) incorporados que permiten la medición de valores analógicos directamente, sin necesidad de utilizar convertidores adicionales, lo que permiten una integración más sencilla y un mayor ahorro de espacio. Si bien el ESP32 permite una conexión WiFi, lo que facilita enviar datos por HTTP (Protocolo de

transferencia de hipertexto, *Hypertext Transfer Protocol*) con el objetivo de mostrarlos en una interfaz gráfica, esto se complica al utilizar los dos canales ADC que incorpora ya que el módulo WiFi utiliza el segundo canal del ADC cuando esta activado (Espressif Systems, 2024).

2.6 Impactos

- Científico: El desarrollo de un algoritmo de lógica difusa que permita la experimentación en relación con el control de la distancia inter-electrodos y el flujo del electrolito, en un proceso de maquinado electroquímico, bajo el método científico.
- Tecnológico: Como resultado de la investigación se propone un sistema embebido basado en lógica difusa que permita controlar la distancia inter-electrodos y el flujo de electrolito, de tal forma que permita obtener una remoción constante con el menor sobre corte posible.

3 ESTADO DEL ARTE

El maquinado electroquímico, en adelante abreviado ECM, es un proceso altamente especializado y complejo que permite la remoción precisa de material a través de la disolución anódica, utilizando una corriente eléctrica para facilitar la acción electroquímica. Los dispositivos utilizados para llevar a cabo el proceso ECM están conformados por múltiples subsistemas integrados, cada uno desempeñando un papel determinante en la eficiencia y precisión del proceso. Estos subsistemas incluyen fuentes de alimentación de energía, sistemas de manejo de electrolito, y mecanismos de control de la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo, entre otros. La correcta coordinación de estos subsistemas es esencial para garantizar la estabilidad del proceso y la calidad del producto final.

A lo largo de los años, se han desarrollado diversos métodos computacionales que han revolucionado la implementación del ECM, optimizando su rendimiento y ampliando su aplicabilidad a materiales y geometrías cada vez más complejos. Entre estos métodos, las técnicas de control avanzadas, como la lógica difusa y otras herramientas de *soft computing*, han emergido como innovaciones clave en el control de los parámetros críticos del proceso. Estas técnicas permiten un control más preciso y adaptable, lo que resulta en mejoras significativas en la calidad del acabado superficial y en la eficiencia de la remoción de material.

En esta sección, se realiza un análisis de la literatura existente sobre los subsistemas involucrados en el ECM y los avances computacionales que han sido implementados para mejorar este proceso de manufactura no convencional. Este análisis tiene como objetivo el identificar las oportunidades y desafíos que presenta la integración de técnicas de *soft-computing* en los sistemas embebidos, con el objetivo de contribuir a la mejora del proceso ECM, principalmente entorno a lo relacionado con el control de algunas de las variables más importantes del proceso, como la distancia inter-electrodos.

3.1 Maquinado electroquímico

Los procesos de mecanizado no convencionales han surgido como alternativas notables a los métodos de mecanizado tradicionales (torneado, fresado, barrenado mecánico, entre otros), especialmente para materiales que son difíciles de mecanizar con técnicas convencionales. Estos procesos son particularmente útiles para materiales avanzados y compuestos que presentan alta resistencia, dureza y otras propiedades desafiantes. Los procesos de mecanizado no tradicionales se emplean hoy en día para dar forma a nuevas aleaciones metálicas y no metálicas, cumplir con exigencias geométricas complejas en las piezas de trabajo y evitar daños superficiales asociados con el mecanizado convencional (Tonkonogyi, et al., 2020).

Dentro de las variantes de procesos de mecanizado no convencional más comunes se incluyen (Gupta & Gupta, 2018): el mecanizado por descarga eléctrica (EDM, por las siglas en inglés de *electrical discharge machining*), el mecanizado electroquímico (ECM), el mecanizado por rayo láser (LBM, *laser beam machining*), el mecanizado por chorro de agua abrasivo (AWJM, *abrasive water-jet machining*), el mecanizado ultrasónico (USM, *ultrasonic machining*) y el mecanizado químico (CM, *chemical machining*).

El maquinado electroquímico es un proceso de manufactura no convencional en el cual intervienen diversos factores como transporte de masa, transferencia de calor y diferentes reacciones químicas. Es una tecnología que permite dar forma y acabados de alta calidad a partir del acero y otros metales (aleaciones conductoras). Los principales componentes de un sistema para llevar a cabo el proceso ECM son: fuente de polarización de corriente directa (CD), electrolito, elemento para el filtrado del electrolito, bombas para la succión y distribución del electrolito y celda electrolítica (Kalpakjian & Schmid, 218).

3.1.1 Proceso de disolución anódica como base del ECM

El proceso de remoción de material en ECM es llevado a cabo en una celda electrolítica mediante un proceso de oxidación - reducción llamado electrólisis; este inicia en el ánodo, que constituye la pieza de trabajo (material a mecanizar), que se encuentra sumergida en un flujo rápido de electrolito que cierra el circuito eléctrico. Al suministrar una corriente eléctrica, iones metálicos se desprenden de la pieza de trabajo, fluyendo

hacia la herramienta, que funge como cátodo (motivo por el que a dichos iones se le conoce como cationes). Debido a que el electrodo que aporta los cationes es el ánodo, donde la especie reductora se oxida y pierde electrones, el mecanismo electroquímico asociado se denomina “disolución anódica”, y es el que produce la remoción del material de la pieza de trabajo, que toma la forma de la superficie de la herramienta expuesta al electrolito. La disolución anódica es un proceso electroquímico crítico en el que el electrodo anódico de metal se disuelve en su forma iónica bajo la influencia de una corriente eléctrica (Barcia, Mattos, Pébère, & Tribollet, 1996).

Tanto el electrolito, que típicamente es una solución de H₂O (Agua) + NaCl (Cloruro de sodio), como la composición molecular de la herramienta, principalmente basada en hierro, representan la parte esencial de una buena remoción de material (Nopalera Angeles, Algoritmo de control difuso para el ajuste de polarización de un proceso de maquinado electroquímico pulsado, 2021). Cabe mencionar que pueden utilizarse otros metales que produzcan aleaciones conductoras de la electricidad, y también otros compuestos electrolíticos, pero el principio de remoción del material es muy similar, además de que, en los materiales usados en este trabajo de investigación se usan aleaciones de hierro, por lo que las explicaciones en los siguientes párrafos se consideran una buena base para comprender el fenómeno que ocasiona la remoción del material del ánodo.

La secuencia de reacciones electroquímicas que producen la disolución anódica, y por lo tanto fundamentan la remoción del material de la pieza de trabajo, inicia por la diferencia de potencial que se presenta al polarizar los electrodos con una fuente de energía eléctrica. Si se considera el supuesto explicado de utilizar un electrolito acuoso basado en una solución de cloruro de sodio, esto provoca una reacción química que cataliza el intercambio de iones afectando a la solución en la celda electrolítica, donde las reacciones electroquímicas ocurren del siguiente modo (Lower, 2018), (Gomelya, Kryzhanovska, Shabliy, & Levytska, 2020), (Department of Education Open Textbook Pilot Project, 2020):

En las cercanías del cátodo, el exceso de electrones provoca una reacción de reducción en el agua, disociándola, como se expresa en la ecuación (3.1):



Como se aprecia, en el cátodo se produce hidrógeno gaseoso, que se libera en el electrolito y generalmente sale hacia la atmósfera en forma de burbujas. Los iones OH^- , también conocidos como radical hidroxilo, son muy activos químicamente, y reaccionan rápidamente en la solución.

Por otro lado, en las cercanías del ánodo (pieza de trabajo) ocurre la oxidación del hierro, que se desprenden del material como iones y se disuelven en el electrolito, como se presenta en la ecuación (3.2).



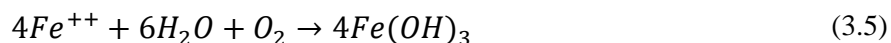
En el agua, la sal disuelta se disocia en iones, como se presenta en la ecuación (3.3), fenómeno producido por la solución en sí misma, y que precisamente permite la conducción de energía eléctrica del electrolito.



Los iones Cloruro (Cl^-), por su polaridad, se dirigen al ánodo, y reaccionan rápidamente con los iones de Hierro que se están desprendiendo de este electrodo durante su oxidación, recombinándose y produciendo Cloruro de Hierro (II), como se muestra en la ecuación (3.4).



El Cloruro de Hierro (II) permanece disuelto en el electrolito y favorece la remoción del material; sin embargo, los iones de Hierro pueden ser oxidados adicionalmente en presencia de oxígeno y agua, para formar Hidróxido de Hierro (III), como se muestra en la ecuación (3.5).



El Hidróxido de Hierro (III) es un compuesto que se precipita en el electrolito, formando residuos lodosos, por lo que generalmente se requiere que este residuo deba ser desplazado por un flujo continuo de electrolito, para que se permita la continuidad del proceso de remoción.

Cabe mencionar que los iones de sodio (Na^+) no participan directamente en las reacciones químicas, pero su papel es muy relevante en el proceso de disolución anódica, pues contribuye a la estabilidad de la celda electrolítica, tanto desde el punto de vista electroquímico como en la conservación de la acidez (pH, potencial de Hidrógeno) que se incrementa con la liberación y permanencia de las burbujas de Hidrógeno gaseoso generado durante la disociación del agua (Saravi & Panagiotopoulos, 2021). En el ECM, los iones Na^+ y OH^- son productos naturales de la disociación del electrolito y la reducción del agua en el cátodo, respectivamente.

3.1.2 Velocidad de remoción del material

En el ECM, un aspecto fundamental es la medición de la cantidad de material removido, conocido como la Velocidad de Remoción de Material (*Material Removal Rate*, MRR, por sus siglas en inglés). Este parámetro es útil para evaluar la eficiencia y precisión del proceso, ya que determina la cantidad de material eliminado de la pieza de trabajo en un tiempo dado.

La determinación del MRR en ECM se basa en la aplicación de la Primera Ley de Faraday de la Electrólisis, la cual establece que *"la cantidad de cambio químico que produce una corriente eléctrica, es decir, la cantidad de metal disuelto es directamente proporcional a la cantidad de electricidad transmitida a través del electrolito"* (Groover, 2007). Esta ley implica que el MRR es proporcional al producto de la corriente eléctrica (I) y el tiempo (t) durante el cual esta corriente se aplica. De acuerdo con la citada referencia, la ecuación que describe esta relación, conocida como la ecuación de Faraday, se puede expresar mediante la ecuación (3.6):

$$MRR = \frac{Ce \cdot I \cdot t}{\rho \cdot F \cdot n} \quad (3.6)$$

Donde:

MRR	Velocidad de remoción de material (mm^3/s)
Ce	Peso equivalente, dependiente del material (M/n), donde n es el número de electrones involucrados en el proceso de oxidación
I	Corriente aplicada (A)
t	Tiempo que dura la corriente aplicada (s)
ρ	Densidad del material (kg/m^3)
F	Constante de Faraday, equivalente a $96485 \text{ C}/\text{mol}$
n	Número de moles de metal por cada mol de electrones

Groover (Fundamentos de manufactura moderna, 2007) también expone la ecuación anterior como una función simplificada para determinar el volumen removido, como una expresión geométrica de la velocidad de remoción, de tal manera que se puede expresar como en la ecuación (3.7).

$$V = Cit \quad (3.7)$$

Donde:

V	Volumen de metal removido [mm^3]
t	Tiempo [s]
I	Corriente [A]
C	Tasa de remoción [$\frac{\text{mm}^3}{\text{A}\cdot\text{s}}$]

La MRR proporciona una medida directa del volumen de material removido, y también es un indicador de la eficiencia del proceso de ECM. Una MRR alta sugiere un

proceso rápido, pero puede estar asociada con un control menos preciso de la geometría de la pieza y del acabado superficial. Por otro lado, una MRR baja puede indicar un control más fino y preciso, adecuado para aplicaciones donde la calidad del acabado es prioritaria (Neto, Silva, & Silva, 2006).

3.1.3 Distancia inter-electrodos

La distancia inter-electrodos (IEG, por las siglas de *inter-electrode gap*) es un parámetro importante en el maquinado electroquímico, que se refiere a la separación existente entre la herramienta y la pieza de trabajo. Dicha separación o brecha es necesaria para garantizar la eficiencia, precisión y calidad del proceso. Permite una circulación correcta y uniforme del electrolito, y también influye en la corriente eléctrica. Una IEG más pequeña aumenta la densidad de corriente, acelerando la remoción de material, pero puede incrementar el riesgo de cortocircuitos. Por el contrario, una IEG demasiado amplia reduce la corriente, disminuyendo la eficiencia y afectando la precisión dimensional (Kalpakjian & Schmid, 218).

La ley de Ohm explica cómo se relacionan el voltaje (E), la resistencia (R) y la corriente (I). Cuando esta ley se aplica al maquinado electroquímico, es necesario considerar ciertos aspectos específicos, como la distancia entre la herramienta y la pieza, la resistividad del electrolito (r) y el área de contacto frontal entre la herramienta y la pieza (A). En consecuencia, la ecuación (3.8) permite calcular la corriente considerando tanto el área como la separación entre los electrodos (IEG):

$$I = \frac{E \cdot A}{IEG \cdot r} \quad (3.8)$$

Donde:

E	Voltaje aplicado (V)
A	Área (mm^2)
IEG	Distancia entre electrodos (mm)

r Resistividad de electrolito ($\Omega. mm$)

Para estimar el IEG, se emplea la corriente de maquinado. Utilizando la ecuación (1.8), se obtiene la expresión de la ecuación (3.9).

$$IEG = \frac{E \cdot A}{I \cdot r} \quad (3.9)$$

Donde:

IEG	Distancia entre electrodos (mm)
E	Voltaje (V)
A	Área de exposición (mm^2)
I	Corriente (A)
r	Resistividad de electrolito ($\Omega. mm$)

3.1.4 Sobre corte como indicador de la precisión

El sobre corte en el ECM se refiere al exceso de material que se elimina más allá de las dimensiones de la herramienta de trabajo, provocando que las dimensiones finales de la pieza no coincidan con las especificaciones originales. En este sentido, los diámetros de los orificios o los contornos pueden ser más grandes de lo planeado (Kalpakjian & Schmid, 218). Es por eso por lo que este parámetro es un indicativo de la precisión del sistema; en la Figura 3.1 se ilustra el sobre corte y la manera en que se determina.

Este indicador solo puede medirse al finalizar el proceso de maquinado y se calcula mediante la ecuación (3.10).

$$\text{Sobre corte} = \frac{D2 - D1}{2} \quad (3.10)$$

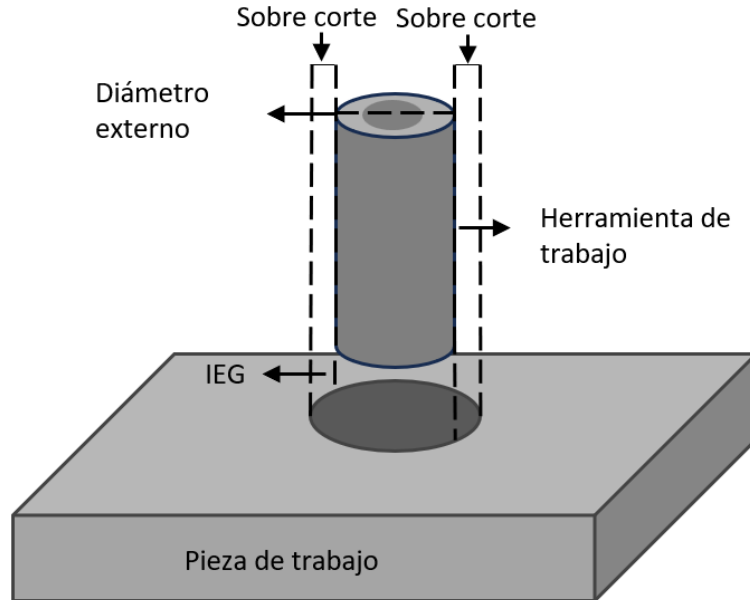


Figura 3.1. Representación gráfica del sobre corte.

Cabe mencionar que el sobre corte es un parámetro íntimamente ligado a la naturaleza del proceso, y existirá siempre, pues depende de la separación entre electrodos, que debe existir para que se lleve a cabo la remoción de material mediante el fenómeno electroquímico descrito anteriormente. Se desea minimizar, pero debe quedar claro que nunca podrá ser cero, ya que además por este espacio fluye el electrolito, junto con los subproductos de la remoción del material.

3.2 Estructura de un equipo para ECM

3.2.1 Sistema mecánico

Dentro de los requisitos destacados del ECM se encuentra el sistema mecánico, el cual facilita el movimiento tanto de la herramienta como de la pieza de trabajo. Este sistema, por lo general, se basa en Control Numérico por Computadora (CNC), lo que posibilita el movimiento de la herramienta en las coordenadas X, Y, y Z. El movimiento suele estar controlado por motores paso a paso u otros actuadores, que determinan la posición de la herramienta respecto a la pieza de trabajo. Este movimiento afecta directamente a la calidad del maquinado, por lo que un movimiento preciso asegura que

el espacio IEG sea uniforme y constante durante todo el proceso, lo que evita problemas como el exceso de material removido, o una velocidad de remoción muy lenta.

Un ejemplo de sistemas basados en CNC se presenta en el trabajo de (Segundo, 2023). En la Figura 3.2 se pueden observar 3 motores a pasos, los cuales de manera coordinada mueven los ejes en el plano cartesiano tridimensional. El movimiento en cada eje es controlado por motores a pasos NEMA 23, que tienen una tensión nominal de 3.2 V y un torque de 19.44 kgf/cm, proporcionando 200 pasos por revolución, equivalentes a 1.8 grados por pulso. Utiliza el controlador TB6560 para manejar los pulsos del motor. El sistema tiene la ventaja de configurarse con diferentes resoluciones de movimiento: 20 μm (paso completo), 10 μm (medio paso), 5 μm (octavo de paso) y 2.5 μm (dieciseisavo de paso). Aunque en la configuración de 1/16 de paso implica la resolución más precisa, las limitaciones mecánicas de la estructura de soporte ocasionan que en el rango de menor que 10 micrómetros, para cada paso se presenta un desplazamiento significativo debido a las tolerancias geométricas de los componentes, lo que afecta la precisión requerida en esta escala.

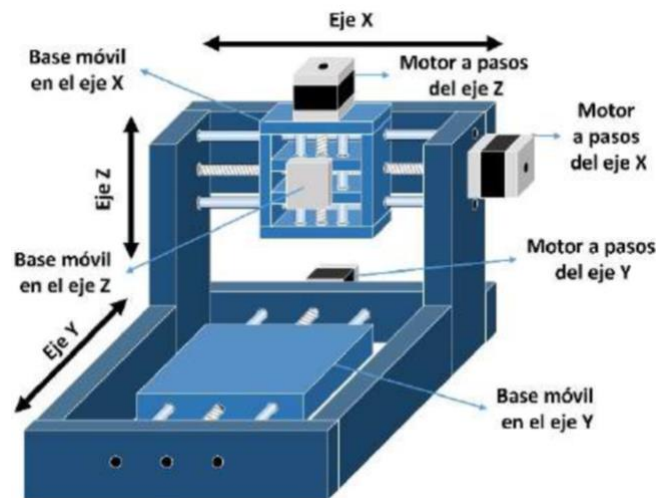


Figura 3.2. Representación gráfica del sistema mecánico de un prototipo ECM obtenida del trabajo de (Segundo, 2023)

También se han llevado a cabo investigaciones que describen la integración de dos tecnologías de fabricación, la electroquímica y la electroerosión, en un único proceso de mecanizado, donde se han implementado motores paso a paso con un sistema de control

de bucle cerrado, denominado Ezi-Servo, lo que proporciona una alta precisión en el posicionamiento (Skoczypiec & Ruszaj, 2014). Este sistema, que se aprecia en la Figura 3.3, tiene una resolución de 32,000 pasos por rotación para controlar el movimiento de los ejes, adoptando un diseño similar al de una máquina CNC. Está compuesto por una estructura de granito con aislamiento de vibraciones, una mesa X-Y precisa modelo GXY15-1010JWP y una mesa Z GX15-15JWP. Una de las principales ventajas es la precisión X, Y y Z de 0.16 μm , aunque las desventajas más significativas son los costos altos de mantenimiento y operación debido a la complejidad de los componentes.

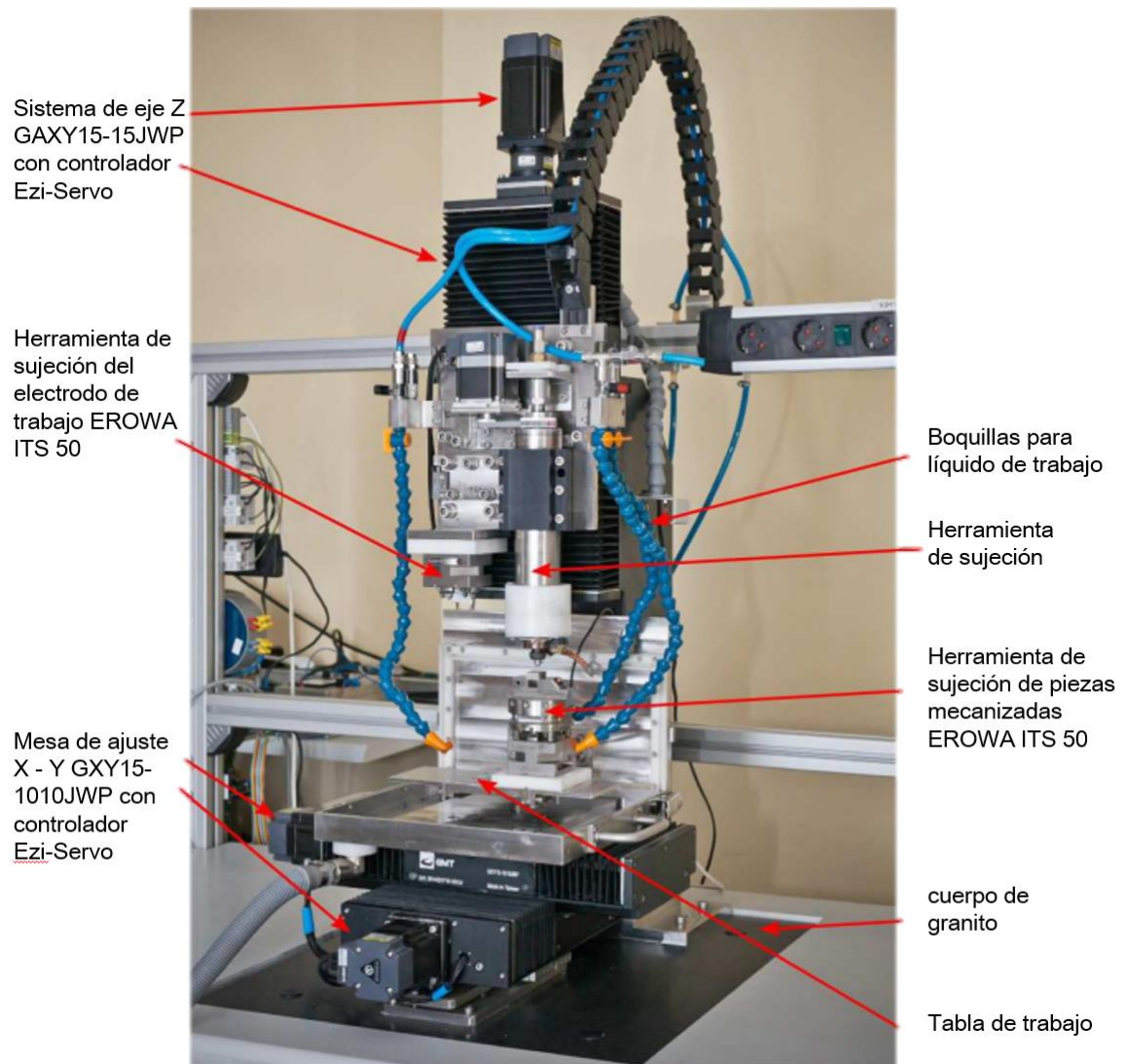


Figura 3.3. Prototipo de maquinado electroquímico- electro descarga adaptado del trabajo de (Skoczypiec & Ruszaj, 2014)

El sistema mecánico que posibilita el movimiento de los electrodos se apoya en motores a pasos y ejes de desplazamiento. Para llevar a cabo este movimiento, se necesita un controlador que convierta las instrucciones procedentes de una computadora de placa única (Segundo, 2023) o de una computadora convencional (Nopalera Angeles, 2021), en voltaje y corriente necesarios para impulsar dicho movimiento.

3.2.2 Sistema eléctrico

La fuente de energía es un componente fundamental del sistema de maquinado electroquímico. El voltaje aplicado a los electrodos crea una celda electrolítica que genera una corriente eléctrica entre la herramienta de trabajo y la pieza de trabajo. Esta corriente, conocida como corriente de maquinado, está directamente relacionada con la tensión o diferencia de potencial aplicado por la fuente de alimentación. Es esta corriente la que facilita el intercambio iónico entre los electrodos y promueve la disolución anódica, proceso fundamental para el maquinado de la pieza (Segundo, 2023).

El uso de corriente continua (CC) permite una alta eficiencia en el moldeado, sin embargo, la precisión es limitada, entre 0.2 y 0.7 mm. A partir de 1967, se desarrolló un sistema de Maquinado Electroquímico Pulsado (MEQP) que empleaba un voltaje inverso para eliminar la capa de pasivación de la pieza de trabajo (Cook, Loutrel, & Meslink, 1967). La fuente de energía pulsada opera con un voltaje de entre 0 y 15 V y una corriente de hasta 5 A. La alimentación principal es de 220 V de corriente alterna monofásica, la cual se convierte en una fuente de CC de bajo voltaje pulsado mediante un transformador reductor y un rectificador controlado por silicio. Un módulo generador de pulsos se utiliza para ajustar la fuente de alimentación a la forma pulsada requerida. Los valores de voltaje y corriente se registran utilizando un voltímetro y un amperímetro (Bhattacharyya, Mitra, & Boro, *Electrochemical machining: new possibilities for micromachining*, 2002).

También se ha explorado el uso de pulsos ultracortos (en la escala de nanosegundos) en el ECM, sobre todo cuando la escala de maquinado también se reduce a la escala de nanómetros (Chang, et al., 2022). Sin embargo, estas fuentes de polarización requieren de componentes especiales para su implementación, por lo que las fuentes pulsadas, usualmente en el orden de algunos kiloHertz, siguen siendo la opción más utilizada (Zhao, et al., 2023).

3.2.3 Instrumentación

El sistema de medición en un proceso de maquinado electroquímico involucra la supervisión y control de varias variables críticas que influyen directamente en la eficiencia del proceso, principalmente la tasa de remoción de material y la calidad superficial de la pieza trabajada. Por lo tanto, se precisa de instrumentación adecuada que adquiera y procese las variables siguientes:

Concentración del electrolito: La concentración del electrolito utilizado en el proceso tiene un impacto significativo en la eficiencia del ECM. Concentraciones más altas suelen mejorar la MRR, ya que facilitan la disolución del material de la pieza. Además, una adecuada concentración de electrolito puede contribuir a obtener un mejor acabado superficial, al permitir un flujo más eficiente de iones que ayudan a remover el material de forma más uniforme (Neto, Silva, & Silva, 2006). Puesto que la concentración del electrolito no cambia durante el proceso, la concentración se determina de manera previa, utilizando un medidor de conductancia eléctrica.

Caudal del electrolito: El flujo del electrolito debe ser controlado cuidadosamente para garantizar una eliminación efectiva del material disuelto durante el proceso de ECM. Un caudal adecuado asegura una distribución uniforme del electrolito sobre la superficie de trabajo, lo que permite una remoción de material más homogénea. Si el caudal es insuficiente, puede generar acumulación de material disuelto que afecte la calidad del maquinado y la eficiencia del proceso (Sohrabpoor, Khanghah, Shahraki, & Teimouri, 2015).

Voltaje: El voltaje es uno de los parámetros más importantes en el ECM, ya que afecta directamente la tasa de remoción de material y la rugosidad de la superficie. Un aumento en el nivel de voltaje suele incrementar la MRR, lo que permite una mayor rapidez en el proceso de maquinado. Sin embargo, este incremento puede también tener efectos negativos en la calidad de la superficie, generando acabados menos uniformes o más rugosos si no se controla adecuadamente.

Distancia entre electrodos: El tamaño de la separación entre el electrodo y la pieza de trabajo es un factor clave para determinar la precisión del maquinado. Una distancia más pequeña generalmente conduce a una mayor precisión y un mejor acabado

superficial, pero también puede disminuir la MRR. Es esencial mantener un equilibrio entre la precisión deseada y la eficiencia de remoción de material para optimizar el proceso (Prayogo & Lusi, 2022).

Velocidad de avance: La velocidad de avance del electrodo hacia la pieza también es una variable crítica. Un ajuste adecuado de esta variable puede maximizar la MRR sin comprometer la calidad del acabado. Si la velocidad de avance es demasiado alta, puede resultar en una mayor MRR, pero podría afectar negativamente la precisión y la calidad de la superficie. Por el contrario, una velocidad de avance demasiado baja podría mejorar el acabado, pero a costa de una menor eficiencia en la remoción de material (Neto, Silva, & Silva, 2006).

En trabajos previos se describen formas de adquisición de datos para las variables eléctricas del proceso (voltaje de polarización y corriente de maquinado) mediante un conversor analógico-digital MCP3204, que ofrece una resolución de 12 bits y se comunica con la SBC (*Single Board Computer*) a través de protocolos serie. Para medir la corriente de maquinado, se emplea un sensor de corriente RMS T60404-N, el cual está conectado en serie con la herramienta de trabajo. Este sensor permite obtener la magnitud precisa de la corriente que fluye durante el proceso de maquinado electroquímico. En cuanto a la medición del voltaje de polarización, se utiliza un divisor de voltaje que garantiza que las señales de salida no excedan los 5V lógicos, protegiendo así los componentes electrónicos. Adicionalmente, se emplea un integrado AD536 para calcular el valor eficaz (RMS, *root mean square*) de la señal pulsada, lo que permite obtener la magnitud exacta del voltaje aplicado durante el maquinado (Catarino, Granda, & Pérez, Diseño y desarrollo de estación compacta de micro-maquinado electroquímico pulsado bipolar, 2024).

3.2.4 Sistema de recirculación de electrolito

Este sistema es el encargado de mover el fluido electrolítico, filtrarlo y asegurarse que el caudal es el adecuado para que se lleve a cabo el proceso ECM. Las características del sistema de recirculación de electrolitos en ECM influyen significativamente en el proceso de mecanizado.

Se han realizado experimentaciones que proponen un suministro pulsante de electrolito radial para mejorar la eficiencia del mecanizado en el WECM. En este enfoque, la herramienta utilizada es un electrodo tubular con una serie de micro agujeros dispuestos a lo largo de su superficie cilíndrica. Este diseño permite una distribución más uniforme del electrolito durante el proceso de maquinado, lo que optimiza la remoción de material (Xu, Fang, Han, & Zhu, 2020). En la Figura 3.4 se observa de manera gráfica lo explicado anteriormente.

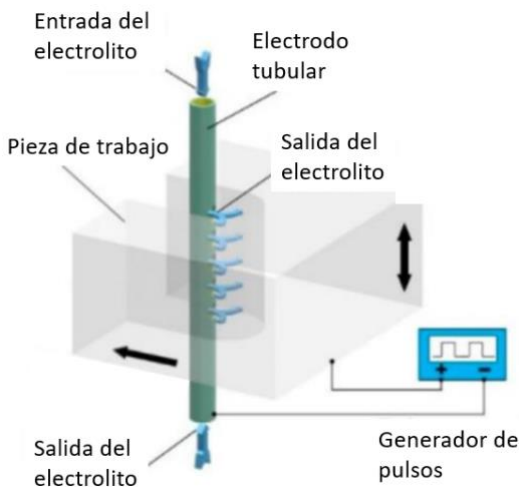


Figura 3.4. Representación gráfica de la herramienta de trabajo con micro agujeros; imagen modifica de (Xu, Fang, Han, & Zhu, 2020).

El sistema de flujo de electrolitos suministra electrolito fresco a la cámara de maquinado, donde se encuentra el espacio entre los electrodos. Este flujo se lleva el material disuelto, que luego es reciclado. Aunque el maquinado puede realizarse en una cámara llena de electrolito estático, esto presenta desventajas, ya que los residuos generados durante el proceso contaminan el electrolito, haciéndolo necesario filtrar, y la acumulación de desechos en el espacio inter-electrodos puede causar obstrucciones y cortocircuitos.

La cámara de maquinado tiene una entrada y una salida para el electrolito, que fluye hacia la zona de maquinado a una velocidad moderada para evitar que la micro herramienta vibre o se doble por la fuerza hidráulica. El material eliminado se disuelve en el electrolito, que sale de la cámara hacia un depósito donde se filtra para eliminar

partículas de desecho. Luego, el electrolito se recircula mediante una bomba centrífuga. Tanto la tubería interna como la bomba suelen tener un recubrimiento anticorrosivo, como polipropileno. Un caudalímetro mide el flujo del electrolito, y una válvula controla su velocidad (Fang, Zou, Chen, & Zhu, 2017).

3.2.5 Accesorios

En la literatura se describen varias técnicas para acomodar y sostener los electrodos durante el proceso de maquinado electroquímico. Un ejemplo investigado utiliza un alambre hueco de acero inoxidable tipo AISI304, el cual está montado sobre un cojinete de aire. Este sistema induce una vibración axial de gran amplitud en la herramienta de trabajo, cuyo objetivo es facilitar la eliminación de burbujas generadas durante las reacciones electroquímicas, así como el electrolito acumulado. Como complemento, se emplea un contenedor con paneles de vidrio que actúa como depósito para el electrolito, donde también se posiciona la pieza de trabajo (Fang, Zou, Chen, & Zhu, 2017).

En otros trabajos previos la herramienta de trabajo se sostiene por un accesorio en la corredera del eje Z que puede moverse verticalmente y está integrada con un motor paso a paso. La pieza de trabajo está montada en una cámara de mecanizado que está llena del electrolito. La cámara de mecanizado descansa sobre el dispositivo de montaje de trabajo y está integrada con motores paso a paso, que le permiten moverse a lo largo del plano X-Y. Los tres motores paso a paso, es decir, el motor del eje X, el motor del eje Y, y el motor del eje Z, están interconectados con el controlador programable CNC. El desplazamiento de los ejes suele ser de alrededor de 100 a 200 mm. El movimiento de la herramienta y la cámara de mecanizado se puede controlar utilizando una programación de control numérico (CN). Como el requisito para el espacio entre electrodos es del orden de varios micrómetros, la resolución para la micro alimentación está en el rango de 0.1 a 1 μm por paso (Xu, Fang, Han, & Zhu, 2020).

3.3 Lógica difusa

La lógica difusa es una técnica del *soft computing*, y se considera una rama de la inteligencia artificial que se enfoca en el manejo de la incertidumbre y la aproximación en

la toma de decisiones. A diferencia de la lógica clásica, que se limita a valores binarios de 0 o 1, es decir, verdadero o falso, la lógica difusa introduce el concepto de grados de pertenencia. Esto significa que las variables pueden tener un valor entre 0 y 1, permitiendo representar estados intermedios y manejar situaciones en las que la información es imprecisa o no está claramente definida (Trillas & Eciolaza, 2015).

Esta flexibilidad es lo que hace que la lógica difusa sea útil en el contexto de sistemas de control. En lugar de basarse en reglas estrictas y deterministas, los controladores difusos pueden utilizar una lógica que refleja más de cerca el razonamiento humano, que a menudo trabaja con información parcial y decisiones aproximadas. Esto permite que los sistemas basados en lógica difusa sean adaptables y eficaces en una amplia variedad de aplicaciones.

Como un dato relevante, cabe mencionar que Mamdani fue el primero en implementar un control basado en lógica difusa, por lo que existe una arquitectura de control difuso que lleva su nombre (Camacho, Iglesias, Herrera, & Aboukheir, 2021). Desde entonces, la lógica difusa ha sido adoptada en diversas aplicaciones industriales debido a su capacidad para manejar la incertidumbre y mejorar la robustez de los sistemas de control.

3.3.1 Conjuntos difusos

En los conjuntos difusos, las operaciones básicas comparten similitudes con las operaciones en conjuntos clásicos, pero se adaptan para manejar el grado de pertenencia de los elementos, que varía entre 0 y 1. A continuación se describe cómo funcionan estas operaciones en los conjuntos difusos (Trillas & Eciolaza, 2015).

Unión de conjuntos difusos $A \cup B$: la unión en los conjuntos difusos se define como el máximo valor de membresía entre los conjuntos involucrados. Esto refleja el concepto de que un elemento pertenece a la unión en la medida de su mayor grado de pertenencia en cualquiera de los conjuntos individuales esta se puede expresar por la ecuación (3.11).

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.11)$$

Intersección de conjuntos difusos $A \cap B$: La intersección, por otro lado, se calcula mediante la ecuación (3.12) como el mínimo valor de membresía. Esto significa que un elemento pertenece al conjunto intersección solo en la medida de su menor grado de pertenencia en los conjuntos originales.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.12)$$

Complemento de un conjunto difuso \bar{A} . El complemento en los conjuntos difusos se calcula como el inverso del grado de pertenencia de un elemento en el conjunto. Esto representa el grado al cual un elemento no pertenece al conjunto esto se puede ver expresado por la ecuación (3.13).

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.13)$$

Estas operaciones permiten manejar los conjuntos con una flexibilidad que refleja mejor la incertidumbre en la pertenencia, características esenciales en muchos problemas reales donde los límites de los conjuntos no son claramente definidos (Leyva Bravo, 2018).

3.3.2 Variables lingüísticas

Los valores de los conjuntos difusos pueden ser representados por variables lingüísticas para describir el estado de un fenómeno. Por ejemplo, "frío", "tibio" y "caliente", son nombres de conjuntos difusos en un universo de discurso que abarca de 0 a 35 grados centígrados. En este contexto, "frío" se asocia con un rango de 0 a 18 grados, "tibio" con un rango de 15 a 25 grados, y "caliente" con un rango de 22 a 30 grados centígrados (Ponce, 2010). En la Figura 3.5, a manera de ejemplo, se puede observar cómo se representan gráficamente estos conjuntos.

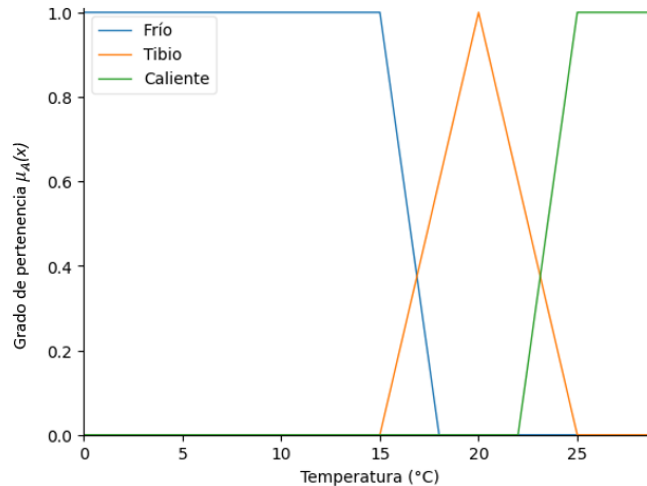


Figura 3.5. Ejemplo de conjuntos difusos para la variable lingüística “Temperatura”.

3.3.3 Fusificación y funciones de membresía

La fusificación es el proceso que convierte un elemento del universo de discurso en un valor difuso mediante funciones de membresía (Segundo, 2023). La función de membresía tiene diferentes características (Trillas & Eciolaza, 2015) (Leyva Bravo, 2018), que se ilustran de manera gráfica en la Figura 3.6 y se describen a continuación:

1.- Soporte de la función: Es el intervalo de valores en los que la variable lingüística tiene algún grado de pertenencia al conjunto difuso, excluyendo aquellos valores donde la pertenencia es diferente a cero ($\mu_A(x) \neq 0$).

2.- Núcleo: Es la parte del conjunto difuso donde se presenta el máximo grado de pertenencia ($\mu_A(x) = 1$).

3.- Fronteras: Son las zonas donde la membresía varía entre 0 y 1, representando transiciones graduales entre los estados de pertenencia ($0 < \mu_A(x) < 1$).

4.- Puntos de cruce: Son aquellos valores en el universo de discurso donde la pertenencia es exactamente 0.5. Estos puntos indicaran el ancho de banda de la función de membresía, calculado como el valor absoluto de la diferencia entre ambos puntos de cruce $\mu_A(x) < 1 = 0.5$.

5.- Altura: Es el valor máximo de membresía que alcanza la función, indicando el grado máximo de pertenencia de un elemento al conjunto difuso ($\max(\mu_A(x))$).

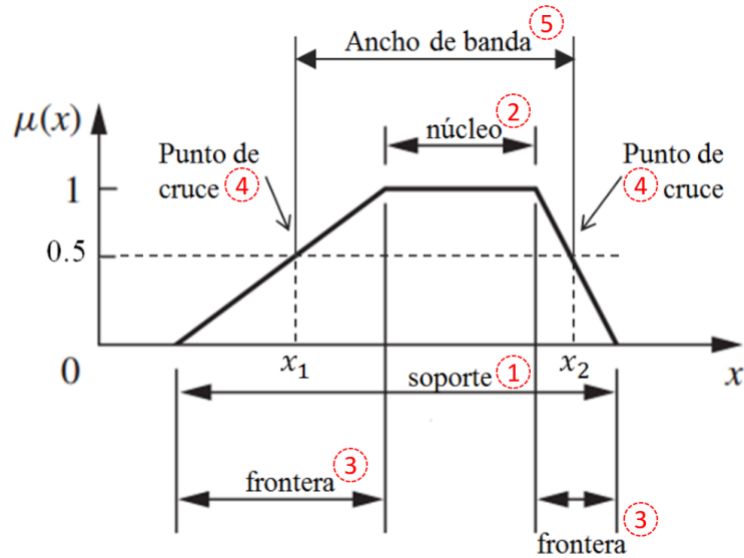


Figura 3.6. Descripción gráfica de las características de las funciones de membresía.
Adaptada de (Leyva Bravo, 2018).

La función de membresía es un concepto matemático el cual describe la forma y el grado de pertenencia de los elementos de un conjunto difuso. Esta función define la forma del conjunto el cual puede ser: Singleton (Figura 3.7), Trapezoidal (Figura 3.8), Triangular (Figura 3.9), Gaussiana (Figura 3.10) o Sigmoidal (Figura 3.11), de la misma manera indica el grado de pertenencia con un rango de valores que van de 0 a 1 (Ponce, 2010), (Cintula, Horcík, & Noguera, 2015).

$$\mu_A(x; a) = \begin{cases} 1; & x = a \\ 0; & x \neq a \end{cases}$$

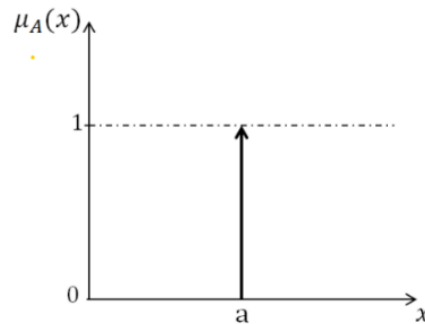


Figura 3.7. Función de membresía Singleton adaptada de (Leyva Bravo, 2018).

$$\mu_A(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0; & x < a \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right); & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \left(\frac{d-x}{d-c}\right); & c \leq x \leq d \\ 0; & x > d \end{cases}$$

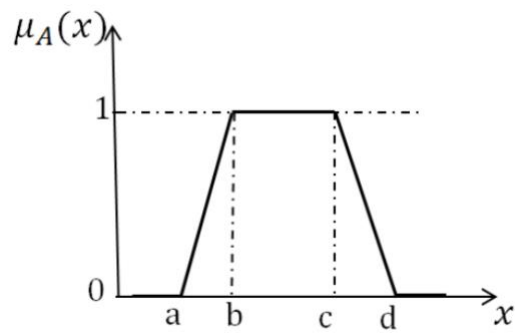


Figura 3.8. Función de membresía Trapezoidal adaptada de (Leyva Bravo, 2018).

$$\mu_A(x; a, b, c) = \begin{cases} 0; & x < a \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right); & a \leq x \leq b \\ \left(\frac{c-x}{c-b}\right); & b \leq x \leq c \\ 0; & x > c \end{cases}$$

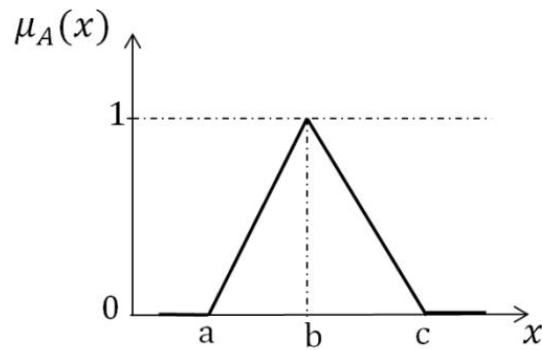


Figura 3.9. Función de membresía Triangular adaptada de (Leyva Bravo, 2018)

$$\mu_A(x; c, \sigma) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma}}$$

c : centro

σ : ancho

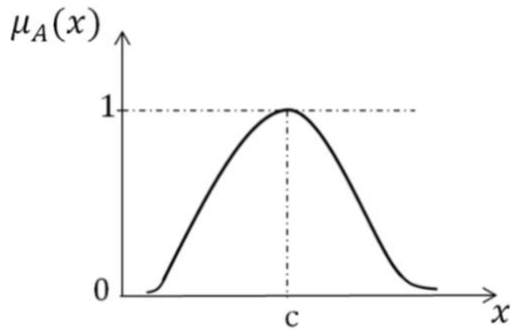


Figura 3.10. Función de membresía Gaussiana adaptada de (Leyva Bravo, 2018)

$$\mu_A(x; a, b, c) = \begin{cases} 0; & x < a \\ 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2; & a \leq x \leq b \\ -2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2; & b \leq x \leq c \\ 1; & x > c \end{cases}$$

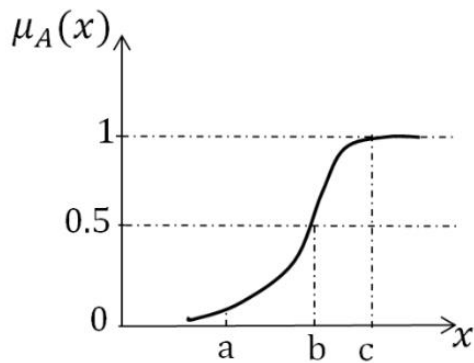


Figura 3.11. Función de membresía Sigmoidal adaptada de (Leyva Bravo, 2018)

3.3.4 Reglas de inferencia

La lógica difusa se distingue por su enfoque heurístico para la toma de decisiones, lo que significa que se basa en reglas empíricas derivadas de la experiencia y la observación para llegar a soluciones prácticas, aunque no necesariamente óptimas en todos los casos. Estas reglas heurísticas son fundamentales para la capacidad de la lógica difusa de manejar situaciones complejas e inciertas (Cintula, Horcík, & Noguera, 2015).

A diferencia de los sistemas tradicionales, que operan con valores estrictamente definidos, la lógica difusa permite trabajar con grados de verdad, es decir, con valores que pueden variar entre 0 y 1, reflejando la realidad más cercana a cómo los humanos toman decisiones. Las reglas en la lógica difusa, que se conocen como reglas de inferencia, adoptan la forma de "si <condición>, entonces <consecuencia>"; por esto también se han denominado reglas difusas (Trillas & Eciolaza, 2015).

Estas reglas establecen una relación entre un antecedente (la condición) y un consecuente (la consecuencia). Por ejemplo, una regla difusa en un sistema de control de temperatura podría ser: "Si la temperatura es alta, entonces disminuye la potencia del calentador". A diferencia de un sistema clásico, donde "alta" y "disminuir" tendrían valores absolutos, en un sistema difuso estos términos se interpretan con un grado de pertenencia que permite matices, como "muy alta", "moderadamente alta" o "ligeramente alta", y respuestas acordes a esos grados.

3.3.5 Defusificación

En los sistemas de control difuso, las entradas se fusifican para trabajar con valores difusos a lo largo del procesamiento de estos datos de entrada. Esto permite utilizar reglas de inferencia para generar una salida difusa. Sin embargo, para realizar una acción concreta es necesario convertir la salida difusa en un valor preciso o cuantificable, lo que se logra mediante el proceso conocido como defusificación.

El procedimiento más comúnmente utilizado para este propósito es el método del centroide (Karnik & Mendel, 2001). Este método consiste en encontrar el punto en el eje horizontal (universo de discurso) que corresponde al centro de masa del área bajo la curva

de la función de membresía difusa. Matemáticamente, el centroide se calcula utilizando la ecuación (3.14):

$$C = \frac{\int_m^n x\mu(x)dx}{\int_m^n \mu(x)dx} \quad (3.14)$$

Donde:

C	Valor del centroide del conjunto difuso resultante.
m	Límite inferior del intervalo de integración.
n	Límite superior del intervalo de integración.
x	Conjunto difuso resultante.
$\mu(x)$	Función de pertenencia del conjunto difuso resultante

3.4 Control inteligente aplicado al ECM

El control inteligente es una rama avanzada de la ingeniería de control que se enfoca en el diseño de sistemas capaces de adaptarse, aprender y tomar decisiones de manera autónoma. Las técnicas en las que se basan los sistemas de control inteligente están inspiradas en el comportamiento humano y en procesos observados en la naturaleza, emulando el proceso de toma de decisiones de manera similar a como lo haría un ser humano (Galán, Jiménez, Sanz, & Matía, 2000).

En el contexto del ECM, la aplicación de control inteligente es especialmente relevante debido a su complejidad inherente. El ECM es un proceso de manufactura no convencional que requiere un control extremadamente preciso de múltiples variables, como la corriente eléctrica, la concentración del electrolito, y la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo. Estas variables interactúan de manera no lineal, y su manejo eficiente es clave para lograr los resultados deseados, como una alta precisión en la remoción de material y un acabado superficial adecuado (Neto, Silva, & Silva, 2006).

Dentro de la literatura hay trabajos que abordan el desarrollo describe el desarrollo teórico y el análisis mediante simulaciones, de un controlador MISO, que es un sistema de control difuso de varias entradas y una sola salida, capaz de mantener un flujo de electrolito constante. Este estudio compara el desempeño del controlador difuso con un controlador PID (proporcional integral derivativo) para evaluar su eficiencia, aplicado a la regulación del flujo del electrolito, mediante simulaciones (Nopalera Angeles, Granda Gutiérrez, García Mejía, Pérez Martínez, & Flores Fuentes, 2020),

Los resultados del estudio mencionado en el párrafo anterior concluyen que el controlador difuso sobresale en comparación con el PID. Específicamente, se observó que el regulador basado en lógica difusa reduce significativamente el sobre impulso de tensión eléctrica aplicada al sistema de bombeo de electrolito. Mientras que el PID reportó una magnitud promedio máxima de 12.5 V, el controlador difuso solo produjo 9 V. Además, el tiempo de estabilización del flujo del electrolito fue considerablemente menor con el controlador difuso, alcanzando la estabilidad en 4.5 s, en contraste con los 7.5 s necesarios para el PID convencional. Se resalta en el mismo documento de investigación, que como trabajo a futuro se pretende la implementación física en un sistema de mecanizado ECM, para verificar si los resultados simulados pueden ser trasladados a la realidad; esta idea se retoma en la presente tesis, como uno de los elementos a estudiar, tal como se ha mencionado en los objetivos de la investigación.

Por otro lado, hay investigaciones donde el ajuste del controlador difuso se hace mediante un algoritmo genético, por lo que se propone un enfoque basado en la optimización de los intervalos de los conjuntos difusos utilizando los resultados de una serie experimental (Segundo, 2023). El proceso comienza con la obtención del error MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) a partir de las perforaciones realizadas, lo que permite generar una población inicial para el algoritmo genético. Este algoritmo busca la mejor combinación de los límites en las tres variables seleccionadas: la pendiente de corriente, el voltaje de polarización, y el ajuste en la distancia entre electrodos (IEG). En la investigación mencionada se redujo el número de combinaciones experimentales mediante una selección metódica de variables, disminuyendo las posibles combinaciones de 64 a 27. Para validar el ajuste del controlador difuso, se llevaron a cabo perforaciones con profundidades de 290, 340 y 390 μm . El ajuste de los intervalos propuesto por el

algoritmo genético redujo el error MAPE en las perforaciones. Las posiciones clave de la herramienta durante el proceso de maquinado fueron controladas, permitiendo obtener parámetros fundamentales para el cálculo del área de exposición. Este enfoque permite optimizar la sintonización de un controlador difuso en procesos de maquinado electroquímico, mejorando la precisión y la eficiencia de las perforaciones mediante la aplicación de técnicas avanzadas de inteligencia artificial.

Los herramientas y algoritmos de aprendizaje automático también han sido estudiados. La incorporación de conocimiento parcial generado por algoritmos de *machine learning* en redes neuronales mejora la precisión de la predicción en los procesos de micro mecanizado electroquímico (Lu, Rajora, Zou, & Liang, 2017). Sin embargo, usualmente estas aplicaciones se han centrado en la modelización y control fuera de línea del proceso, más que en el control directo de parámetros durante el mecanizado.

3.5 Sistemas embebidos

Un sistema embebido es un sistema computacional diseñado para realizar funciones específicas como parte de un sistema más grande, en el cual interactúa con diversos dispositivos y componentes electrónicos. Estos sistemas están conformados por una combinación de hardware y software dedicados, donde el software generalmente es un firmware; es decir, un software que está integrado directamente en el hardware y que actúa como un intermediario entre hardware y software, desarrollado para optimizar el rendimiento y asegurar la estabilidad en aproximadamente tiempo real (Heath, 2003).

Los sistemas embebidos son utilizados en una amplia variedad de aplicaciones debido a su capacidad para manejar procesos en condiciones de bajo consumo de energía, alta fiabilidad y respuestas rápidas, lo que los hace esenciales en sectores industriales, médicos y de consumo (Kamal, 2008).

Los tipos de sistemas embebidos varían en función de su tamaño, complejidad y capacidad de procesamiento. Pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Sistemas embebidos de pequeña escala: Utilizan microcontroladores de baja capacidad que realizan tareas simples, como los controladores de electrodomésticos o sistemas de monitoreo básicos.

- Sistemas embebidos de mediana escala: Estos sistemas disponen de capacidad de procesamiento moderada, que requieren más almacenamiento y procesamiento de datos, tales como sistemas de control en vehículos y automatización industrial.

Las aplicaciones de los sistemas embebidos son muy diversas. En la literatura hay trabajos cuyo estudio se centra en desarrollar sistemas embebidos de tiempo real diseñados específicamente para aplicaciones biomédicas. Estos sistemas capturan señales fisiológicas y las procesan para controlar o interactuar con variables externas (por ejemplo, las Interfaces Cerebro-Computadora, o ICC). El cual tiene como resultado un sistema capaz de adquirir y transmitir señales EEG (*electroencefalogram*) de forma inalámbrica para aplicaciones de ICC. El sistema utiliza estímulos visuales para evocar potenciales cerebrales, los cuales se procesan para el control de dispositivos por parte del usuario. Este trabajo utiliza un FPGA (*field programmable gate array*) para el procesamiento complejo de señales (García, 2019).

Los sistemas embebidos en el contexto del proceso ECM han sido relativamente poco estudiados. Por lo general, los sistemas industriales prefieren el desarrollo de sistemas controlados por microprocesador para un control preciso en configuraciones de micro mecanizado, tanto por su robustez como por su modularidad (Bhattacharyya, Doloi, & Sridhar, Electrochemical micro-machining: new possibilities for micro-manufacturing, 2001). También se ha documentado el diseño de sistemas completos para controlar y monitorear procesos ECM, incluidas modificaciones de la cinética de los electrodos de la herramienta y ajustes de parámetros en tiempo real para mejorar la eficiencia y precisión del mecanizado (Pączkowski & Zdrojewski, 2017).

El maquinado electroquímico, al estar compuesto por subsistemas que interactúan de manera específica entre sí, requiere de un sistema diseñado específicamente para garantizar que los procesos se lleven a cabo de forma secuencial y ordenada. En este escenario, el uso de sistemas embebidos mejora la calidad del producto final, así como la eficiencia del proceso, reduciendo el tiempo de inactividad y el desperdicio de material. Sin embargo, una de las áreas en las que estos sistemas pueden mejorar es en la integración con técnicas de inteligencia artificial aplicadas al control del sistema para obtener un mejor control del proceso donde se utiliza el sistema embebido

3.6 Conclusiones del análisis del estado del arte

En la revisión de la literatura sobre el maquinado electroquímico y el control avanzado de sus parámetros críticos, se han identificado varias áreas de oportunidad que guían el desarrollo de esta propuesta. La integración de subsistemas, tales como el control de la distancia inter-electrodos y el flujo de electrolito, es esencial para asegurar tanto la precisión como la estabilidad del proceso. Tradicionalmente, estos subsistemas han sido controlados por sistemas centralizados, lo que presenta limitaciones en términos de la capacidad de respuesta y la gestión eficiente de recursos computacionales, especialmente cuando las variables interactúan de manera no lineal.

Los estudios revisados demuestran que los sistemas basados en controladores PID no logran manejar adecuadamente la complejidad de los procesos ECM, particularmente cuando se requieren ajustes finos en tiempo real. Por su parte, la lógica difusa ha emergido como una técnica capaz de gestionar la incertidumbre y las imprecisiones inherentes en estos sistemas, ofreciendo un control más preciso y adaptable. Sin embargo, la implementación de un único controlador para gestionar múltiples variables puede saturar el procesamiento, reduciendo la eficiencia del sistema en entornos donde el tiempo de respuesta es crítico.

Ante esta situación, se propone un enfoque basado en la implementación de dos controladores difusos independientes, uno dedicado al control del gap entre el electrodo y la pieza de trabajo, y otro al control del flujo del electrolito, corriendo de manera separada en los dos núcleos del microcontrolador ESP32. Esta arquitectura permite una división eficiente de las tareas, aprovechando las capacidades de procesamiento paralelo del ESP32 para reducir la latencia y mejorar el rendimiento global del sistema.

La elección de esta arquitectura de control responde a la necesidad de manejar de manera simultánea y efectiva variables que influyen en la calidad del maquinado electroquímico. en sistemas embebidos. Además, la separación de los controladores en dos núcleos asegura que cada uno se ejecute con los recursos adecuados, reduciendo la posibilidad de interferencias o sobrecarga en el procesamiento.

4 MÉTODO

En esta sección se describe el proceso de diseño, desarrollo e implementación de un sistema de control difuso aplicado al maquinado electroquímico, cuya finalidad es ajustar, tanto la distancia inter-electrodos (*gap*) como el flujo del electrolito. A través de la integración de múltiples subsistemas, se desarrolla un prototipo que permite validar los algoritmos de control.

El prototipo cuenta con los subsistemas: recirculación del electrolito, desplazamiento mecánico y subsistema de monitoreo de corriente y voltaje, todos ellos controlados por un microcontrolador ESP32, el cual permite gestionar las entradas y salidas necesarias para el control del proceso. El uso de lógica difusa es el elemento central, ya que proporciona un mecanismo robusto para manejar la incertidumbre.

En lo concerniente a la validación del funcionamiento del prototipo y de los algoritmos de control, se considera la caracterización del sistema, que incluye la implementación de sensores, actuadores y dispositivos de medición, tales como caudalímetros, fuentes de voltaje, amplificadores y un sistema de medición de corriente, los cuales se utilizan para monitorear las variables de interés y validar la eficacia de los algoritmos de control.

4.1 Requerimientos

En este apartado se describen de manera general los requerimientos en cuanto a instrumentos, equipos y componentes, para el desarrollo de un prototipo en el cual se validan los algoritmos de control, considerando las partes que integran el equipo de maquinado, que fueron descritas en el apartado correspondiente del estado del arte. La adecuada selección de cada elemento es determinante para el logro de los objetivos de la investigación.

Instrumentos:

Para el desarrollo del prototipo de maquinado electroquímico, se emplearon diversos instrumentos de laboratorio necesarios para el funcionamiento, medición y caracterización del proceso, y de los resultados experimentales en condiciones reales.

En el prototipo se emplean tres fuentes de voltaje, dos GW Instek GPE-2323 y una BK Precision 1760A, que proporcionan las condiciones eléctricas necesarias para alimentar a los componentes del prototipo. También se utiliza un generador de funciones Tektronix AFG1022, que permite modular la forma de las señales eléctricas aplicadas a los electrodos, y generar una señal de voltaje pulsado. Un amplificador de aislamiento Keysight 33502A, se utiliza para proteger los demás componentes del circuito de posibles interferencias eléctricas, y proporcionar la energía necesaria para polarizar los electrodos de la celda electroquímica.

Previo a la realización de pruebas de maquinado, se debe preparar el electrolito a la concentración adecuada. Para ello se utiliza una báscula granataria para medir con precisión la cantidad exacta de Cloruro de Sodio necesaria para la preparación del electrolito. Una vez preparada la solución, se determina la conductividad eléctrica utilizando un medidor multiparamétrico HANNA modelo HI5521-02.

Para la observación y medición de las señales durante el maquinado, se cuenta con un osciloscopio Keysight DSOX1102G. Además, un micrómetro de carátula se utiliza para caracterizar el desplazamiento de la herramienta de trabajo con el objetivo de determinar la resolución real de este subsistema, y de este modo verificar la precisión del movimiento del subsistema mecánico.

Una vez que se realizaron experimentos de maquinado en condiciones reales, fue necesario un microscopio USB digital FMP-01, el cual se utiliza para inspeccionar las superficies maquinadas. Este instrumento cuenta con un sistema de medición, que se utiliza para caracterizar los barrenos maquinados y cuantificar el sobre corte. Para la medición de la profundidad de los orificios, se emplea un medidor de alturas con resolución micrométrica Insize 1150-500.

Subsistema de monitoreo:

El sistema de monitoreo, cuyos detalles de diseño y construcción se encuentran en la sección 4.4; consta de dos circuitos de acondicionamiento y amplificación de señales, basados en amplificadores operacionales, así como convertidores ADC monolíticos, que envían los valores de voltaje de polarización y corriente de maquinado al microcontrolador principal mediante un protocolo serie. Este subsistema es fundamental para que los

algoritmos de control determinen la distancia inter-electrodos a de manera indirecta partir de las variables eléctricas, puesto que en este prototipo no se mide directamente esta variable.

Subsistema de recirculación de electrolito:

Para la preparación del electrolito se utiliza una solución de cloruro de sodio (NaCl), en una concentración 3.2 mol, diluida en un litro de agua destilada. Se implementaron dos bombas de agua de 12 V, modelo PUMP-R385; una para hacer circular el electrolito desde el contenedor y la otra para extraer el electrolito de la celda electrolítica hacia el filtro. También se incorpora un caudalímetro modelo FM-PS2130, capaz de medir flujos que varían entre 40 y 100 mililitros por segundo, rango en el que se caracterizó el flujo del sistema (ver sección 5.4). Este sensor necesita un circuito para su funcionamiento y adaptación al ESP32, se requiere un circuito de acoplamiento TTL a CMOS. Los detalles del diseño e implementación de este circuito de acoplamiento y el acondicionamiento de la señal de sensor se explican más adelante en la sección 4.5.2.

El flujo del electrolito es regulado mediante un algoritmo de lógica difusa, diseñado para ajustar continuamente las condiciones de operación según las necesidades del proceso, cuyos detalles de implementación se explican más adelante (ver sección 4.6). Para controlar eficazmente este flujo, es necesario el uso de un controlador LM298N para ajustar la velocidad de la bomba de agua a través de una señal PWM (modulación por ancho de pulso, *pulse width modulation*) generada por el microcontrolador, que es el medio con el cual se ajustará el caudal del electrolito por el sistema de control. Así también, se requiere de un recipiente adecuado para contener la pieza de trabajo y el electrolito circulante.

Subsistema de desplazamiento mecánico:

El prototipo ECM está diseñado para operar en un solo eje (denominado como eje Z). Para ello, se emplea una guía lineal Velmex (XSlide XN10 Series), complementada con un motor NEMA 17 que controla el movimiento de un tornillo sin fin. Este tornillo sin fin mueve un accesorio de la guía lineal, posicionado horizontalmente, que sostiene la herramienta de trabajo. El funcionamiento del motor paso a paso requiere un controlador; en este caso, se utiliza el modelo TB6560, que se encarga de configurar los pasos del

motor y de suministrar la energía necesaria al motor NEMA 17, así como determinar el tamaño o resolución de movimiento (paso completo, medio paso, 1/4 de paso, 1/8 de paso y 1/16 de paso). Este subsistema sirve de soporte, por lo que en él se coloca la herramienta de trabajo, la cual incluye una jeringa de calibre 21g x 32mm y otra de insulina de calibre 29g x13 mm, modificada para funcionar como una boquilla. Esta boquilla redirecciona el aire expulsado por una bomba de aire eléctrica, con el objetivo de dispersar el electrolito acumulado alrededor de los barrenos, y facilitar el desplazamiento de los residuos del maquinado.

Dispositivo de control:

El microcontrolador seleccionado para el sistema embebido es el ESP32, debido a sus convertidores ADC integrados y su arquitectura de doble núcleo que facilitan la gestión de múltiples tareas simultáneamente. Adicionalmente, se empleó una base (*shield*) para facilitar la conexión de las terminales de la placa principal. Dentro de las características de la tarjeta ESP32 se encuentran: Dos procesadores Tensilica Xtensa LX6 que pueden funcionar a una velocidad de hasta 240 MHz, dos canales de 12 bits para la conversión de señales analógicas a digitales (ADC), 520 KB de SRAM para uso de datos y programas, además de contar con 4 MB de memoria Flash externa. Soporta múltiples protocolos de comunicación, incluyendo Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE también protocolos I2C, SPI, UART y CAN. Dispone de hasta 34 pines GPIO configurables que permiten el manejo de señales digitales y analógicas y una velocidad de reloj de hasta 240 MHz,

Este dispositivo recibe las señales de entrada del resto de los subsistemas, y los transforma en las señales adecuadas para producir el movimiento de los actuadores: motores a pasos del subsistema de desplazamiento (para el ajuste de la distancia inter-electrodos) y bombas eléctricas del subsistema de recirculación del electrolito (para el ajuste del caudal).

Consumibles:

Los consumibles utilizados incluyen Cloruro de Sodio (NaCl) y agua destilada, los cuales se utilizan para preparar el electrolito. Se emplea agua destilada y agua desionizada para limpiar los electrodos del instrumento de medición de conductividad. Como pieza de

trabajo, se utiliza una placa de acero AISI-1018. La superficie de la pieza de trabajo debe rectificarse y, posteriormente, pulirse con lija fina de agua G-400 para eliminar rayaduras que generen desniveles. Como herramienta de trabajo, se utiliza una jeringa desechable de 5 ml con aguja de calibre 21g \times 32 mm; se recorta su punta y se lija para evitar aplastamientos en la punta, con la finalidad moldear el electrodo con una forma cilíndrica.

4.2 Arquitectura del prototipo

En la Figura 4.1 se presenta un diagrama a bloques del prototipo que se implementa para el desarrollo de la presente investigación, y se describe su funcionamiento general en los siguientes párrafos, con el propósito de comprender el proceso de diseño y pruebas experimentales realizadas a cada uno de los subsistemas que lo componen.

Para producir la celda electrolítica, que promueve la remoción del material de la pieza de trabajo, es necesario polarizar estos elementos, donde el cátodo es la herramienta, en tanto que la pieza de trabajo es el ánodo. Esto se logra mediante un generador de funciones configurado para producir una señal cuadrada de 1 kHz, con una amplitud de 1 V equivalente a 700 mV RMS y un ciclo de trabajo del 50%. Esta señal es la base del tren de pulsos de polarización, por lo que el generador se conecta a un amplificador de aislamiento (Keysight 33502A,), que multiplica la señal del generador por un factor fijo de 5, obteniendo así un valor RMS de 3.5 V, que luego se conecta a la pieza de trabajo. El amplificador también tiene la función de evita que compartan la misma referencia de tierra y, por tanto, previene la aparición de corrientes indeseadas o diferencias de potencial entre distintos subsistemas. De esta manera, se protege la señal y se incrementa la seguridad eléctrica en la aplicación.

La herramienta de trabajo está polarizada negativamente y es conectada a tierra a través de una resistencia de 1 Ω en serie (por lo que se conoce como resistencia de muestreo), la cual se utiliza para medir la corriente de maquinado. La señal elegida para polarizar los electrodos es de forma cuadrada, ya que proporciona un voltaje constante y uniforme durante los ciclos activos (tiempo de encendido del pulso de trabajo).

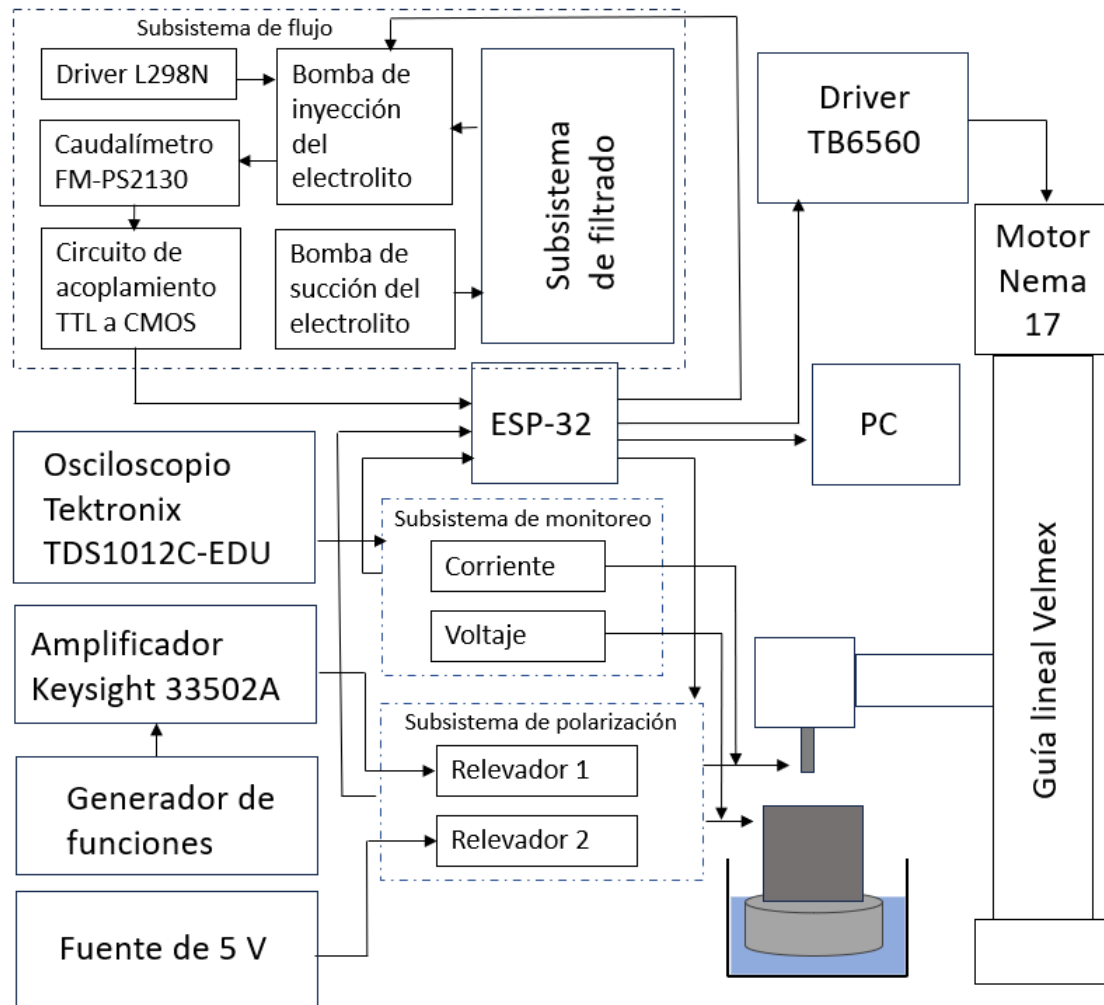


Figura 4.1. Diagrama a bloques del prototipo

Tanto el voltaje de polarización como la corriente de maquinado se miden mediante un circuito basado en amplificadores operacionales, que tiene como propósito el acondicionamiento de las señales, para su ingreso a los canales de conversión analógico a digital de la tarjeta de desarrollo ESP32. Estas variables son procesadas por el algoritmo de control difuso que determina la secuencia de pulsos adecuada para el movimiento del motor a pasos del eje Z, mediante el controlador TB6560. Este dispositivo permite el movimiento del eje de manera precisa debido a la configuración de pulsos, en fracciones de pasos. El eje Z determinará la distancia inter-electrodos, al mover la herramienta de trabajo, que está acoplada a dicho eje.

El electrolito fluye a través de la herramienta de trabajo, y se desplaza en el espacio inter-electrodos mediante una bomba eléctrica, con alimentación a 12 V CD. El flujo es medido y convertido en una señal pulsada que es interpretada por el ESP32 para cuantificar el valor de esta variable. Con base en esto, un algoritmo de control difuso modifica el ciclo de trabajo de la señal modulada por ancho de pulso, que se transmite al controlador de la bomba, modificando su velocidad y, por lo tanto, regulando el caudal de fluido electrolítico. El fluido se traslada a un filtro en el que se retienen los subproductos del maquinado, para la reutilización de la solución y el desecho de los residuos.

El sistema requiere de diversas fuentes de polarización, para el funcionamiento de los motores a pasos, de la bomba que hace circular el electrolito, así como de los diferentes circuitos de medición. La computadora reducida ESP32 se alimenta directamente del puerto USB (*universal serial bus*) de una computadora, y por este mismo puerto se transmiten. monitorean y recopilan los datos durante el proceso de maquinado.

Finalmente, se emplea un osciloscopio para supervisar las condiciones de polarización (voltaje y corriente), con el propósito de corroborar que el proceso de monitoreo y censado de estas variables coincida con los valores visualizados en la pantalla del osciloscopio. Dichas variables son fundamentales para estimar el gap y asegurar que el maquinado se lleve a cabo de manera adecuada.

4.3 Diseño del subsistema de desplazamiento

En este prototipo se contempla el movimiento de un solo eje (eje Z), el cual posiciona la herramienta de trabajo hacia arriba o hacia abajo, mientras que la pieza de trabajo permanece inmóvil. En la Figura 4.2 se observa una representación gráfica del sistema de desplazamiento. El prototipo incorpora una guía lineal de la marca Velmex el cual tiene un recorrido de 25 cm, una base para un motor NEMA 17 y soporta una carga máxima de 19.5 kilogramos, con una precisión de 0.003” (aproximadamente 76.2 μm) en línea recta, considerando la totalidad de su recorrido (Velmex Inc, 2016).

La guía lineal posiciona la herramienta mediante un tornillo sin fin que es accionado por un motor a pasos NEMA 17; este dispositivo electromagnético rotatorio convierte las señales digitales de pulsos en un movimiento rotativo de 2 fases. El motor

presenta características como una tensión nominal de 3.6 V, una corriente nominal de 2.0 A y un torque de retención de 0.02 Nm. Su movimiento angular es de 1.8 grados por paso, con una tolerancia del $\pm 5\%$ (Joy- it, 2024).

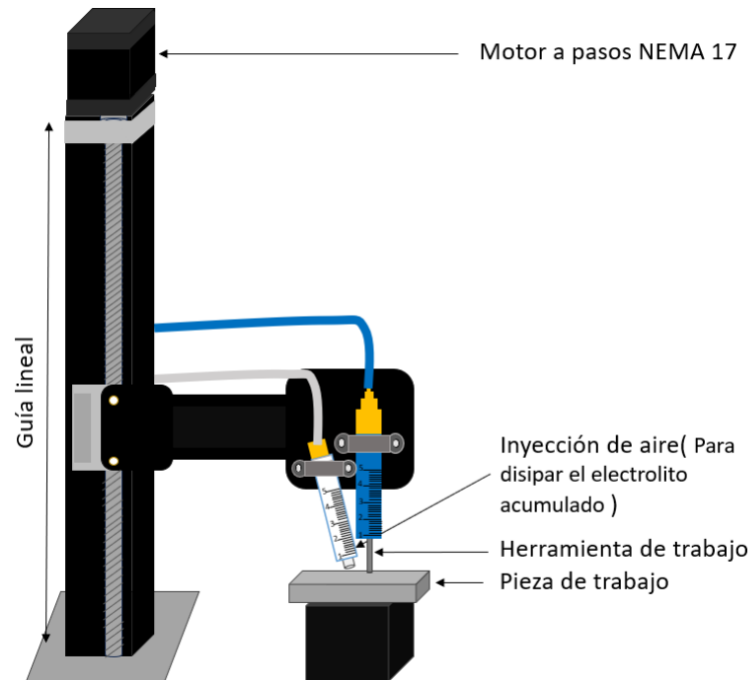


Figura 4.2 Representación del eje vertical (Z) que desplaza la herramienta de trabajo.

Para que el motor NEMA 17 funcione adecuadamente es necesario un controlador que genere y gestione los pulsos; en este contexto, se hace uso del controlador TB6560 por su flexibilidad al ajustar parámetros importantes como la resolución por paso o por fracciones de paso, y la corriente, adaptándose así a las especificaciones requeridas por el motor. En la implementación del prototipo que se presenta en esta investigación, se conectó el controlador a una fuente de alimentación de 12 V y se configuró la corriente máxima a 2 A. En cuanto a la resolución, se determinó a través de una caracterización de movimiento que una configuración de 1/8 de paso resultaba óptima. Esta configuración ofrece la mayor reducción en micro pasos, minimizando la histéresis y proporcionando un desplazamiento preciso. El diagrama esquemático de la Figura 4.3 presenta la conexión eléctrica del controlador TB6560, el motor a pasos NEMA 17 que se acopla a la guía lineal y la conexión con la placa ESP32 que controla el movimiento del eje Z. Para el detalle de

los resultados del proceso de caracterización, y los resultados del movimiento en fracciones de paso (ver la sección 5.2).

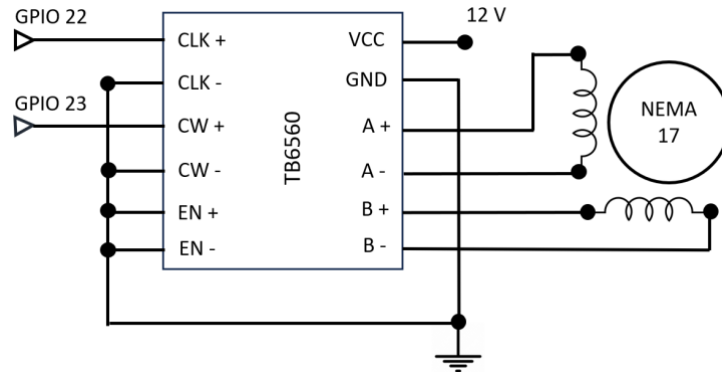


Figura 4.3. Diagrama esquemático del circuito que controla el movimiento del eje Z.

4.4 Diseño del subsistema de monitoreo de corriente y voltaje

En el proceso de ECM es necesario monitorear tanto la corriente de maquinado como el voltaje de polarización. Estas variables proporcionan información sobre el progreso de la eliminación de material (Groover, 2007).

El voltaje de polarización determina la velocidad a la que ocurre la erosión electroquímica en la pieza de trabajo. Ajustar este voltaje permite controlar la tasa de eliminación de material. Si el voltaje es demasiado alto, la erosión puede ser demasiado rápida y afectar la precisión. Por otro lado, la corriente se utiliza para estimar la distancia entre los electrodos, puesto que se ha comprobado que los cambios en la corriente están relacionados con la *IEG* (Segundo, 2023). Cuando los electrodos están cerca, la corriente tiende a aumentar, mientras que cuando están más alejados, la corriente tiende a disminuir. Este comportamiento proporciona información sobre la separación inter-electrodos y permite, mediante un algoritmo difuso, realizar el ajuste de la distancia inter-electrodos.

En consecuencia, se implementó un circuito capaz de medir dichas variables. El diagrama esquemático del circuito que realiza el acondicionamiento, amplificación y conversión a un valor RMS en un nivel adecuado para su procesamiento en los canales ADC de la placa ESP32, se muestra en la Figura 4.4 y a continuación se describe su funcionamiento y proceso de diseño.

4.4.1 Monitoreo de voltaje

El circuito diseñado (ver Figura 4.4) tiene como propósito medir el voltaje aplicado a una celda electrolítica, atenuar la señal a niveles seguros para el microcontrolador ESP32, y asegurar que la medición sea precisa y filtrada. A continuación, se detalla el funcionamiento de cada amplificador operacional involucrado y cómo la señal es procesada antes de llegar al ESP32.

La primera etapa del circuito consiste en un amplificador operacional TL082 (U1:A) configurado como un seguidor de voltaje. Este seguidor tiene la función de proporcionar aislamiento entre la celda electrolítica (la fuente de la señal de voltaje proporcionada por el amplificador de aislamiento Keysight modelo 33502A) y las etapas posteriores del circuito. El seguidor de voltaje replica el voltaje presente en la celda en su salida sin modificar su amplitud (ganancia unitaria). La principal ventaja de esta configuración es que evita que las cargas de las etapas siguientes afecten el comportamiento de la celda, asegurando una medición precisa. En este punto, la señal de voltaje se traslada sin alteraciones significativas hacia la siguiente etapa del circuito.

La señal proveniente del seguidor de voltaje se envía al segundo amplificador operacional (U1:B), el cual está configurado como un amplificador inversor con atenuación (ganancia inferior a la unidad). La configuración inversora permite que la señal de entrada se invierta, pero lo más importante es que la ganancia de esta etapa, debido a las características de esta configuración permite que la señal sea atenuada antes de continuar a las siguientes etapas.

La atenuación de la señal está determinada por las resistencias RV1 (10 k Ω) resistencia variable que permite ajustar la atenuación y R1 (12 k Ω). La atenuación de esta etapa inversora se calcula con la ecuación (4.1).

$$G1 = -\left(\frac{RV1}{R1}\right) \quad (4.1)$$

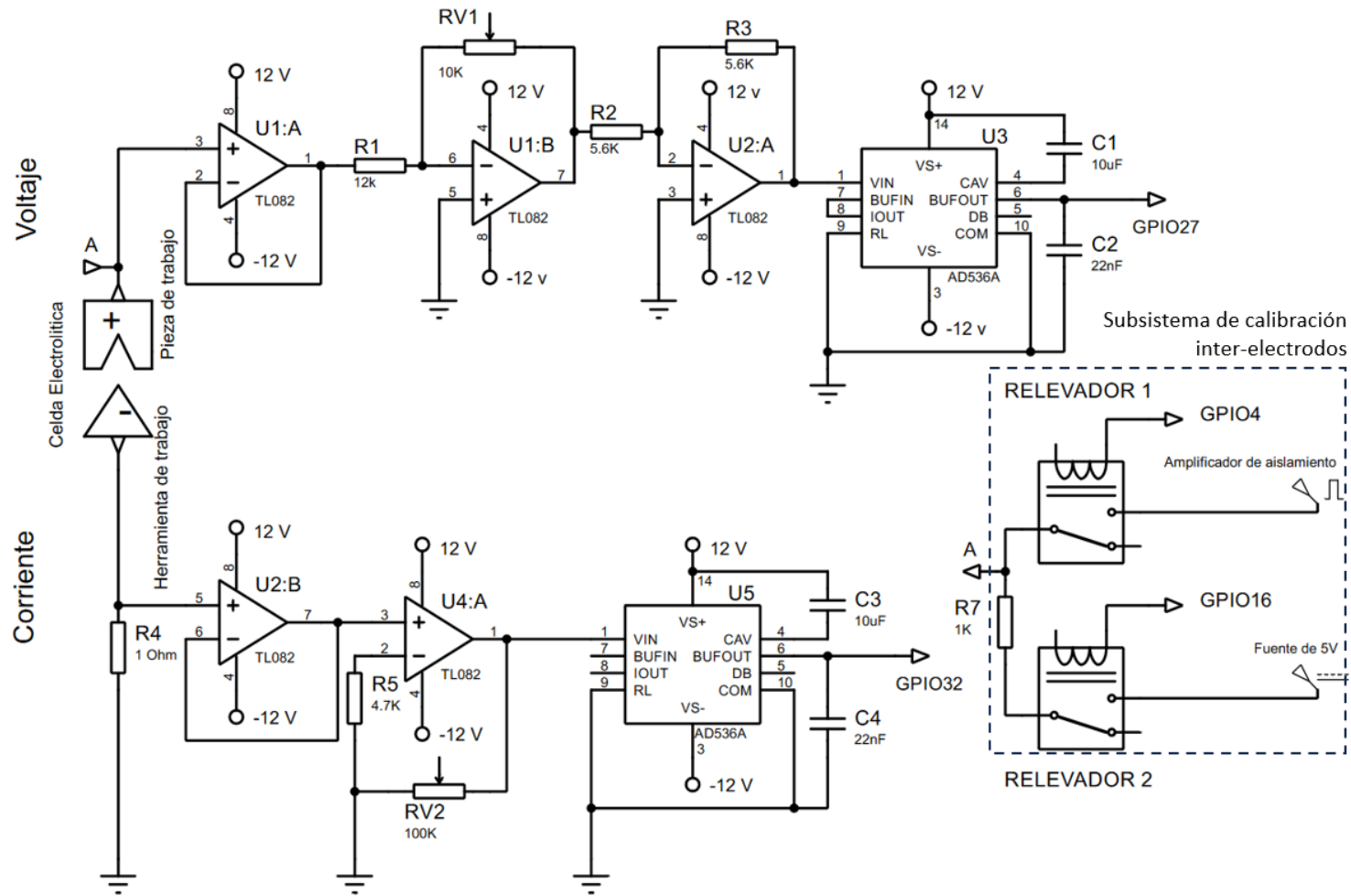


Figura 4.4. Diagrama esquemático del circuito de monitoreo y acondicionamiento de las señales de voltaje de polarización y corriente de maquinado.

Dado que esta ganancia es menor a 1, el objetivo de esta etapa es reducir la amplitud del voltaje de la celda a un nivel seguro para el ESP32. Esto es crucial para proteger el microcontrolador de posibles daños y asegurar que el voltaje medido esté dentro del rango adecuado para su posterior procesamiento. Precisamente, el motivo de requerir una señal atenuada es que los canales ADC del ESP32 admiten un máximo de 3.3 V como entrada analógica (Espressif Systems, 2024). El valor final de G_1 es 0.25.

La tercera etapa del circuito utiliza el amplificador operacional U2:A (TL082), también configurado como un amplificador inversor. Las resistencias R2 y R3, ambas de 5.6 k Ω , y la configuración del amplificador, permiten tener una ganancia unitaria, pero de polaridad inversa. Debido a que la segunda etapa invierte la señal, es decir, que se tiene un valor de voltaje con polaridad negativa a la salida de esta etapa, se requiere de esta tercera etapa para invertir nuevamente la polaridad, y que el voltaje de entrada al ESP32 sea positivo, con respecto a la referencia de tierra.

Una vez que la señal ha sido atenuada por las tres etapas de amplificación, y con la polaridad correcta, pasa a través del convertidor AD536A (U3). Este es un componente especializado que convierte la señal de voltaje en su valor eficaz verdadero (RMS). Este valor es esencial para obtener una medición precisa del voltaje, especialmente cuando se trata de señales con una forma de onda periódica (como es el caso del tren de pulsos de polarización de la celda electrolítica). Para garantizar que la señal que llega al ESP32 esté libre de ruido, se incluyen los condensadores C1 (10 μ F) y C2 (22nF) que actúan como filtros. Estos eliminan (o reducen) el ruido de alta frecuencia y estabilizan la señal antes de enviarla al ESP32, asegurando una medición más limpia y precisa.

Finalmente, la señal filtrada y atenuada llega al pin GPIO 27 del ESP32, el cual está configurado como una entrada ADC (convertidor analógico a digital). Dado que la señal ha sido atenuada intencionadamente en las etapas anteriores, el voltaje medido por el ESP32 será más bajo que el voltaje real aplicado a la celda electrolítica. Para obtener el valor real del voltaje en la celda, el programa dentro del ESP32 realiza una multiplicación de la lectura ADC por la ganancia total de atenuación del circuito. Este ajuste asegura que el valor obtenido sea una representación fiel del voltaje original, compensando la atenuación aplicada por las etapas de acondicionamiento de señal.

4.4.2 Monitoreo de corriente

Para el circuito que mide la corriente se utiliza un amplificador operacional TL082 que se muestra como U2:B en la Figura 4.4, y está configurado como seguidor de voltaje. Para medir la corriente como una diferencia de potencial (puesto que el ADC del ESP32 solo admite señal de voltaje), la celda electrolítica tiene conectada en serie una resistencia de muestreo de 1Ω (R4); así, la corriente que circula por la celda electrolítica es proporcional al voltaje medido por el seguidor de voltaje.

Después la salida de este amplificador pasa a otro, el U4:A, configurado como un amplificador no inversor. Este toma la señal de voltaje que proviene del seguidor de voltaje (U2:B) y la amplifica según la relación de resistencias. Esto es necesario porque el voltaje generado por la corriente que pasa por la resistencia de R4 puede ser muy pequeño, y se requiere amplificarlo para tener una señal más grande. La resistencia variable RV2 y la resistencia fija R5 permiten ajustar la ganancia del amplificador operacional, que se puede calcular con la siguiente expresión (4.2):

$$G2 = 1 + \frac{RV2}{R5} \quad (4.2)$$

La finalidad del ajuste de la ganancia G2, cuyo valor es 16.05, es permitir que el sistema sea flexible y pueda medir diferentes rangos de corriente. Dado que la corriente está directamente relacionada con el voltaje medido en la resistencia R4, el ajustar la ganancia del amplificador permite calibrar la salida en función de las necesidades del sistema, ya sea para pequeñas corrientes o para corrientes más altas.

Por último, la salida de este amplificador operacional pasa por un convertidor de CD a RMS, el componente AD536A, que convierte el voltaje de señal en una lectura de valor eficaz verdadero (RMS). La salida de este componente se conecta a un pin GPIO del ESP32, que funciona como un pin ADC (convertidor analógico-digital) capaz de leer el voltaje amplificado pero proporcional a la corriente de la celda. En el programa, el valor medido se divide por la ganancia del circuito para obtener el valor real de la corriente de maquinado.

4.4.3 Calibración de distancia inter-electrodos inicial

Al iniciar el proceso de maquinado, es necesario posicionar la herramienta a una distancia de 240 μm respecto a la superficie de la pieza de trabajo. Esta separación ha sido comprobada como adecuada en trabajos anteriores, ya que permite mantener una tasa constante de remoción de material y minimiza el sobre corte, optimizando así la precisión y eficiencia del proceso (Segundo, 2023).

Para establecer esta separación, se parte de una posición desconocida, relativamente cercana a la superficie de la pieza de trabajo, y se hace descender la herramienta de manera automática mediante una rutina programada en el ESP32 (ver Figura 4.5) hasta que haga contacto con la pieza de trabajo. Como se observa en la Figura 4.4, donde se representa el esquemático de las conexiones del circuito hacia los pines GPIO del ESP 32, se polariza la herramienta con una fuente de 5V y una resistencia en serie de 1 $\text{k}\Omega$, al tiempo que se monitorea constantemente la corriente. Un aumento repentino en la corriente indica que la herramienta ha tocado la pieza, entonces, se requiere ajustar la altura en pasos precisos hasta alcanzar los 240 μm de separación, que se considera la distancia inter-electrodos inicial.

Para proteger tanto el generador de funciones como el amplificador de aislamiento que polariza los electrodos, se implementa un circuito con relevadores que se activan secuencialmente durante las etapas del maquinado (ver Figura 4.4). Durante la calibración inicial del gap, se activa un relevador que permite el paso del voltaje de 5 V, el cual se retira al finalizar el proceso de calibración, desconectando el relevador correspondiente. Luego, otro relevador permite el flujo del voltaje del amplificador de aislamiento únicamente cuando el microcontrolador determina que existen las condiciones para iniciar el maquinado.

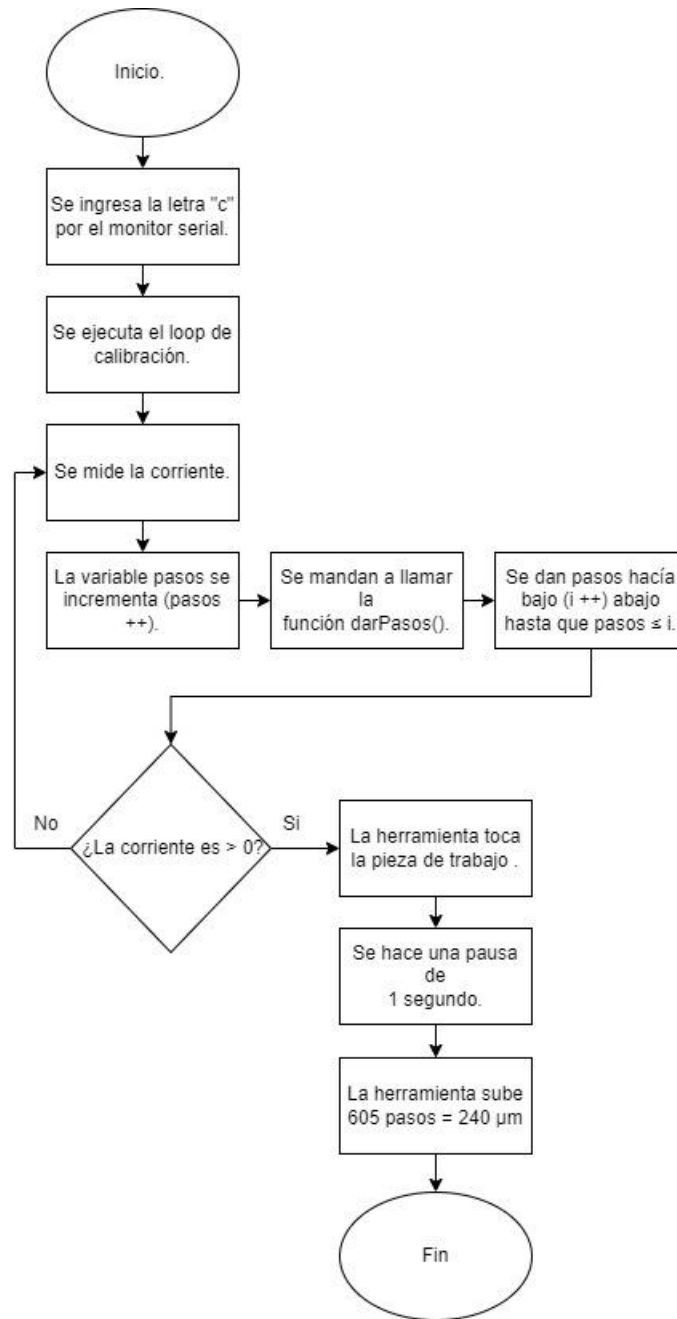


Figura 4.5. Diagrama de flujo de la secuencia para establecer la separación inicial de los electrodos en 240 μm .

4.5 Diseño del subsistema de recirculación del electrolito

Para la preparación del electrolito utilizado en el proceso de maquinado electroquímico, se utilizan 3.2 moles de cloruro de sodio (NaCl), lo que equivale a 187.2 gramos. El pesaje se realizó utilizando una balanza de precisión para garantizar la

exactitud requerida en la cantidad de soluto. Para convertir de moles a gramos se utiliza la expresión (4.3).

$$\text{Masa (g)} = \text{moles} * \text{peso molecular (g/mol)} \quad (4.3)$$

Donde:

peso molecular El peso molecular del NaCl es de 58.44g/mol.

Paralelamente, se mide un litro de agua destilada con un vaso de precipitados graduado, previamente lavado con agua destilado, asegurando que no contenga impurezas que pudieran alterar las propiedades del electrolito. El NaCl previamente pesado se agrega al agua destilada, y la mezcla se agita cuidadosamente hasta obtener una solución completamente homogénea.

Una vez preparada la solución, la conductividad de esta se midió utilizando un conductímetro HANNA modelo HI5521-02, obteniendo un valor de 217.1 mS/cm, que corresponde a una resistividad de 4.7 $\Omega \cdot \text{cm}$; dicho valor se calcula con la formula (4.4).

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (4.4)$$

Donde:

ρ Es la resistividad en ohmios-centímetro ($\Omega \cdot \text{cm}$).

σ Es la conductividad en siemens por centímetro (S/cm)

4.5.1 Bombeo y filtrado del electrolito

Para iniciar el proceso de remoción, es necesario crear una celda electrolítica al polarizar los electrodos (pieza y herramienta de trabajo). Estos electrodos, separados por 240 μm , mantienen la celda abierta, lo que impide la remoción hasta que se cierre el

circuito eléctrico. Por ello, se requiere el flujo del electrolito, que es donde se llevan a cabo las reacciones químicas necesarias para producir la remoción del material.

El movimiento del electrolito se impulsa mediante una bomba de agua de 12 V. Al mismo tiempo, otra bomba de características similares devuelve el agua con partículas disueltas, subproducto de la remoción del material, a un filtro de doble fase. Este filtro se encarga de eliminar la mayoría de las partículas disueltas antes de devolver el electrolito al depósito. En la Figura 4.6 se muestra una representación de este proceso, donde se ilustra también la disposición de los componentes necesarios para el subsistema de recirculación y filtrado de electrolito.

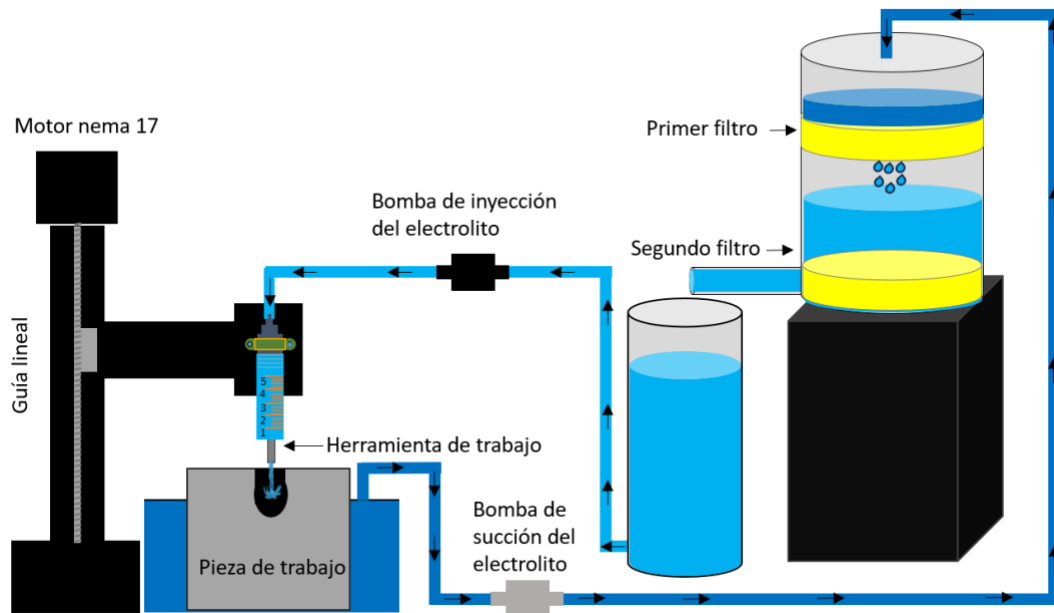


Figura 4.6. Representación gráfica del sistema de recirculación del electrolito

El flujo del electrolito se regula mediante la variación del voltaje aplicado a la bomba de agua usada para la inyección del electrolito, para lo cual se empleó un controlador L298N. Este dispositivo es un controlador de motor dual ampliamente utilizado en el control de motores de corriente continua y motores paso a paso, basado en un puente H (Hadson Technology, 2008).

Utilizando una señal PWM, se controla el voltaje del motor, lo que posibilita ajustar su velocidad. Cuanto mayor sea el ciclo de trabajo (es decir, el tiempo durante el cual la señal se mantiene en estado alto), mayor será la velocidad del motor. En la Figura

4.7 se puede observar la conexión del motor de la bomba de agua y el controlador L298N. Cabe mencionar que el voltaje de polarización del controlador es de 14 V, debido a que la caída de tensión provocada por el funcionamiento de este es de aproximadamente 2 V, de tal manera que el voltaje de polarización de la bomba es de 12 V con un ciclo de trabajo de 100 %. La bomba de agua de succión, para recuperar el electrolito del contenedor y llevarlo al filtro, se activa manualmente.

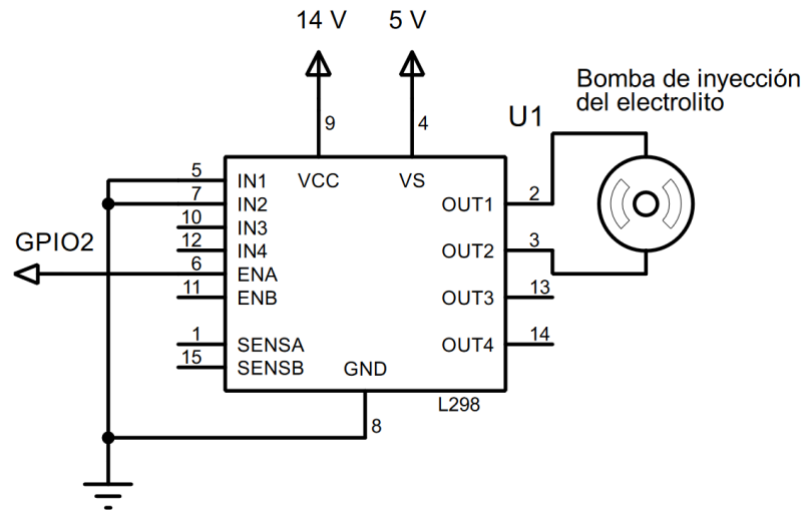


Figura 4.7. Conexión del controlador L298N con la bomba de inyección del electrolito.

4.5.2 Medición y caracterización del flujo del electrolito

Con el propósito de caracterizar y cuantificar el flujo suministrado, se integra al sistema un caudalímetro basado en un sensor de efecto Hall (FM-PS2130). Para obtener mediciones precisas, es necesario el cálculo de un factor de conversión, el cual transforma la frecuencia de pulsos registrada en un caudal. Lo anterior puesto que el sensor no proporciona una curva de calibración, y contiene información limitada acerca de su precisión y linealidad. La variable que se puede medir con precisión es la cantidad de pulsos mediante Arduino, mientras que el volumen de agua puede ser medido utilizando recipientes graduados. Estas dos variables son esenciales para el cálculo del factor de conversión, el cual se lleva a cabo empleando la ecuación (4.5).

$$K = \frac{n^{\circ}Pulsos}{volumen * 60} \quad (4.5)$$

Donde K simboliza el factor de conversión, mientras que $n^{\circ}Pulsos$ indica la cantidad de impulsos registrados por el sensor de flujo en proporción al volumen que ha transitado a través de él. La constante de 60 se utiliza para que el factor pueda ser utilizado directamente al proporcionar la medición del caudal en unidades de flujo por minuto.

Es importante determinar inicialmente el valor de K , ya que este parámetro es necesario para el cálculo del caudal (Q , en ml/min), a partir de la frecuencia de pulsos (representa la cantidad de pulsos registrados por segundo), utilizando la ecuación (4.6).

$$Q = \frac{\text{frecuencia}}{K} \quad (4.6)$$

Una vez calibrado el sensor de flujo (ver sección 5.4), surge la necesidad de implementar un circuito que pueda obtener y enviar los pulsos detectados al microcontrolador. Sin embargo, se observa que la amplitud de los pulsos generados por el sensor es de 5 V, mientras que el microcontrolador utilizado solo puede leer hasta un máximo de 3.3 V en sus entradas digitales. Si se superara este voltaje, el ESP32 se satura, pudiendo resultar en mediciones incorrectas o en daño a la terminal de entrada digital. Por ese motivo, se incorpora al circuito una etapa de adaptación de nivel TTL a CMOS, diseñada para reducir la amplitud del voltaje de 5 V a 3.3 V, que se observa en la Figura 4.8. Aunado a esto, se introduce una compuerta NOT (matrícula 74LS04) entre el sensor y el adaptador TTL a CMOS para corregir la polaridad de los pulsos detectados.

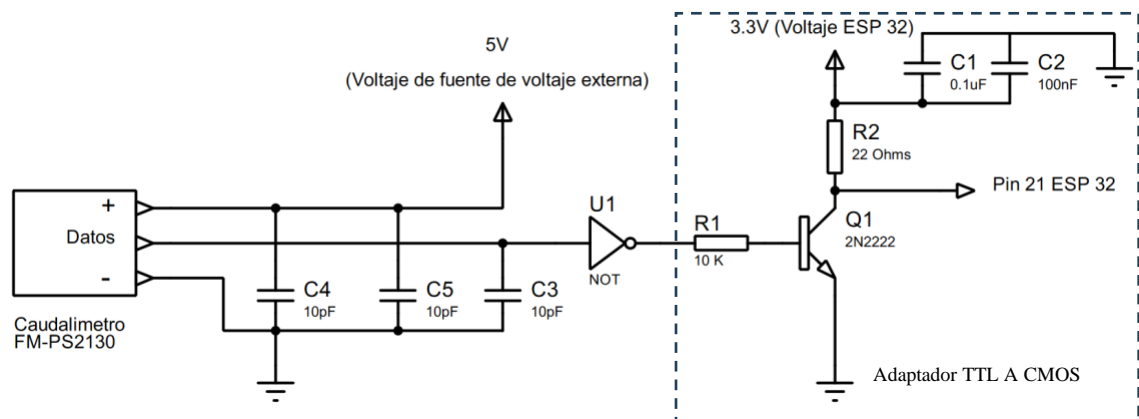


Figura 4.8. Acoplamiento del sensor de flujo mediante un adaptador de nivel TTL a CMOS, para reducir el voltaje a 3.3V (voltaje máximo soportado por el ESP 32).

Con el circuito mencionado, se realiza la caracterización del PWM correspondiente al flujo del electrolito. Para ello, se mide el voltaje suministrado a la bomba de agua en función de los diferentes niveles de PWM generados por el microcontrolador, a partir de una serie de experimentos en los que los niveles de PWM se variaron desde 0 hasta 255, en incrementos de 10. Para cada nivel de PWM, se registraron las mediciones correspondientes de voltaje y flujo del electrolito, obteniendo así una caracterización precisa del comportamiento del sistema en relación con los diferentes valores de PWM aplicados el voltaje y la velocidad del flujo del electrolito. Los resultados se presentan en la sección 5.4.

Además, con el propósito de determinar el efecto independiente del flujo del electrolito en el sobre corte y en la remoción del material, se realizaron pruebas en un acero AISI 1018. Los resultados se presentan en la sección 5.4. Estos resultados también permiten identificar la importancia del control de flujo dentro del proceso, y de cierto modo también justifican la necesidad de la implementación del controlador de flujo que se propone como parte de este trabajo de investigación.

4.6 Diseño del controlador difuso de flujo

Para el diseño del controlador difuso del flujo del electrolito, se consideran las siguientes variables: el error con respecto a un flujo de referencia y la derivada del flujo, las cuales actúan como entradas del sistema difuso. Se consideraron tales variables pues el error proporciona información sobre la diferencia entre el valor real y el valor deseado (referencia), mientras que la derivada del flujo indica la tendencia sobre el comportamiento en el tiempo de dicha variable y, por lo tanto, su tendencia a desviarse de dicho valor de referencia. La salida del sistema es un valor en el ciclo de trabajo PWM que varía entre 50 y 255. El valor mínimo se determina a partir del valor en que comienza a fluir electrolito, debido a la acción de la bomba de inyección, mientras que el valor máximo corresponde al 100 % del ciclo de trabajo de la señal PWM y, por lo tanto, el valor del flujo máximo. La Figura 4.9 ilustra el diagrama de bloques correspondiente al controlador difuso implementado. La planta es el sistema que se desea controlar en este caso es la bomba de agua que mueve y determina el flujo del electrolito, la planta responde a la señal de control proporcionada por el sistema de control difuso, que ajusta el flujo.

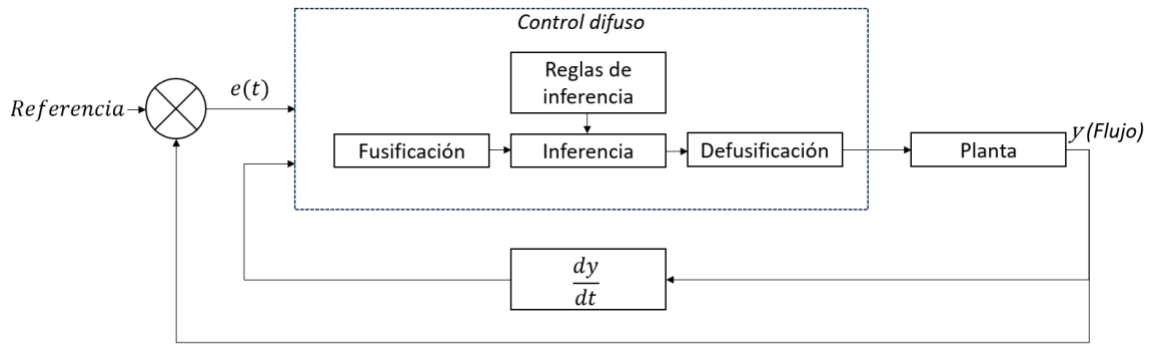


Figura 4.9. Diagrama de control difuso MISO para la regulación del flujo.

Para estimar la tasa de cambio del flujo con respecto al tiempo ($\frac{dy}{dt}$), es decir, la estimación de la derivada en el flujo, se utilizó la ecuación (4.7). Esta fórmula permite calcular la pendiente de la línea secante que conecta los puntos $(t1, y1)$ y $(t2, y2)$ en el gráfico del flujo con respecto al tiempo. Al representar la variación promedio del flujo entre dos instantes, esta medida ofrece una estimación aproximada de la derivada en ese intervalo.

$$dy = \frac{y2 - y1}{t2 - t1} \quad (4.7)$$

Donde:

dy	Es la derivada del flujo
$t1$	Tiempo inicial del intervalo que define a la pendiente
$y1$	Caudal del electrolito en el instante $t1$
$t2$	Tiempo final del intervalo que define a la pendiente
$y2$	Flujo del electrolito en el instante $t2$

4.6.1 Conjuntos difusos del controlador de flujo

Bajo el enfoque de la lógica difusa, el paso inicial consiste en transformar un valor numérico en uno difuso, lo que se logra mediante el grado de pertenencia a una variable lingüística en un proceso conocido como defusificación. Para llevar a cabo esta

transformación, es necesario definir tanto el número de conjuntos difusos para cada variable como sus respectivas etiquetas lingüísticas. En este caso, las variables consideradas para el control del proceso de maquinado incluyen: Error de flujo, Derivada del flujo y valor de PWM. En la Tabla 1 se observa la configuración detallada de cada variable.

Tabla 1. Descripción de las entradas para el control difuso del flujo del electrolito.

Tipo de variable	Variable	Rango	Etiqueta	Función
Entradas	Error de flujo del electrolito	-85 a 0	Poco	Trapezoidal
		-9 a 8	Cero	Triangular
		0 a 85	Mucho	Trapezoidal
	Derivada del flujo	-8 a 0	Baja	Trapezoidal
		-2 a 3	Normal	Triangular
		0 a 8	Demasiada	Trapezoidal
Salida	PWM	50 a 125	Mínimo	Trapezoidal
		120 a 170	Optimo	Triangular
		165 a 255	Alto	Trapezoidal

Para calcular el error en el flujo del electrolito, se obtiene la diferencia entre el valor de referencia y el flujo medido. En cuanto a las variables lingüísticas, estas son: para el error del flujo, Poco (PO), el cual está representado por una función trapezoidal que abarca valores negativos, desde -85 hasta 0. Este conjunto refleja situaciones en las que el valor del flujo se encuentra por encima del valor de referencia, lo que indica que es necesario restar dicho exceso para alcanzar el valor deseado. Por esta razón, los valores negativos son considerados en la representación de esta variable. El conjunto Cero (CE) se representa mediante una función triangular que abarca el rango de -9 a 8, donde el error es considerado aceptable. Por otro lado, el conjunto Mucho (MU) está representado por una función trapezoidal que toma valores positivos, desde 0 hasta 80. Este conjunto indica que, si el flujo es menor al valor de referencia, se deberá aumentar para alcanzar el valor de referencia (*set-point*). En la Figura 4.10 se puede observar la disposición de los conjuntos en el universo de discurso.

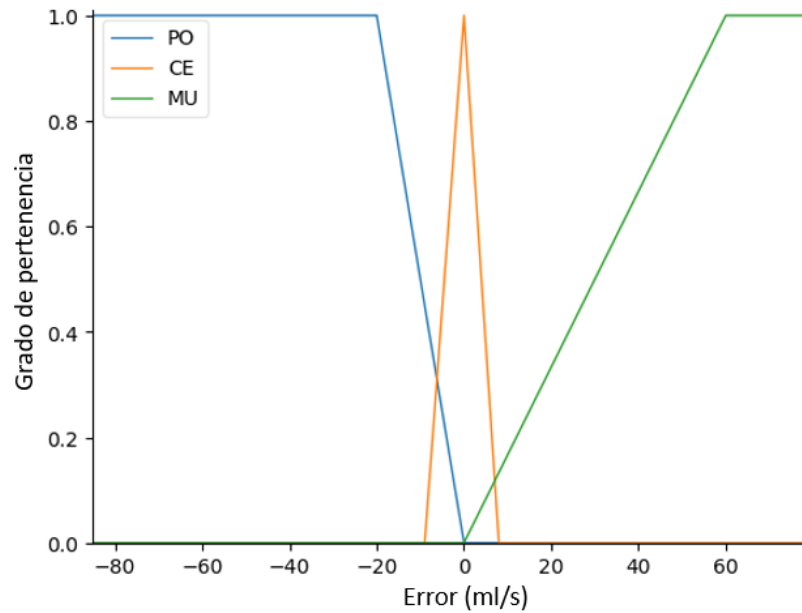


Figura 4.10 Conjuntos difusos para la variable Error.

La derivada del flujo (dy) se calcula utilizando la ecuación (4.7) mencionada previamente en este apartado, la cual permite determinar el cambio del flujo en función del tiempo. Esta variable es la segunda entrada, con un universo de discurso que abarca desde -8 hasta 8, representando la velocidad de cambio del flujo del electrolito, la cual es de 7.42 mL/s, valor obtenido a partir de la caracterización del flujo. Las etiquetas lingüísticas asociadas a esta variable son: Bajo (BAJ), Normal (NOR) y Demasiado (DEM). BAJ indica que el flujo está aumentando, NOR que el flujo se mantiene constante, y DEM que el flujo está disminuyendo. En la Figura 4.11. se observa la representación gráfica de los conjuntos de pertenencia para esta variable.

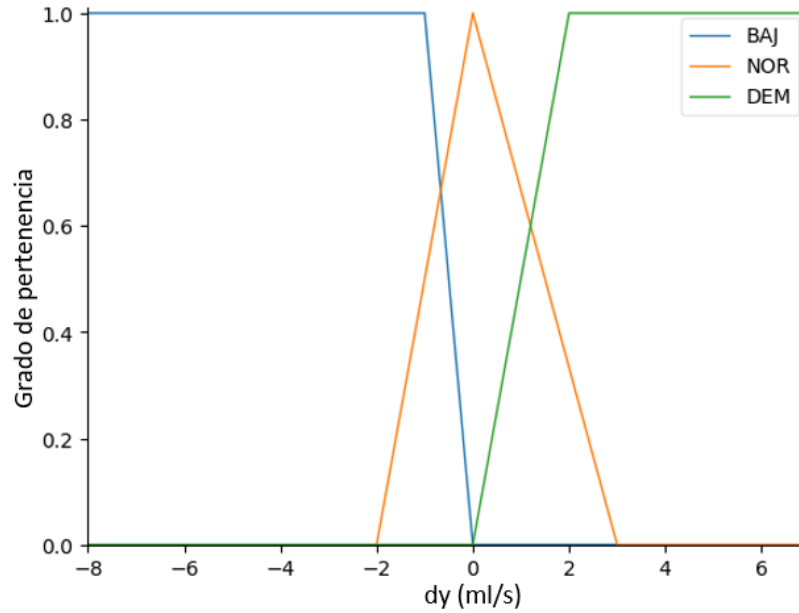


Figura 4.11. Conjuntos difusos de la derivada del flujo.

La salida del controlador es un valor de PWM (ciclo de trabajo) que varía entre 50 y 255, ajustando el flujo del electrolito en función del error y la derivada del flujo. Las variables lingüísticas correspondientes son: Mínimo (MI), Óptimo (OP) y Alto (AL). MI está representada por una función trapezoidal que indica un rango de PWM en el que la bomba de agua opera a bajas revoluciones. OP corresponde a un rango en el que las variaciones de PWM no producen cambios significativos en la velocidad del flujo del electrolito; mientras que AL, representa un valor de PWM en el que la bomba incrementa el flujo. En la Figura 4.12 se puede observar la distribución de los conjuntos sobre el universo de discurso para la variable de salida PWM el cual toma valores enteros que van desde 0 a 255, que corresponde al ciclo de trabajo.

Los conjuntos difusos se ajustaron manualmente mediante un proceso de prueba y error. Se configuró cada conjunto individualmente, observando el comportamiento del control hasta alcanzar una regulación aceptable, donde el sistema se aproximará lo más posible al valor de referencia (*setpoint*). Los resultados obtenidos se detallan en la sección 5.6.

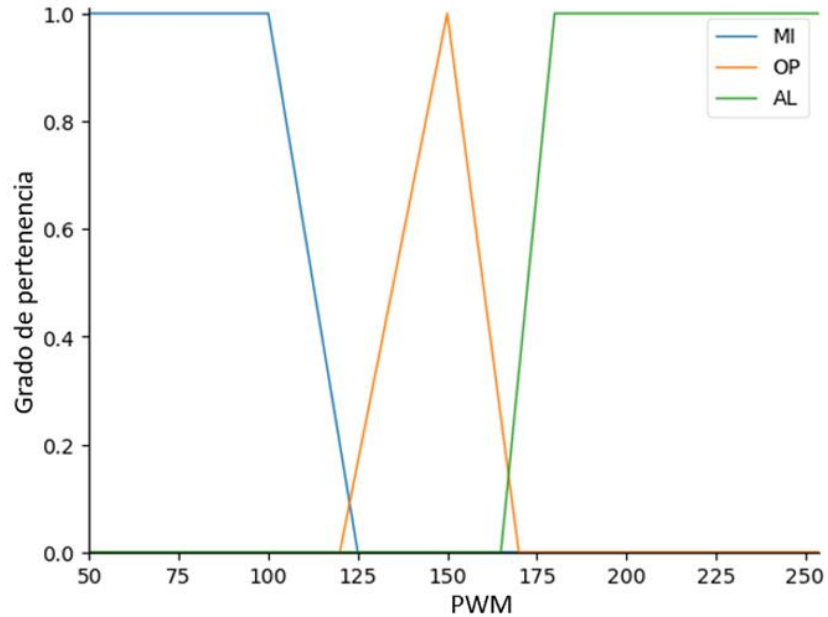


Figura 4.12. Conjuntos difusos para la variable de salida denominada PWM (que representa el ciclo de trabajo).

4.6.2 Reglas difusas para el controlador de flujo

El controlador difuso del flujo de electrolito considera dos variables de entrada: el error del flujo y la derivada del flujo. La salida del sistema es un valor de PWM que ajusta el flujo de acuerdo con las condiciones actuales del proceso. Las reglas difusas establecen cómo las entradas se combinan para determinar el valor de la salida.

A continuación, se presentan las reglas difusas que regulan el comportamiento del controlador, numeradas de R1 a R9:

- R1: Si el error del flujo es Poco y la derivada del flujo es Baja, entonces el PWM es Mínimo.
- R2: Si el error del flujo es Poco y la derivada del flujo es Normal, entonces el PWM es Mínimo.
- R3: Si el error del flujo es Poco y la derivada del flujo es Demasiada, entonces el PWM es Óptimo.

- R4: Si el error del flujo es Cero y la derivada del flujo es Baja, entonces el PWM es Óptimo.

- R5: Si el error del flujo es Cero y la derivada del flujo es Normal, entonces el PWM es Óptimo.

- R6: Si el error del flujo es Cero y la derivada del flujo es Demasiada, entonces el PWM es Óptimo.

- R7: Si el error del flujo es Mucho y la derivada del flujo es Baja, entonces el PWM es Alto.

- R8: Si el error del flujo es Mucho y la derivada del flujo es Normal, entonces el PWM es Alto.

- R9: Si el error del flujo es Mucho y la derivada del flujo es Demasiada, entonces el PWM es Alto.

4.7 Controlador difuso de la distancia inter-electrodos

La distancia inter-electrodos es una de las variables más importantes del proceso ECM (Groover, 2007). Esta distancia determina en gran medida la remoción del material, y está estrechamente relacionada con la precisión del maquinado, tal como se ha expuesto anteriormente en el estado del arte. Dado que la magnitud de la distancia se encuentra en la escala de micrómetros (milésima parte de un milímetro), su medición directa requiere de instrumentos precisos; pero adicionalmente, la separación entre electrodos se encuentra inmersa en un electrolito polarizado, por lo cual su medición directa resulta poco práctica. En este trabajo, no se realiza una medición directa de la separación entre electrodos, sino que se utiliza una estimación indirecta, a través del monitoreo de variables secundarias, como el voltaje de polarización y la corriente de maquinado.

4.7.1 Estimación de la *IEG*

La estimación de la *IEG* se realiza en función de la posición relativa entre la herramienta y la pieza de trabajo, así como de la cantidad de material que ha sido removido. A medida que el material es eliminado de la pieza de trabajo, la corriente y la

IEG varían, lo que requiere un monitoreo continuo para ajustar el desplazamiento de la herramienta y mantener una separación constante.

Al inicio del proceso, antes de que la herramienta comience a penetrar en la pieza, el área de exposición corresponde únicamente al área de la base de la herramienta, que en este caso es un cilindro hueco (ver Figura 4.13). Dicha área puede calcularse utilizando la ecuación (4.8). Sin embargo, a medida que la herramienta comienza a desgastar la pieza de trabajo, esta penetra gradualmente en la misma.

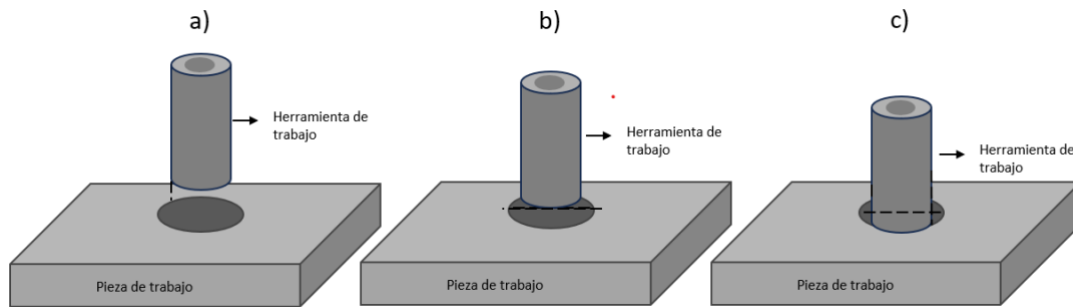


Figura 4.13. Posición de la herramienta de trabajo: a) La herramienta se encuentra en la separación inicial, donde el área de exposición corresponde al área de la base; b) La herramienta ha descendido hasta la frontera entre la pieza de trabajo y el barreno, manteniéndose el área de exposición igual al área de la base; y c) La herramienta ha penetrado en la pieza, y el área de exposición se calcula utilizando la ecuación (4.9).

A la superficie de la base expuesta inicialmente, se le va sumando de manera progresiva una porción de las paredes del cilindro que conforma la herramienta de trabajo. Como resultado, el área de exposición se incrementa, y dicho incremento puede calcularse utilizando la ecuación (4.9).

$$\text{Área de la base} = \left(\pi \left(\frac{De}{2} \right)^2 \right) - \left(\pi \left(\frac{Di}{2} \right)^2 \right) \quad (4.8)$$

$$\text{Área de exposición} = \text{Área de la base} + ((\pi)(De)(P)) \quad (4.9)$$

Donde:

<i>Área de la base</i>	Área de la base de la herramienta de trabajo
<i>De</i>	Diámetro externo de la herramienta de trabajo
<i>Di</i>	Diámetro interno de la herramienta de trabajo
<i>Área de exposición</i>	Área de exposición de la herramienta de trabajo.
<i>P</i>	Profundidad de la perforación con respecto a la superficie de la pieza de trabajo

Entonces teniendo el área de exposición área de la base y área de la exposición podemos calcular el gap con la ecuación (4.10).

$$IEG = \frac{E \cdot A}{I \cdot r} \quad (4.10)$$

Donde:

<i>IEG</i>	Distancia entre electrodos (<i>mm</i>)
<i>E</i>	Voltaje (V)
<i>A</i>	Área de exposición (<i>mm</i> ²)
<i>I</i>	Corriente (A)
<i>r</i>	Resistividad de electrolito (<i>50 Ω.mm</i>)

4.7.2 Conjuntos difusos del controlador de gap

El sistema de control está compuesto por dos controles individuales, cada uno asignado a un núcleo del ESP32. El primer control, que regula el flujo, se describe en la sección (4.6), mientras que el segundo control encargado de la separación entre los electrodos (ver Figura 4.14), que se aborda en este apartado. En este contexto, la "planta" hace referencia al sistema físico que se controla, que en este caso es el proceso de ajuste de la distancia entre los electrodos durante el maquinado electroquímico.

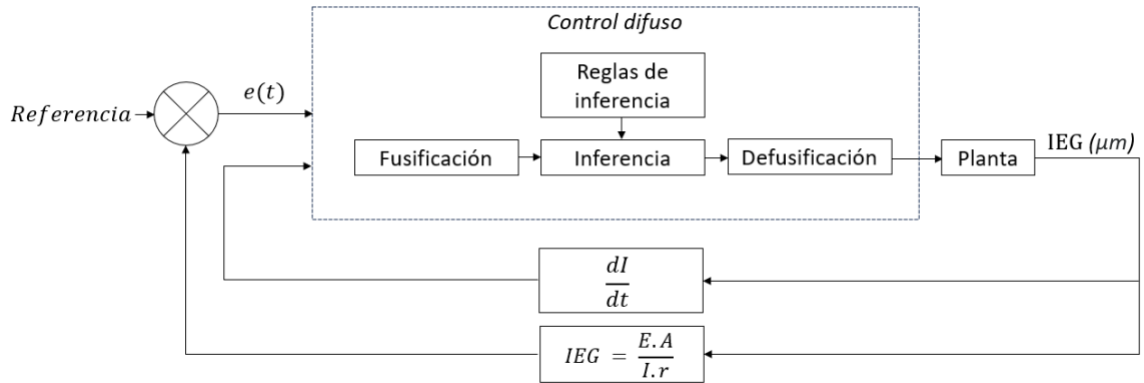


Figura 4.14. Diagrama de control difuso MISO para el control del Gap

Para el control de la *IEG*, se implementa un controlador de tipo MISO, el cual tiene dos entradas y una salida. Las entradas son el error en el *IEG*, es decir, la diferencia de la *IEG* estimada con respecto al valor de referencia de 240 μm , y la derivada de la corriente con respecto al tiempo ($\frac{dl}{dt}$), puesto que es una variable estrechamente ligada a la *IEG*, por lo que su razón de cambio refleja la rapidez con que la *IEG* está desplazándose de su valor esperado. Por otra parte, la salida corresponde al ajuste de la separación, es decir, la medida que representa cuántos pulsos han de darse para que el sistema mecánico desplace a la herramienta de trabajo, ya sea en dirección a la pieza, para reducir la *IEG*, o en dirección opuesta, para alejarse. En la Tabla 2, se describen detalladamente los conjuntos de cada variable, la función que representa, la etiqueta lingüística asignada y los rangos de valores que toma cada conjunto.

Tabla 2. Descripción de las entradas y salida para el control difuso del Gap.

Tipo de variable	Variable	Rango	Etiqueta	Función
Entradas	Derivada de la corriente	-150 a -50	Negativa	Trapezoidal
		-80 a 80	Cero	Triangular
		60 a 150	Positiva	Trapezoidal
	Error <i>IEG</i>	-300 a -30	Negativo	Trapezoidal
		--80 a 80	Nada	Triangular
		20 a 300	Positivo	Trapezoidal
Salida	Ajuste	-100 a -25	Baja	Trapezoidal
		-40 a 40	Optimo	Triangular
		25 a 100	Sube	Trapezoidal

Con respecto a la entrada para la derivada de la corriente (dI), cuyo universo de discurso abarca desde -150 hasta 150, se definen las siguientes etiquetas lingüísticas:

- **Negativa:** Representada por una función trapezoidal, que toma valores de -150 a -50. Esto indica que la herramienta se está alejando de la pieza de trabajo, lo que provoca una disminución en la corriente.
- **Cero:** Representada por una función triangular, con un rango de -80 a 80. Esta etiqueta indica el intervalo en el que la corriente no ha cambiado significativamente, funcionando como un margen de tolerancia.
- **Positiva:** Representada por una función trapezoidal, con un rango de 60 a 150. Esta etiqueta señala que la herramienta de trajo está muy cerca de la pieza de trabajo, lo que resulta en un aumento de la corriente.

En la Figura 4.15 se puede observar la disposición de los conjuntos lingüísticos dentro del universo de discurso de manera gráfica.

Para calcular la derivada de la corriente se utilizó la ecuación (4.11) la cual se calcula cada segundo:

$$dI = \frac{I(t_2) - I(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (4.11)$$

Donde:

dI	Derivada de la corriente
$I(t_1)$	Es la corriente en un tiempo inicial t_1
$I(t_2)$	es la corriente en un tiempo posterior t_2
Área de exposición	Área de exposición de la herramienta de trabajo.
$t_2 - t_1$	Es el intervalo de tiempo entre las dos mediciones.

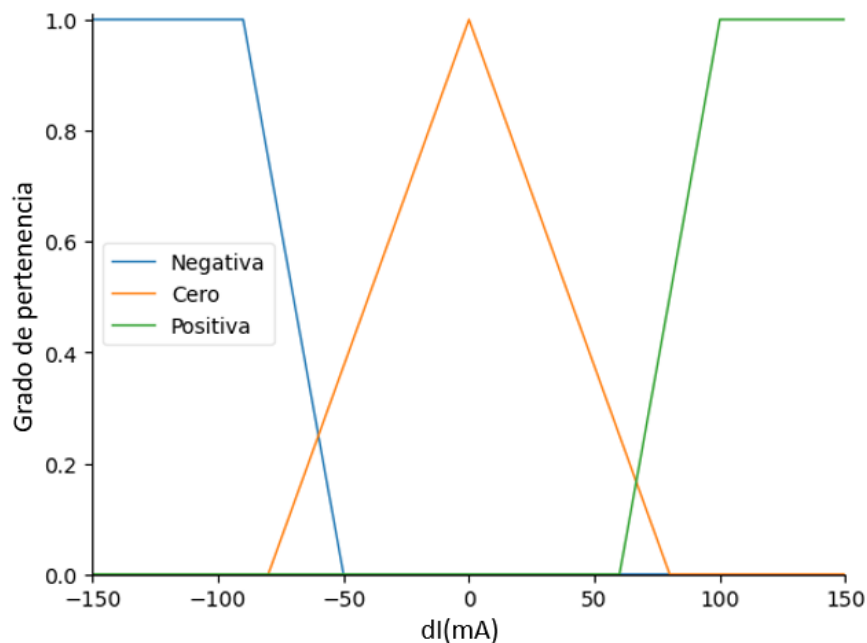


Figura 4.15. Conjunto difuso de la deriva de la corriente (dI).

La segunda entrada del sistema de control difuso corresponde al error en la *IEG*, el cual se define como la diferencia entre la referencia deseada para la separación de los electrodos y el valor medido en tiempo real. Esta variable tiene un impacto directo en el ajuste de la distancia entre la herramienta y la pieza de trabajo.

El error en el *IEG* se clasifica en tres conjuntos difusos, los cuales están definidos sobre un universo de discurso que varía de -300 a 300 micrómetros. Estos conjuntos son:

- **Negativo:** Representado por una función trapezoidal, abarcando el intervalo de -300 a -100 micrómetros. Este conjunto indica que el electrodo se encuentra demasiado cerca de la pieza de trabajo, lo que implica un error negativo significativo. En esta situación, es necesario ajustar el sistema para aumentar la distancia entre los electrodos.
- **Nada:** Representado por una función triangular, con un rango de -100 a 100 micrómetros. Esta etiqueta refleja el rango en el que el error es aceptable, lo que indica que la distancia entre los electrodos se encuentra dentro de los límites tolerables. En este caso, no es necesario realizar ajustes significativos en el sistema.

- **Positivo:** Representado por una función trapezoidal, cubriendo el rango de 100 a 300 micrómetros. Este conjunto describe una situación en la que el electrodo se encuentra demasiado alejado de la pieza de trabajo, lo que requiere un ajuste inmediato para reducir la distancia y mantener la precisión en el proceso de maquinado.

En la Figura 4.16, se puede observar la representación gráfica de estos conjuntos difusos en el universo de discurso, mostrando cómo se distribuyen y cómo varía su grado de pertenencia en función del error en el cálculo de *IEG*.

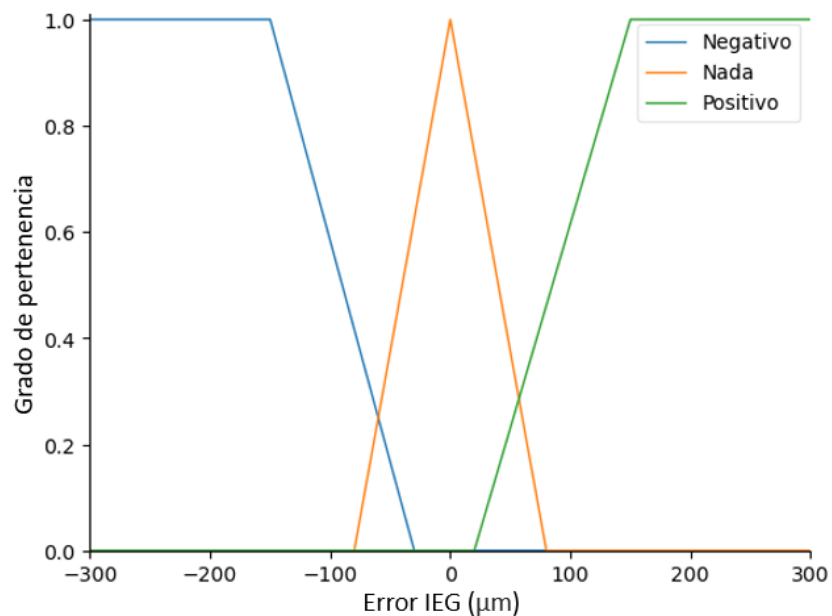


Figura 4.16. Conjunto difuso para el error en el *IEG*.

La salida del sistema de control difuso es el ajuste, el cual representa el valor en micrómetros que se debe aplicar para garantizar que el *gap* se mantenga en 240 micrómetros, lo cual es el valor óptimo para este proceso de maquinado. Esta variable se clasifica en tres conjuntos difusos dentro de un universo de discurso que varía de -100 a 100 micrómetros, permitiendo un control preciso del sistema. Los conjuntos son los siguientes:

- **Baja:** Representada por una función trapezoidal que cubre el rango de -100 a -25 micrómetros. Este conjunto sugiere que es necesario disminuir la distancia entre

los electrodos para corregir el *gap*. Un ajuste negativo indica que el electrodo está demasiado lejos de la pieza de trabajo, y por lo tanto, es necesario acercarlo.

- **Óptimo:** Representado por una función triangular, con un rango de -25 a 25 micrómetros. Esta etiqueta refleja el ajuste mínimo necesario, indicando que la distancia entre los electrodos es casi la correcta y que cualquier modificación debe ser muy pequeña para mantener el *gap* dentro del rango deseado.
- **Sube:** Representado por una función trapezoidal, abarcando desde 25 hasta 100 micrómetros. Este conjunto indica que es necesario aumentar la distancia entre los electrodos, ya que están demasiado cerca de la pieza de trabajo, lo que podría causar un exceso de erosión en el material.

En la Figura 4.17 ,se puede observar gráficamente cómo se distribuyen estos conjuntos en el universo de discurso.

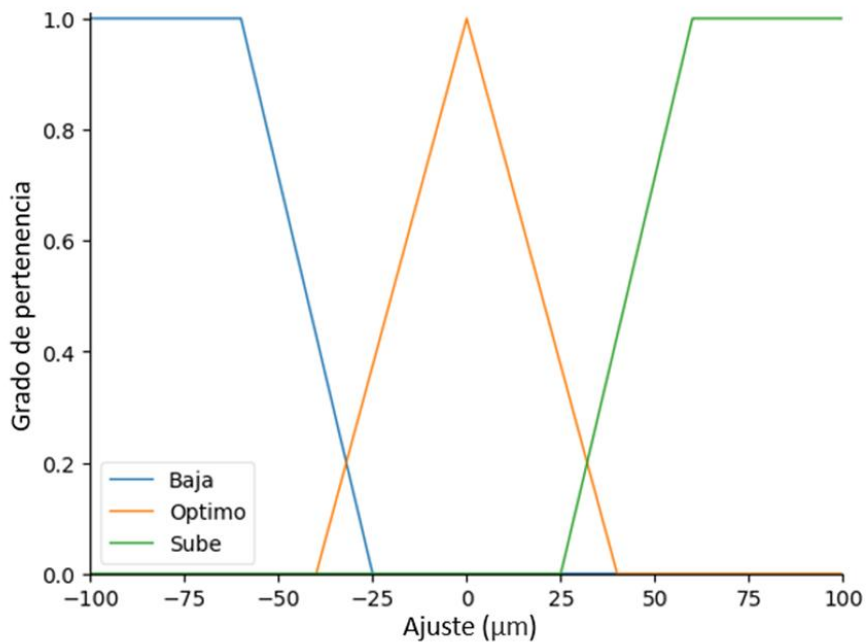


Figura 4.17. Conjunto difuso para la salida (*Ajuste*) del control difuso.

Para validar la sintonización de los conjuntos difusos, se registró el movimiento de la herramienta de trabajo y la *IEG*, con el objetivo de verificar que el *gap* se mantuviera en 240 micrómetros, considerado como el *valor de referencia*. La rutina de calibración

permite establecer un punto de referencia inicial en 240 μm , como se describe en la sección 4.4.3. Al mismo tiempo, se monitoreó el desplazamiento de la herramienta de trabajo, ya que, al remover material, el gap tiende a aumentar, lo que obliga al control a ajustar el desplazamiento para mantener la separación deseada. El valor de desplazamiento, obtenido como la salida defucificada, corresponde a la cantidad de micrómetros que deben ajustarse. De manera interna, este valor se divide entre 0.3968 (micrómetros de avance por pulso) para calcular los pasos que debe ejecutar el motor y así efectuar el ajuste.

Los resultados obtenidos fueron favorables, evidenciando un desplazamiento descendente y correcciones ascendentes ocasionales cuando la herramienta se acerca demasiado a la pieza de trabajo. Los detalles de estos resultados se presentan en la sección 5.7.

Posteriormente, se validó el correcto funcionamiento de ambos controles, cada uno corriendo en su respectivo núcleo. Se registró el flujo y se comprobó que se mantuviera cerca del *valor de referencia*, mientras la posición del electrodo descendía y el gap se mantenía dentro del rango deseado. Estos resultados se muestran en la sección 5.7.

4.7.3 Reglas difusas para el controlador del gap

Las reglas difusas del controlador de gap se construyen a partir de la combinación de los conjuntos difusos de las dos variables de entrada: la derivada de la corriente (dI) y el error del gap. Estas reglas permiten al sistema ajustar dinámicamente la separación entre los electrodos, tomando decisiones basadas en la variabilidad de las entradas y garantizando un control eficiente del proceso.

Cada combinación entre los conjuntos difusos de las dos entradas genera una regla que define el comportamiento de la salida, que en este caso es el ajuste en micrómetros. A continuación, se presentan las reglas difusas del sistema, numeradas de R1 a R9:

R1: Si dI es Negativa y el error del gap es Negativo, entonces el ajuste es Baja.

R2: Si dI es Negativa y el error del gap es Nada, entonces el ajuste es Baja.

R3: Si dI es Negativa y el error del gap es Positivo, entonces el ajuste es Baja.

R4: Si dI es Cero y el error del gap es Negativo, entonces el ajuste es Baja.

R5: Si dI es Cero y el error del gap es Nada, entonces el ajuste es Óptimo.

R6: Si dI es Cero y el error del gap es Positivo, entonces el ajuste es Sube.

R7: Si dI es Positiva y el error del gap es Negativo, entonces el ajuste es Sube.

R8: Si dI es Positiva y el error del gap es Nada, entonces el ajuste es Sube.

R9: Si dI es Positiva y el error del gap es Positivo, entonces el ajuste es Sube.

Estas reglas son necesarias para modelar el comportamiento del sistema y asegurar que la distancia entre los electrodos se mantenga dentro de los límites adecuados para un maquinado óptimo. La combinación de las etiquetas lingüísticas para dI y el error del gap permite al sistema adaptarse de manera eficiente a las condiciones cambiantes del proceso.

4.8 Implementación de los controladores en el sistema multinúcleo

En sistemas con un solo núcleo, todos los procesos deben ejecutarse secuencialmente, lo que puede derivar en una sobrecarga de tareas que ralentiza el procesamiento general y limita la capacidad de respuesta del sistema. Este enfoque obliga a realizar una cuidadosa priorización de tareas, donde procesos críticos deben frecuentemente interrumpirse o reprogramarse para permitir la ejecución de otras funciones, comprometiendo así el rendimiento y la estabilidad de sistemas de control en tiempo real (Lee, Kim, & Hong, 2024).

Por el contrario, la arquitectura de doble núcleo permite una distribución eficiente de las tareas, al asignar diferentes procesos a núcleos independientes. Esta separación facilita que cada núcleo se dedique a un conjunto específico de funciones, optimizando el tiempo de ejecución y reduciendo los tiempos de espera. Por ejemplo, en aplicaciones de control y monitoreo, un núcleo puede dedicarse exclusivamente a la adquisición y procesamiento de datos de sensores, mientras que el otro núcleo maneja las tareas de control y ajuste en el sistema. Esta segmentación permite no solo una mayor rapidez en la respuesta del sistema, sino también una disminución en la latencia de tareas críticas (Rajesh, Ashwin, Shekhil, Tanmay, & Vivek, 2010).

Además, el uso de un microcontrolador de doble núcleo permite que cada núcleo opere en paralelo y de manera sincrónica, lo cual mejora la robustez y estabilidad del sistema. Este enfoque posibilita una comunicación eficiente entre procesos, donde los núcleos pueden intercambiar información sin interferir en sus respectivos tiempos de procesamiento. De esta forma, se logra una configuración de multitarea que optimiza los recursos del microcontrolador, manteniendo un flujo de trabajo estable y reduciendo la probabilidad de congestión en el procesamiento de datos (Lee, Kim, & Hong, 2024).

El microcontrolador ESP32 el cual se eligió para este prototipo, cuenta con dos núcleos. En esta configuración, se asignó el núcleo 0 para tareas relacionadas con la gestión del gap, incluyendo su calibración y control, mientras que el núcleo 1 se utiliza para el monitoreo de parámetros como corriente, voltaje y flujo, así como para el control del flujo. A pesar de esta distribución, las funciones de ambos núcleos interactúan entre sí independientemente de su asignación, permitiendo una coordinación fluida entre los procesos. Esta estructura se ilustra en la Figura 4.18.

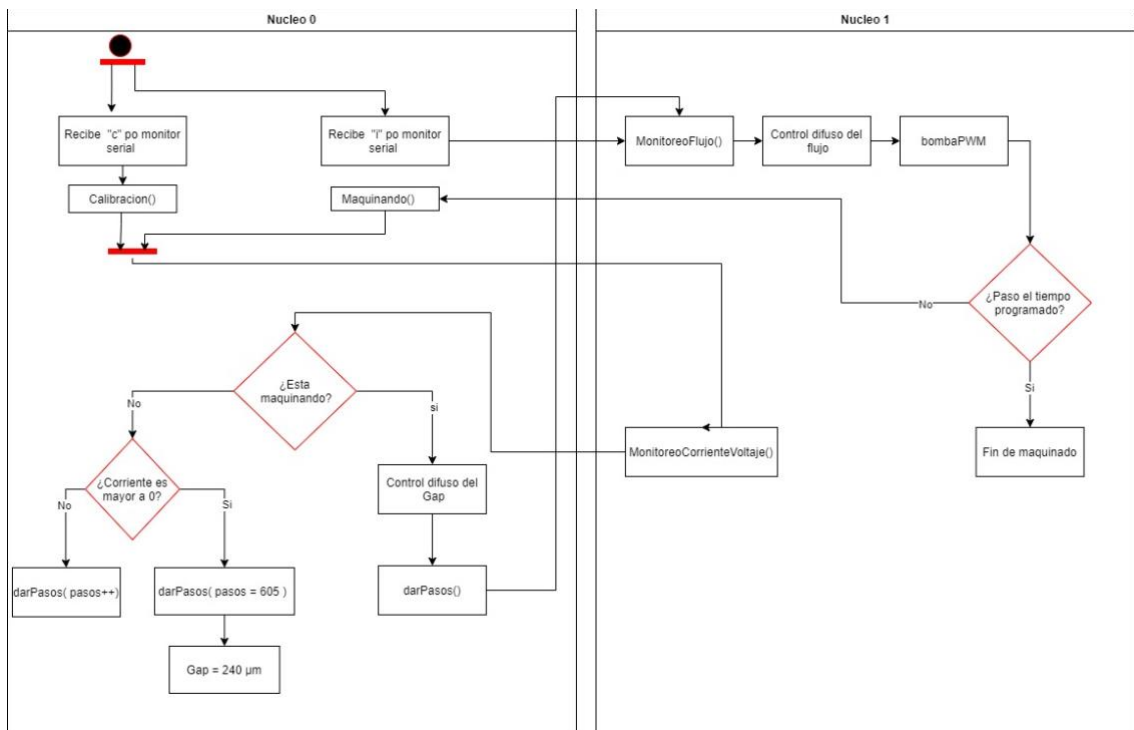


Figura 4.18. Diagrama de secuencia que ilustra la distribución de las funciones en los núcleos.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el desarrollo del prototipo de maquinado electroquímico se integraron múltiples subsistemas para monitorear y controlar parámetros clave del proceso, como la corriente, el voltaje, el flujo del electrolito y la distancia inter-electrodos. Durante las pruebas experimentales se implementaron ajustes de configuración y se realizaron mediciones y caracterizaciones para asegurar la estabilidad y precisión del sistema. En los siguientes apartados, se presentan y discuten los resultados obtenidos, que incluyen la caracterización del movimiento de la herramienta de trabajo, la verificación de los circuitos de medición, y el desempeño de los controles difusos aplicados al flujo y al gap.

5.1 Integración del prototipo de maquinado

En la Figura 5.1. Se presenta una fotografía del prototipo completo del sistema de maquinado electroquímico, en la que se identifican los siguientes componentes:

1.- **Equipo de cómputo:** Registra y monitorea en tiempo real las variables de corriente, voltaje, flujo del electrolito y la distancia inter-electrodos.

2.- **Generador de funciones** Tektronix AFG1022: Configurado para generar una señal cuadrada de 1 kHz, con un voltaje RMS de 700 mV, utilizada para la polarización de los electrodos.

3.- **Osciloscopio Keysight** DSOX1102G para monitorear que la corriente y el voltaje coinciden con lo que el microcontrolador registra.

4.- **Amplificador de aislamiento** Keysight 33502A: Multiplica por cinco la amplitud de la señal del generador de funciones y lo protege de posibles cortocircuitos

5,6 y 7, **Fuentes de voltaje:** GW Instek GPE-2323, BK Precision 1760A y GW Instek GPE-2323: Estas fuentes se utilizan para polarizar el sistema y los distintos subsistemas.

8.- **Microcontrolador ESP32:** Es el cerebro del sistema, encargado de gestionar el control de todo el proceso de maquinado electroquímico.

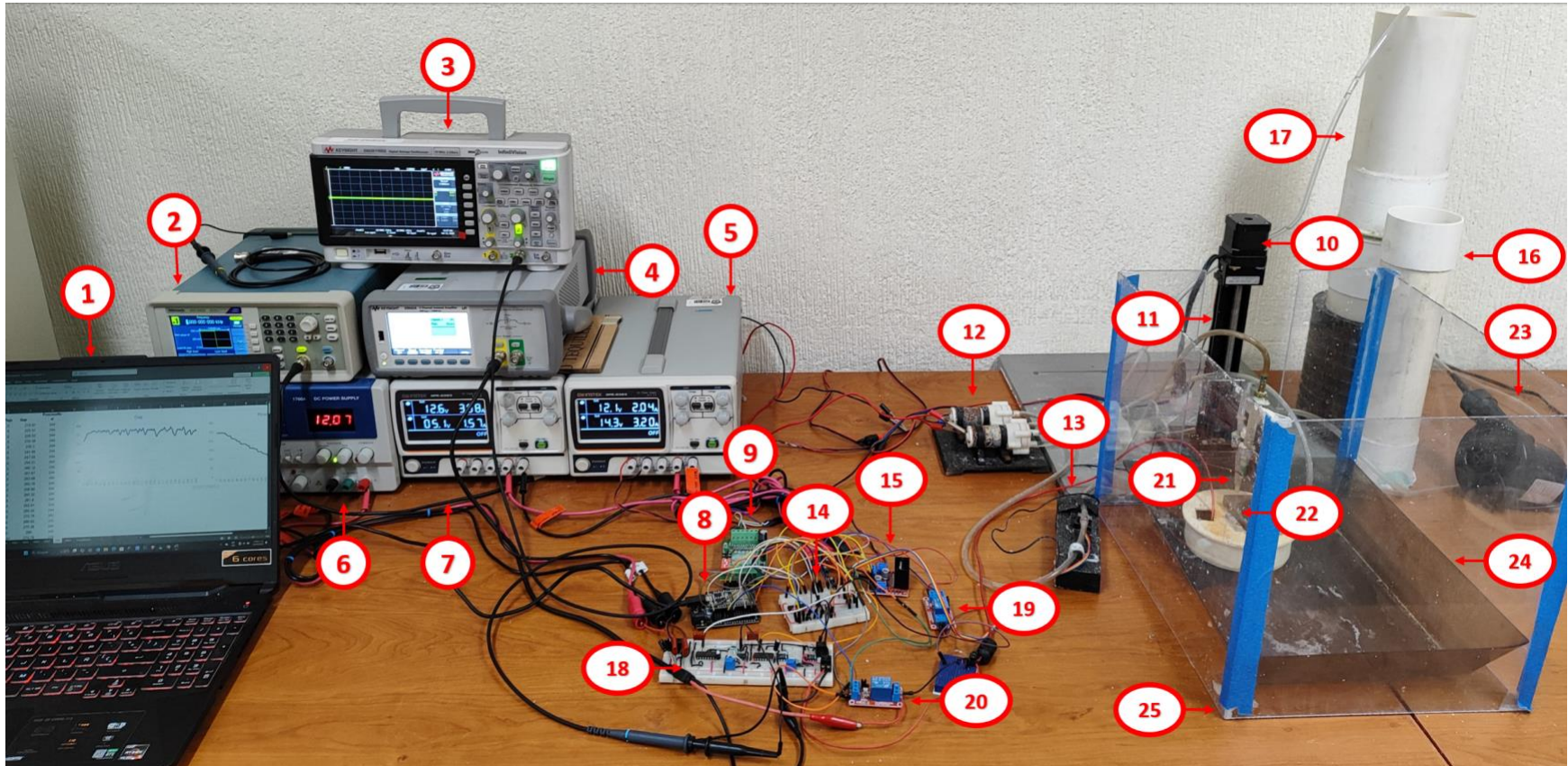


Figura 5.1. Fotografía del prototipo ECM completo.

9.- **Driver TB6560:** Proporciona la corriente necesaria para el funcionamiento del motor paso a paso NEMA 17.

10.- **Motor NEMA 17:** Mueve la herramienta de trabajo a lo largo de una guía lineal, controlando el desplazamiento vertical (eje Z).

11.- **Guía lineal Velmex:** Proporciona un soporte preciso para el movimiento de la herramienta de trabajo.

12.- **Bombas de inyección y recirculación del electrolito:** Mantienen el flujo constante del electrolito dentro del sistema.

13.- **Caudalímetro FM-PS2130:** Capaz de medir flujos entre 40 y 100 mililitros por minuto, utilizado para cuantificar el caudal del electrolito.

14.- **Circuito de acoplamiento del sensor de flujo:** Utiliza un adaptador de nivel TTL a CMOS para reducir el voltaje a 3.3 V, compatible con el rango de medición del microcontrolador ESP32

15.- **Driver L298N:** Suministra la corriente necesaria para controlar la bomba de inyección del electrolito mediante modulación por ancho de pulso (PWM).

16.- **Contenedor de electrolito filtrado:** Almacena el electrolito que ha sido recirculado tras pasar por el filtro.

17.- **Filtro de electrolito:** Elimina impurezas y residuos metálicos generados durante el proceso de maquinado.

18.- **Subsistema de monitoreo de corriente y voltaje:** Mide y envía los valores al microcontrolador para ajustar el control difuso.

19 y 20 **Relevadores:** Controlan la polarización de los electrodos dependiendo de la modalidad de operación. Durante el maquinado, los electrodos se polarizan con la señal cuadrada del generador de funciones, mientras que en la calibración se utilizan las fuentes de voltaje.

21.- **Herramienta de trabajo:** Electrodo que actúa como cátodo durante el proceso de maquinado.

22.- **Pieza de trabajo:** Actúa como ánodo y es la superficie donde se remueve el material.

23.- **Bomba de aire:** Elimina el exceso de electrolito acumulado alrededor del área de maquinado.

24.- **Contenedor de electrolito con residuos metálicos:** Almacena el electrolito y los residuos resultantes del proceso de maquinado.

25.- **Panel de acrílico:** para evitar que el electrolito salpique a los componentes

5.2 Caracterización del movimiento de la herramienta de trabajo

Para poder desplazar la herramienta con precisión es necesario calcular la distancia que recorre con relación a pulsos enviados al motor a pasos y encontrar la configuración del controlador del motor adecuada para que cada pulso reflejado en movimiento sea lo más preciso posible evitando la histéresis. En la práctica se utilizó un indicador dial para marcar un punto de referencia. Luego, se procedió a realizar dos ajustes en el controlador TB6560, configurando uno a 1/8 de paso y otro a 1/16 de paso.

En cada configuración, se emitieron pulsos hasta lograr el desplazamiento de 1 milésima de pulgada (se utilizó esta unidad pues el dial tiene graduación en sistema americano). Las pruebas se ejecutaron en sentido ascendente (moviendo la herramienta hacia arriba), y se repitieron en sentido descendente para verificar la precisión y eliminar posibles efectos de histéresis. Esto se hizo con el fin de descartar cualquier posible efecto de histéresis en las mediciones. Los resultados se detallan en la Tabla 5.1 que muestra el aumento de pulsos y su relación con el desplazamiento de la herramienta de trabajo para la configuración de 1/8 de paso.

A partir de los datos proporcionados en la Tabla 5.1, se puede apreciar en la Figura 5.1 (a) que la herramienta siempre vuelve al punto de inicio. No obstante, este comportamiento no se observa claramente en la Tabla 5.1 (b), lo que sugiere la presencia de histéresis en el movimiento, lo cual podría afectar la precisión. Debido a esta indicación, se optó por llevar a cabo la experimentación con la configuración de 1/8 de paso. De este modo, se logra una resolución en el movimiento del electrodo de $0.3968 \mu\text{m}$

por cada pulso enviado al controlador. Teniendo en cuenta que 1 milésima es equivalente a 25.4 micrómetros y que la herramienta avanza una milésima de pulgada con cada 64 pulsos, podemos calcular la resolución como 25.4 dividido por 64, lo que resulta en 0.3968 micrómetros.

Tabla 5.1. Datos de la caracterización del 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

5.3 Verificación del funcionamiento del circuito de medición

Para verificar el correcto funcionamiento del circuito de medición, se midieron la corriente y el voltaje suministrados por el generador de funciones, los cuales pasaron a través del amplificador de aislamiento. Se ajustó la resistencia variable hasta alcanzar el valor deseado y se compararon los valores atenuados o amplificados con los valores iniciales suministrados, para asegurar que correspondieran adecuadamente.

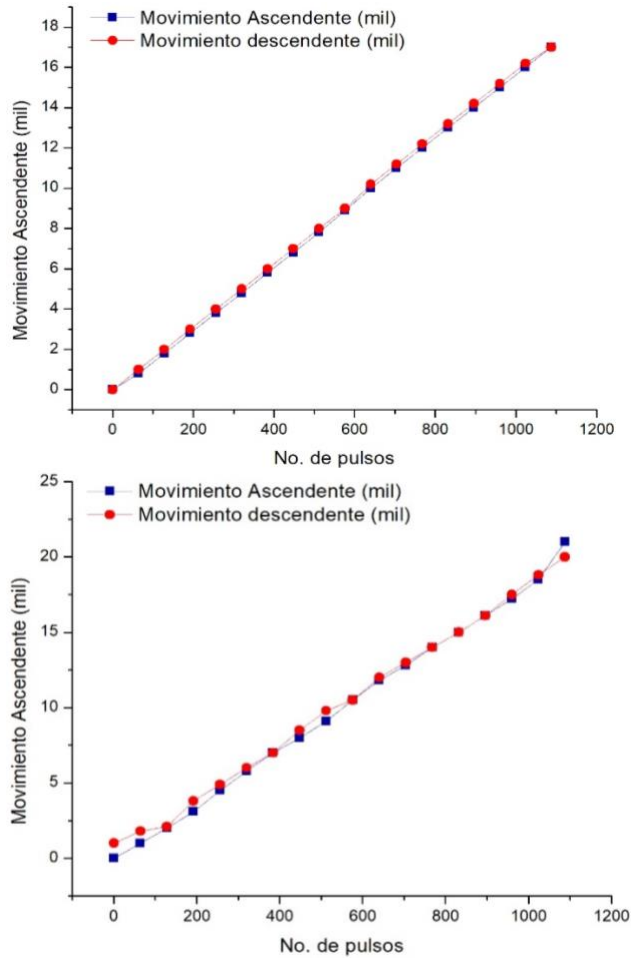


Figura 5.2. Gráficas que muestran el desplazamiento de la guía lineal a configuraciones de 1/8 (a) y 1/16 (b) de paso, respectivamente.

5.3.1 Ajuste de la ganancia de voltaje y corriente

Fue necesario ajustar las ganancias para la corriente y el voltaje, ya que la corriente que circula por la celda electrolítica es baja y podría generar valores que el microcontrolador no alcance a medir. En contraste, el voltaje excede los 3.2 V, límite que el microcontrolador puede medir, lo que provocaría una saturación y resultados incorrectos. Por esta razón, se ajustó el potenciómetro para establecer la amplitud de la corriente en 16.5 y el voltaje en 0.25 V.

En la Figura 5.3, se presenta un ejemplo de la amplificación de la señal de corriente en un maquinado de prueba. La línea amarilla representa la señal original antes de ser procesada por el circuito descrito en la sección 4.4.2, mientras que la línea verde

corresponde a la señal amplificada, que es la entrada recibida por el microcontrolador. Esta señal de corriente ha sido amplificada por un factor de 16.5, calibrado mediante el ajuste del potenciómetro.

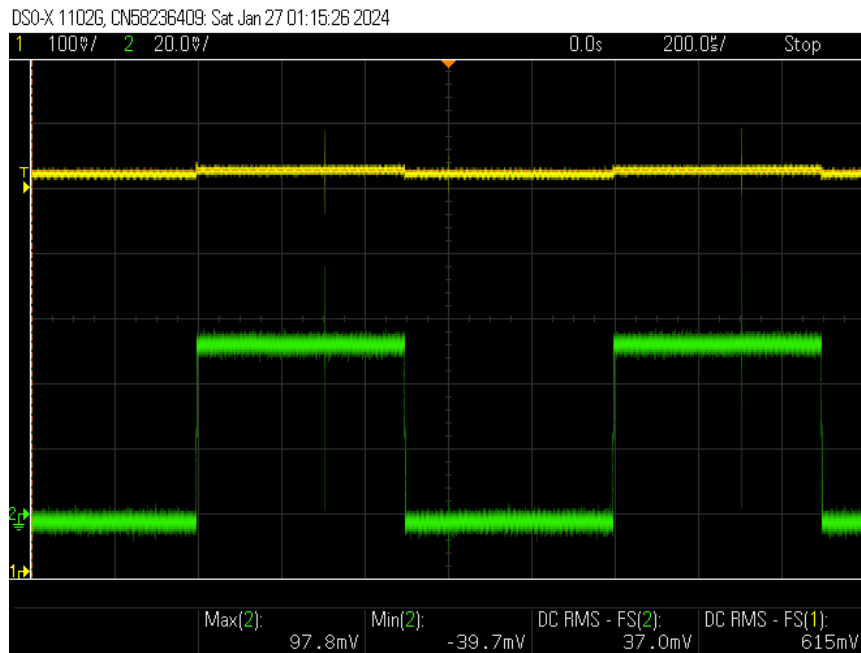


Figura 5.3. Visualización gráfica de la amplificación de la corriente a un factor de 16.5

El subsistema de monitoreo de corriente y voltaje ha sido diseñado para operar dentro de rangos específicos que garantizan la precisión y seguridad de las mediciones necesarias en procesos de Electroquímica de Materiales (ECM). El sistema permite medir corrientes desde **1 mA** hasta **100 mA**, ampliando su flexibilidad a través de una ganancia de **16.5**. Esta ganancia se logra gracias a un circuito amplificador no inversor que utiliza una resistencia de muestreo para convertir la corriente en un voltaje proporcional. Posteriormente, el voltaje generado es amplificado para asegurar que incluso las señales más pequeñas puedan ser procesadas por el ADC del ESP32 sin comprometer su resolución o precisión. El diseño incorpora resistencias variables que permiten ajustar la ganancia en función de las necesidades específicas del proceso, facilitando la adaptación a diferentes niveles de corriente y optimizando el monitoreo.

Por otro lado, el monitoreo del voltaje ha sido cuidadosamente implementado para medir desde **3.3 V** hasta un máximo de **12 V**, utilizando una ganancia fija de **0.25**. Este proceso se realiza mediante un circuito inversor que atenúa el voltaje de entrada,

reduciendo su magnitud a niveles seguros para el microcontrolador. Por ejemplo, un voltaje de 12 V aplicado a la celda electrolítica se reduce a **3 V**, garantizando que la señal permanezca dentro del rango permitido por el ADC del ESP32. Esta atenuación protege el microcontrolador de posibles daños y asegura que las mediciones sean consistentes y fiables.

La interacción entre la ganancia y las variables de entrada es fundamental en este diseño. En el caso del monitoreo de corriente, la ganancia depende de la relación entre una resistencia fija y una resistencia variable, lo que permite calibrar el sistema para adaptarse a diferentes rangos de operación. En el monitoreo de voltaje, la atenuación es fija, lo que asegura que cualquier valor dentro del rango especificado sea adecuadamente reducido antes de llegar al ADC. Estos elementos de diseño, junto con la implementación de convertidores de DC a RMS para el acondicionamiento de las señales monitoreadas, permiten un monitoreo robusto, adaptable y eficiente, esencial para el éxito de los procesos electroquímicos.

La Tabla 2 presenta los rangos operativos y las ganancias utilizadas en el subsistema de monitoreo. Para la corriente, se registran valores entre 1 mA y 100 mA con una ganancia de 16.5, mientras que para el voltaje se manejan valores entre 3.3 V y 12 V, con una ganancia de 0.25.

Tabla 2. Tabla con valores mínimos y máximos que monitore el subsistema de corriente y voltaje.

Variable	Mínimo	Máximo	Ganancia	Descripción
Corriente	1 mA	100 mA	16.5	Ajuste mediante RV2 y R5 para diferentes rangos
Voltaje	3.3V	12 V	0.25	Fija, protege el ADC del ESP32

5.3.2 Filtro de media móvil y estimación de la distancia inter-electrodos

Al estimar la separación entre los electrodos, surge un problema relevante: la corriente no presenta un comportamiento constante, sino que experimenta fluctuaciones durante el proceso de maquinado. Esto ocasiona inestabilidad en la estimación del gap. Para mitigar este inconveniente, se implementó un filtro de media móvil, cuyo propósito es suavizar los cambios bruscos en la estimación del gap.

En la

Figura 5.4 se puede observar la comparación de la estimación del gap sin filtro y con filtro, capturado por el sistema de monitoreo en un intervalo de 60 segundos, en un maquinado de prueba. La aplicación del filtro de media móvil permite obtener una estimación más estable y precisa, reduciendo las fluctuaciones indeseadas causadas por la variación de la corriente.

El algoritmo utilizado para aplicar el filtro de media móvil consiste en llenar un arreglo de 5 elementos y calcular su promedio. En cada iteración, se reemplaza el valor de la posición 0 del arreglo con la nueva estimación del gap, se recalcula el promedio, y en la siguiente iteración se sustituye el valor en la posición 1, y así sucesivamente. El valor promedio representa el gap filtrado. En la Figura 5.5 se muestra una representación de este proceso iterativo.

5.4 Caracterización del flujo

Para implementar el control difuso del flujo, es necesario identificar los rangos de mínimo, óptimo y alto. Para lograrlo, se polarizó la bomba de agua utilizando una fuente de alimentación, variando el voltaje entre 4 V y 12 V. El valor inicial de 4 V corresponde al voltaje mínimo necesario para que la bomba funcione, mientras que los 12 V representan el límite máximo que soporta la bomba. Esta configuración permitió establecer los límites operativos del sistema para un control preciso del flujo. De este modo, también se identifica la relación entre el flujo y el voltaje aplicado.

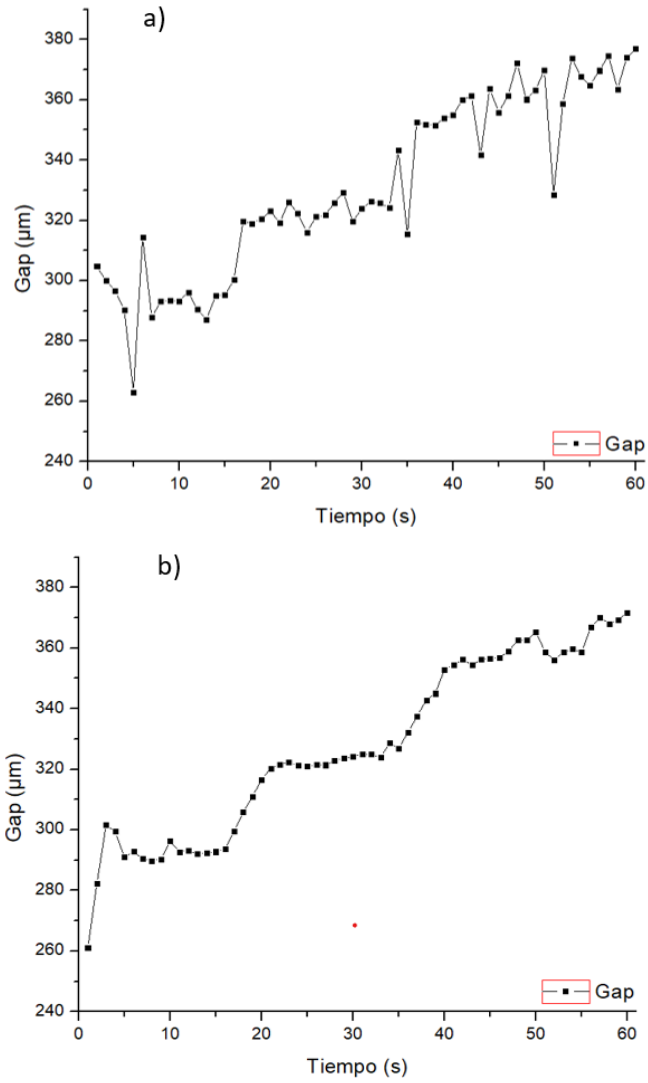


Figura 5.4. Comparación entre los datos de estimación del gap sin aplicar filtro (a) y aquellos procesados con un filtro de media móvil (b).

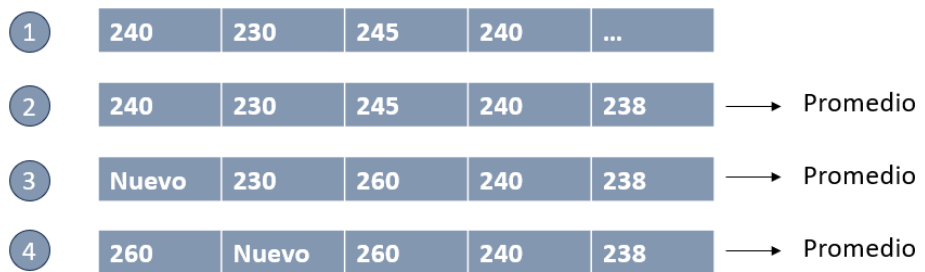


Figura 5.5. Representación gráfica del algoritmo para el filtro de media móvil.

En la Figura 5.6, se muestran los resultados de la experimentación. Se seleccionó el rango de 4 a 6 volts para categorizar el flujo en niveles bajo (40 ml/min con 4 V) , medio (60 ml/min con 5 V) y alto (80 ml/min), ya que en este intervalo de voltaje es donde el flujo varía de manera más significativo.

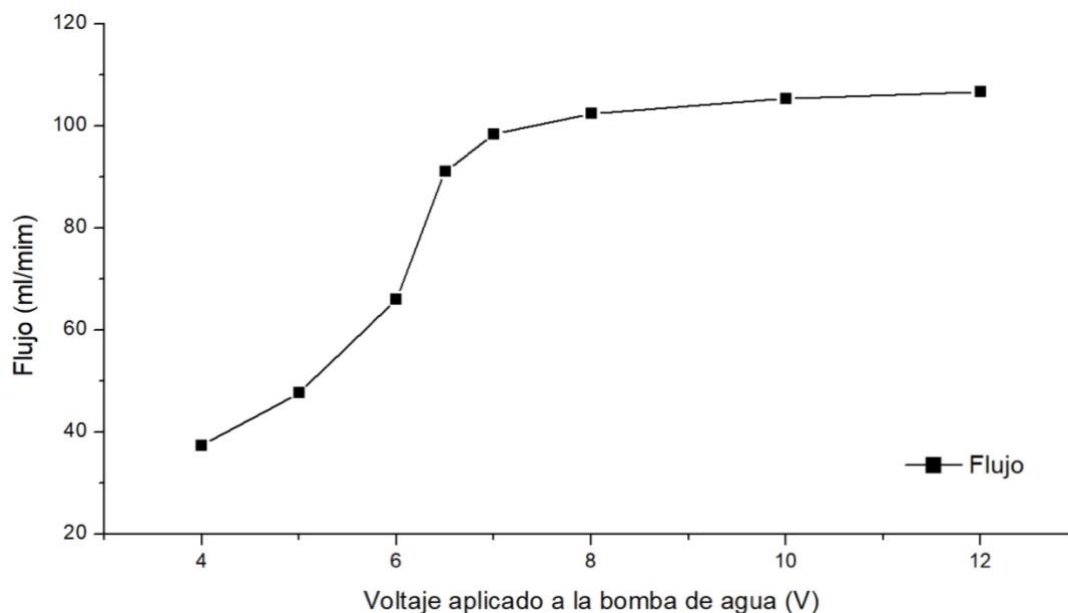


Figura 5.6. Gráfica del flujo del electrolito con relación al voltaje

En el proceso de control y regulación del flujo de una bomba hidráulica, es esencial comprender la relación entre el voltaje suministrado y la señal de modulación por ancho de pulso, la cual permite ajustar el voltaje aplicado al motor de la bomba, modificando su velocidad y, consecuentemente, regulando el volumen de fluido desplazado. Esta caracterización es necesaria para establecer una correlación precisa entre la señal de control y la respuesta dinámica de la bomba.

Para determinar cómo se comporta el caudal del agua al variar la intensidad de la bomba y definir los rangos de PWM correspondientes a niveles bajo, medio y alto, se llevó a cabo una caracterización. Para ello, se midió el voltaje suministrado a la bomba en función de diferentes valores de PWM generados por el microcontrolador. Se realizaron diversos experimentos, variando el nivel de PWM desde 0 hasta 255 en incrementos de 10. En cada nivel de PWM, se registraron mediciones de voltaje y flujo del electrolito,

como se observa en la Figura 5.7. Los resultados revelan un comportamiento proporcional del flujo en el sistema, con intervalos que van de 0 a 148.8 ml/min.

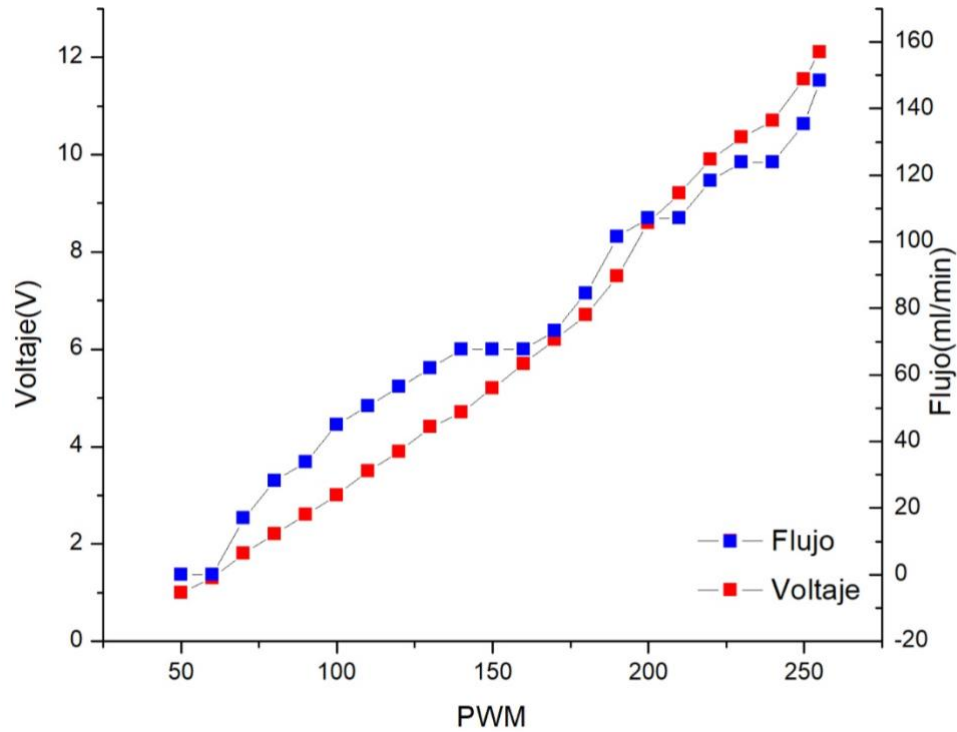


Figura 5.7. Gráfica de comparación entre el PWM, Voltaje y flujo del electrolito.

5.5 Resultados del control del flujo

Para explorar la relación entre el flujo del electrolito y el acabado obtenido en perforaciones mediante el proceso de maquinado electroquímico, se diseñó un experimento donde no se contempló el control del flujo, donde se las variables involucradas se configuraron de la siguiente manera:

- Flujo del electrolito (ml/min): 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

La metodología consistió en evaluar cada nivel de flujo junto con todas las combinaciones posibles de voltaje de polarización y frecuencia de la señal, utilizando una

onda cuadrada con un ciclo de trabajo del 50%. Esto generó un total de 27 pruebas experimentales, con 3 réplicas para cada combinación.

Durante cada experimento, con una duración de 2 minutos, se registró tanto el comportamiento de la corriente que atravesaba la celda electrolítica como el voltaje de polarización, con el objetivo de analizar y caracterizar el desempeño del sistema.

Los resultados de la experimentación, documentados en la Tabla 3, confirman que el flujo del electrolito tiene un impacto significativo en el sobre corte y el diámetro de los barrenos, pero no en su profundidad. Para validar estas observaciones, se empleó la prueba *t* de Student, adecuada debido al tamaño reducido de la muestra (menos de 30 elementos).

En estadística, el valor *p* (*p-value*) indica la probabilidad de que los resultados observados se deban al azar si la hipótesis nula fuera verdadera. Cuanto menor sea este valor, mayor es la evidencia para rechazar la hipótesis nula. Donde se establece un umbral de significancia de $p = 0.05$: valores por debajo de este punto indican resultados estadísticamente significativos, mientras que valores por encima sugieren que no hay evidencia suficiente para descartar la hipótesis nula.

Al comparar los diámetros entre el grupo con flujo bajo (37.3 ml/min) y el grupo con flujo medio (66.1 ml/min), se obtuvo un valor de significancia de $p=4.566 \times 10^{-06}$, considerablemente menor que el nivel de significancia convencional de $p=0.05$. Este resultado proporciona evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula y concluir que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de estos dos grupos. Por otro lado, al comparar el grupo con flujo medio y el grupo con flujo alto (102.4 ml/min), se obtuvo un valor de $p=0.0594$, lo que sugiere una diferencia marginalmente significativa entre las medias.

Adicionalmente, los resultados revelan que, a una frecuencia baja de 1 kHz, los barrenos presentan una definición notablemente mejor, como se ilustra en la Figura 5.18(a) de la sección 5.7. En contraste, aquellos evaluados a una frecuencia mayor de 100 kHz muestran una definición menos precisa, como se observa en la Figura 5.18 (c) de la sección 5.7. Por su parte, los barrenos obtenidos a una frecuencia intermedia de 50 kHz, mostrados en la Figura 5.18(b) de la sección 5.7, presentan características que equilibran la definición y la calidad del acabado.

Tabla 3. Datos obtenidos en la experimentación del flujo del electrolito sin el control activo (lazo abierto).

No	Flujo (ml/m)	Voltaje de P(V)	Frecuencia kHz	Profundidad (μm)	Error. Profundidad (μm)	Diámetro (μm)	Error. Diámetro (μm)	Sobre Corte (%)	Error. 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		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	66.1	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	102.4	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

Este mismo patrón se observa en el caso del sobre corte. Al comparar el grupo con flujo bajo (37.3 ml/min) y el grupo con flujo medio (66.1 ml/min), el análisis presenta un valor de significancia de $p=5.717 \times 10^{-06}$, claramente inferior al nivel de significancia de $p=0.0594$. Esto confirma que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de ambos grupos. En contraste, la comparación entre el grupo con flujo medio y el grupo con flujo alto (102.4 ml/min) resultó en un valor de $p=0.05472$, indicando una diferencia marginalmente significativa en este caso.

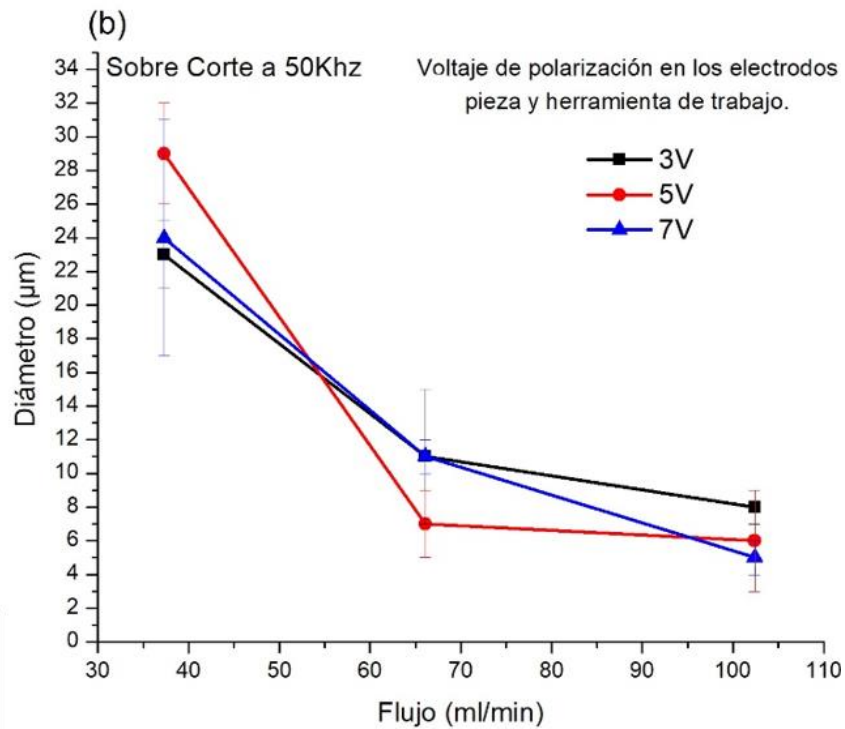
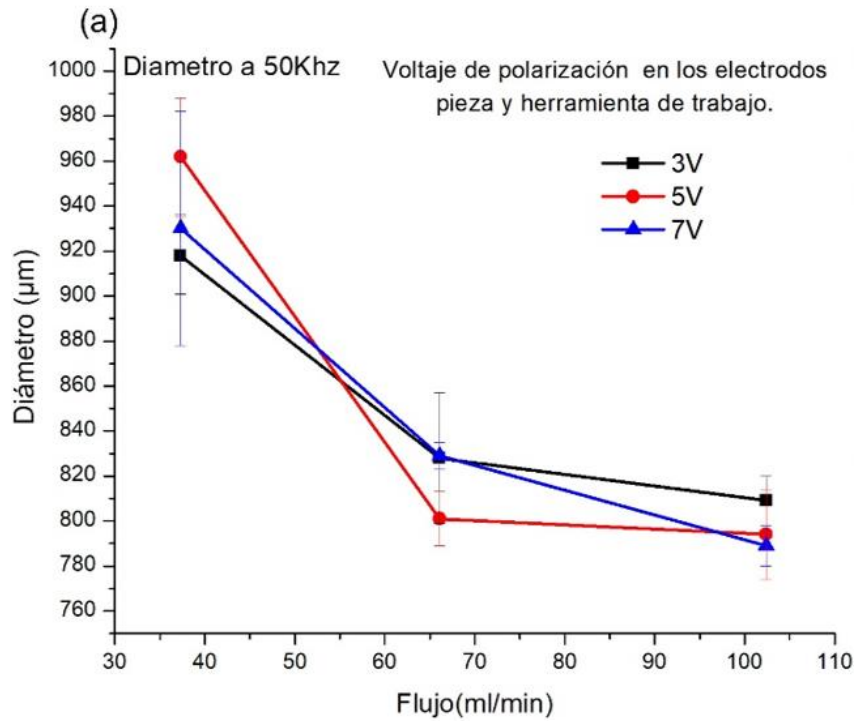


Figura 5.8. Comportamiento del diámetro (a) y sobre corte (b) a 50 kHz con respecto al flujo para diferentes valores de voltaje de polarización.

En cuanto a las pruebas experimentales con el control de flujo activado, se estableció un valor de referencia de 60 ml/min, situado en el rango medio del flujo máximo del sistema. Durante el experimento, se registró un sobre impulso del 15.19 %, indicando que el sistema excedió temporalmente el valor de referencia en un 15.19 % antes de alcanzar la estabilización. El tiempo necesario para que el sistema lograra la estabilidad fue de 31.6 segundos, como se observa en la Figura 5.9.

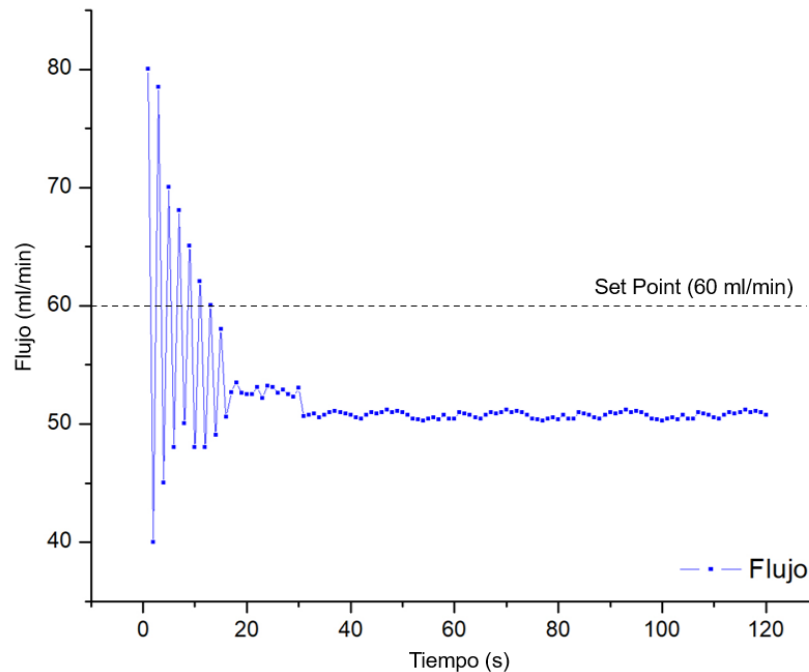


Figura 5.9. Gráfica de control de flujo

El controlador difuso fue evaluado bajo condiciones de perturbación, incluyendo la obstrucción parcial de la herramienta de trabajo para restringir deliberadamente el flujo de electrolito. En este contexto, el controlador mostró su eficacia al estabilizar el flujo dentro de un intervalo de flujo medio (50 a 68 ml/min), como se ilustra en Figura 5.10, lo cual es especialmente beneficioso en aplicaciones de maquinado electroquímico.

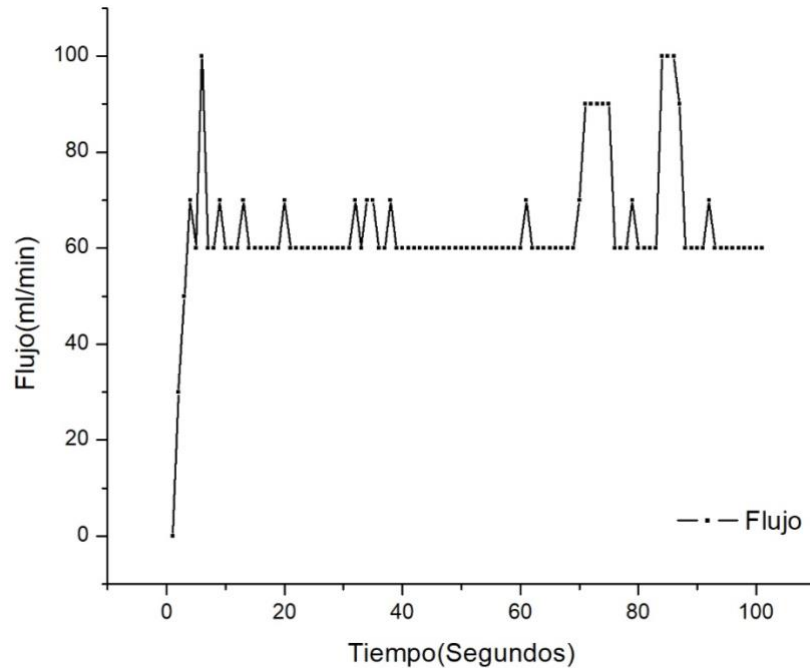


Figura 5.10. Gráfica que muestra la respuesta del control del flujo ante perturbaciones

5.6 Resultados del control del gap y flujo

Para corroborar el desempeño óptimo del gap, se implementaron diversas pruebas experimentales en las que se sometió el sistema a un maquinado continuo durante un periodo controlado. Estas pruebas permitieron analizar el comportamiento dinámico de la herramienta de trabajo, evidenciando que el promedio del gap se estabilizó en 260.80 micrómetros, con una desviación de 20.80 micrómetros, lo que representa un 8.67 % de error respecto al valor de referencia (*set-point*). En la Figura 5.11, se ilustra el comportamiento del gap a lo largo de los 240 segundos de maquinado.

Es importante destacar que la experimentación descrita en este apartado se llevó a cabo integrando el control del gap y del flujo, ambos ejecutándose en un mismo núcleo. La distribución y asignación de estas tareas se detalla ampliamente en la sección 4.8.

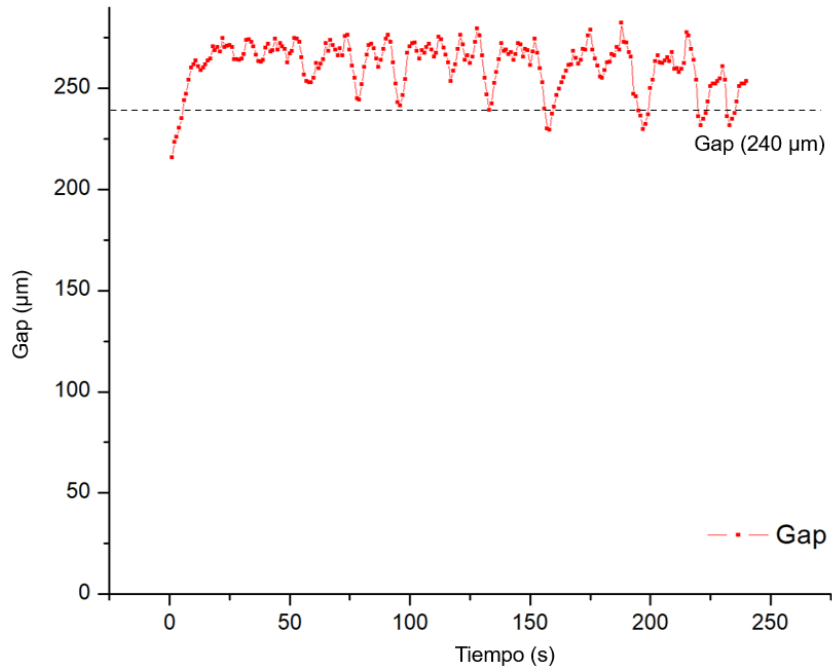


Figura 5.11. Gráfica de los datos del gap

Otro indicador del correcto funcionamiento del control del gap es el monitoreo de la posición del electrodo, permitiendo verificar su descenso continuo. En la Figura 5.11 , se observa que el gap se mantiene estable, mientras que en la Figura 5.12 (a), se evidencia el descenso de la herramienta. Este comportamiento indica que el material está siendo removido adecuadamente, y que el sistema de control ajusta los pasos necesarios para desplazar la herramienta, manteniendo constante la separación entre los electrodos.

Como era esperado, si la herramienta desciende en exceso, el sistema de control responde elevándola hasta la posición adecuada. Este ajuste dinámico puede observarse en la Figura 5.12 (b), donde se evidencia que la herramienta retrocede y asciende en momentos específicos. Este comportamiento no consecutivo indica que el control se está ejerciendo de manera efectiva, ajustando constantemente la posición para mantener el gap cercano a 240 micrómetros.

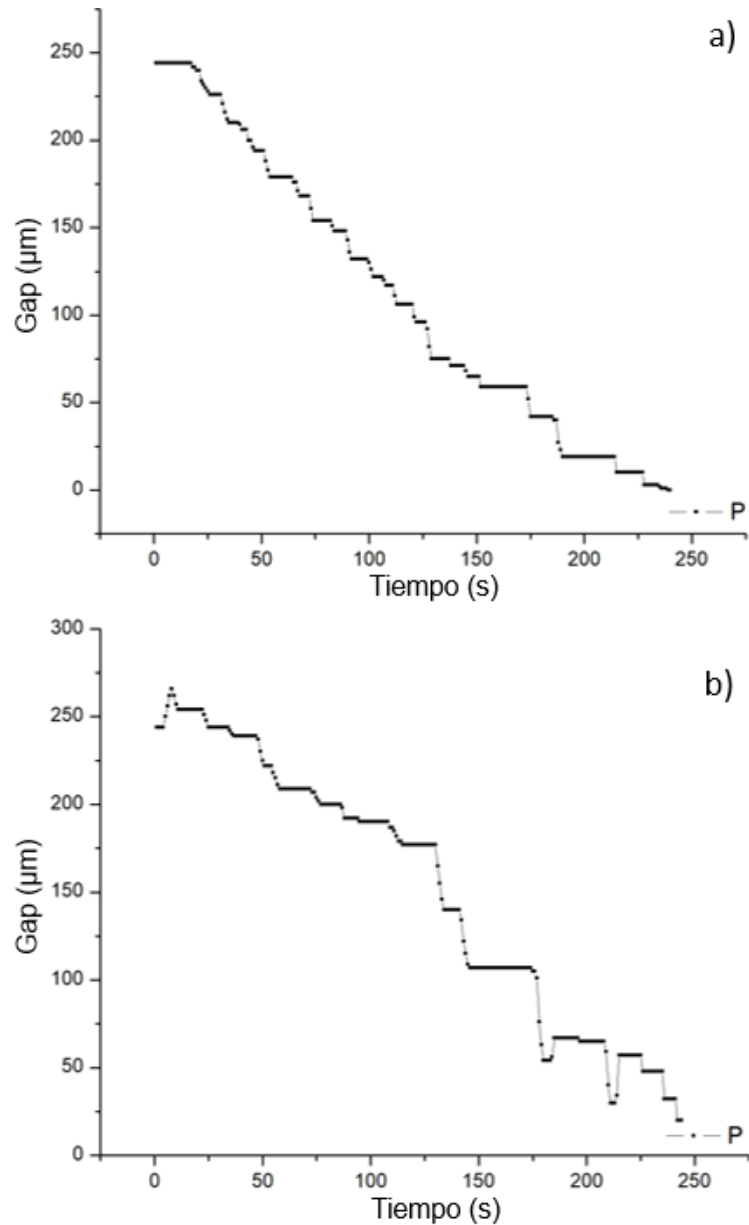


Figura 5.12. Comportamiento del desplazamiento de la herramienta de trabajo durante el maquinado, a) muestra un descenso sin ajuste y b) muestra un comportamiento donde existen ajustes en la posición.

La corriente se ve influenciada por la posición relativa de los electrodos. Cuando los electrodos están próximos, la corriente tiende a incrementarse; en cambio, cuando están más alejados, la corriente disminuye. En la Figura 5.13, se evidencia cómo, al mantener el electrodo en una posición fija, la corriente disminuye progresivamente mientras el *gap* se incrementa ver Figura 5.14. Este fenómeno ocurre porque el material

removido durante el proceso genera un espacio de separación cada vez mayor entre los electrodos, reduciendo la densidad de corriente.

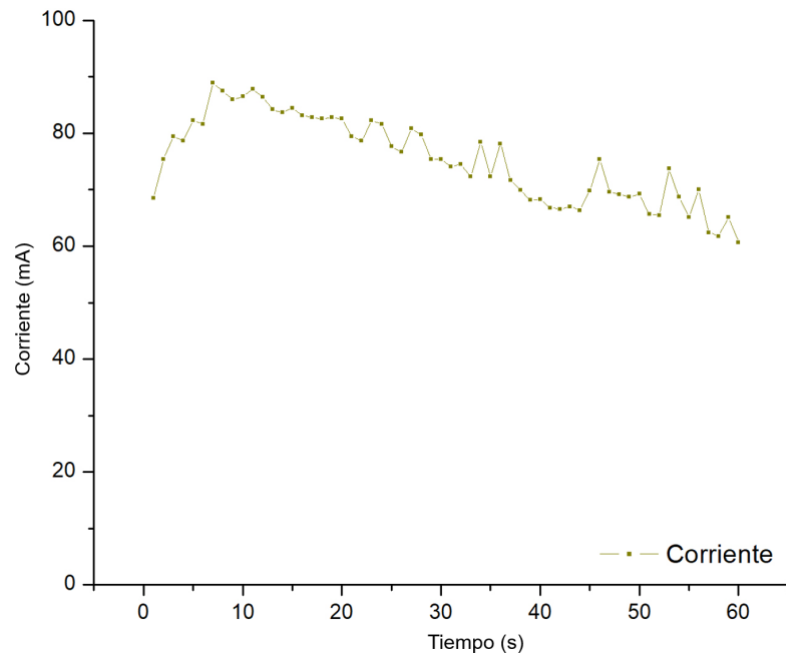


Figura 5.13. Comportamiento de la corriente cuando la pieza de trabajo permanece inmóvil durante el maquinado en un lapso de 60 segundos.

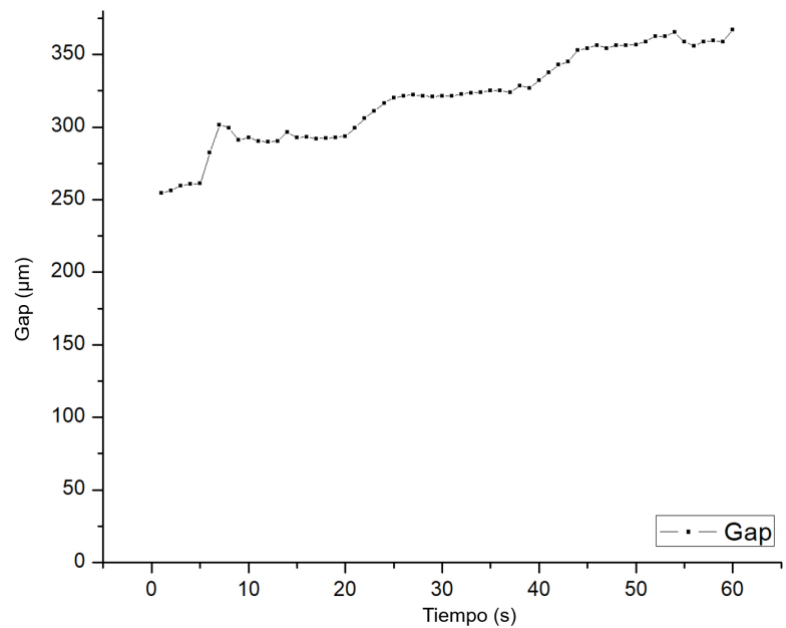


Figura 5.14. Comportamiento del gap durante el maquinado cuando la pieza de trabajo permanece inmóvil en lapso de 60 segundos.

Por otro lado, en la Figura 5.15, se observa que la corriente permanece estable sin tendencia a disminuir. Esto indica que el sistema ajusta la posición de la herramienta para mantener constante el *gap*, en este caso, en un valor cercano a los 240 micrómetros. Este control asegura una operación más eficiente y uniforme durante el proceso.

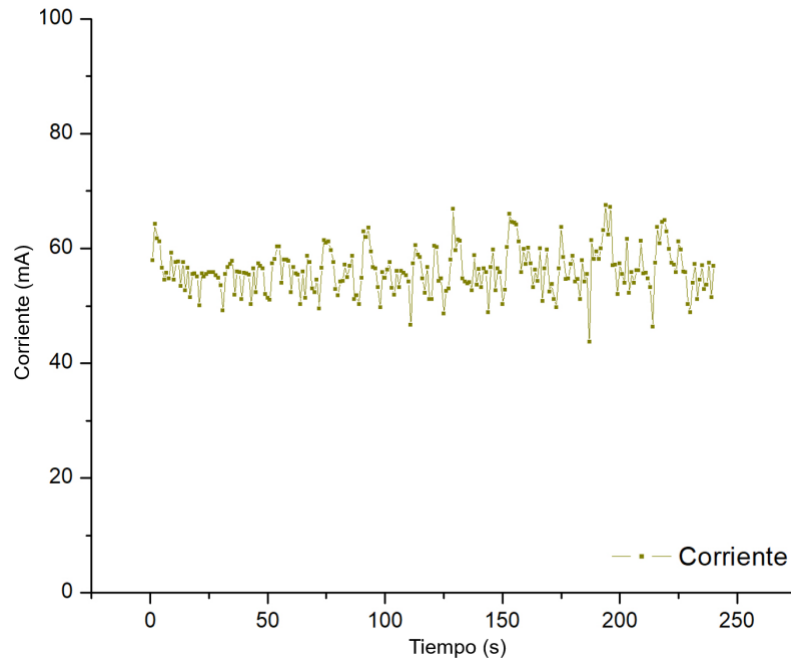


Figura 5.15. Comportamiento de la corriente con el control del gap y flujo activos en el maquinado en un lapso de 250 segundos.

En las experimentaciones de maquinado con ambos controles activos, el flujo mostró un comportamiento consistente, manteniéndose en un promedio de 53.40 ml/min. El valor de referencia (Set Point) se estableció en 60 ml/min, lo que resulta en una diferencia de 7.60 ml/min. Esta diferencia representa un error, que en términos porcentuales equivale a aproximadamente 12.67%. Esto se puede observar en la Figura 5.16.

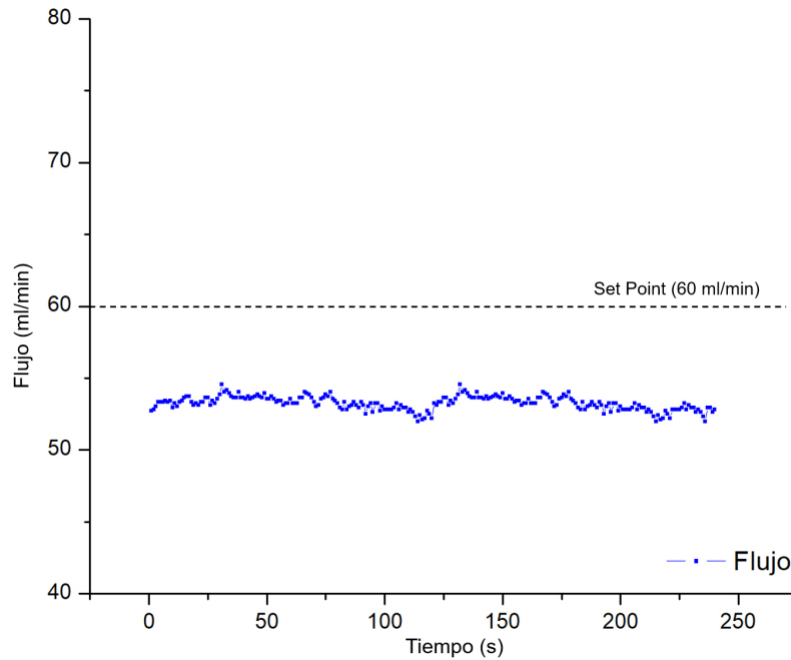


Figura 5.16. Comportamiento del flujo del electrolito con el control del gap y flujo activos en el maquinado en un lapso de 250 segundos.

5.7 Pruebas en el maquinado de acero

Los resultados de los barrenos obtenidos durante la experimentación se encuentran detallados en la Tabla 4. Esta tabla presenta los datos de cuatro experimentos, cada uno realizado con tres repeticiones, en los que el tiempo de maquinado se estableció en 60, 120, 180 y 240 segundos. Durante estos ensayos, se registraron parámetros clave, incluyendo la posición real del electrodo, la profundidad alcanzada, el diámetro de los barrenos, el sobre corte generado y la velocidad de remoción de material, proporcionando una visión integral del desempeño del proceso bajo diferentes condiciones temporales.

La tabla incluye una columna en la que se indica la letra que identifica cada barreno, la cual corresponde a la figura donde se visualiza cada uno (ver Figura 5.11) Se observa que el promedio del sobre corte es de 28.40%. La profundidad varía en función del tiempo, dado que la herramienta va descendiendo progresivamente. En promedio, la herramienta alcanza casi la frontera entre la pieza y el electrodo, manteniendo una separación de 10 micrómetros a los 240 segundos, con un gap promedio de 244.69

micrómetros. Este valor indica un error de 4.69 micrómetros, lo que representa un 1.95% de desviación respecto al valor de referencia.

Tabla 4. Valores monitoreados en el proceso de maquinado electroquímico con ambos controles activados.

Tiempo (s)	Posición real (μm)	Profundidad (μm)	Diámetro (μm)	Sobre corte (μm)	Sobre corte (%)	Velocidad de Remoción (mm ³ /s)	Figura
60	179	150	892	151	20.38	0.00156	a
	174	160	881	140	18.86	0.00162	b
	170	160	901	160	21.56	0.00170	c
120	126	230	994	253	34.11	0.00149	d
	130	220	970	229	30.90	0.00135	e
	127	230	976	235	31.71	0.00143	f
180	81	270	1099	358	48	0.00142	g
	85	260	1049	308	42	0.00125	h
	82	270	1053	312	42	0.00131	i
240	20	340	867.25	126.25	17.04	0.00084	j
	0	380	876.25	135.25	18.25	0.00095	k
	10	360	860	119	16.06	0.00087	l

En comparación con el maquinado sin control del gap, pero solo con control de flujo, se observa en la Figura 5.18 que los barrenos son menos definidos. Sin embargo, el sobre corte es menor, alcanzando un 15.29%, con una profundidad de 130.37 micrómetros. Dichos resultados obtenidos son de la experimentación inicial, sin control de gap. La reducción en el sobre corte se debe a que la herramienta permanece estática durante el proceso. El maquinado se realizó durante 60 segundos.

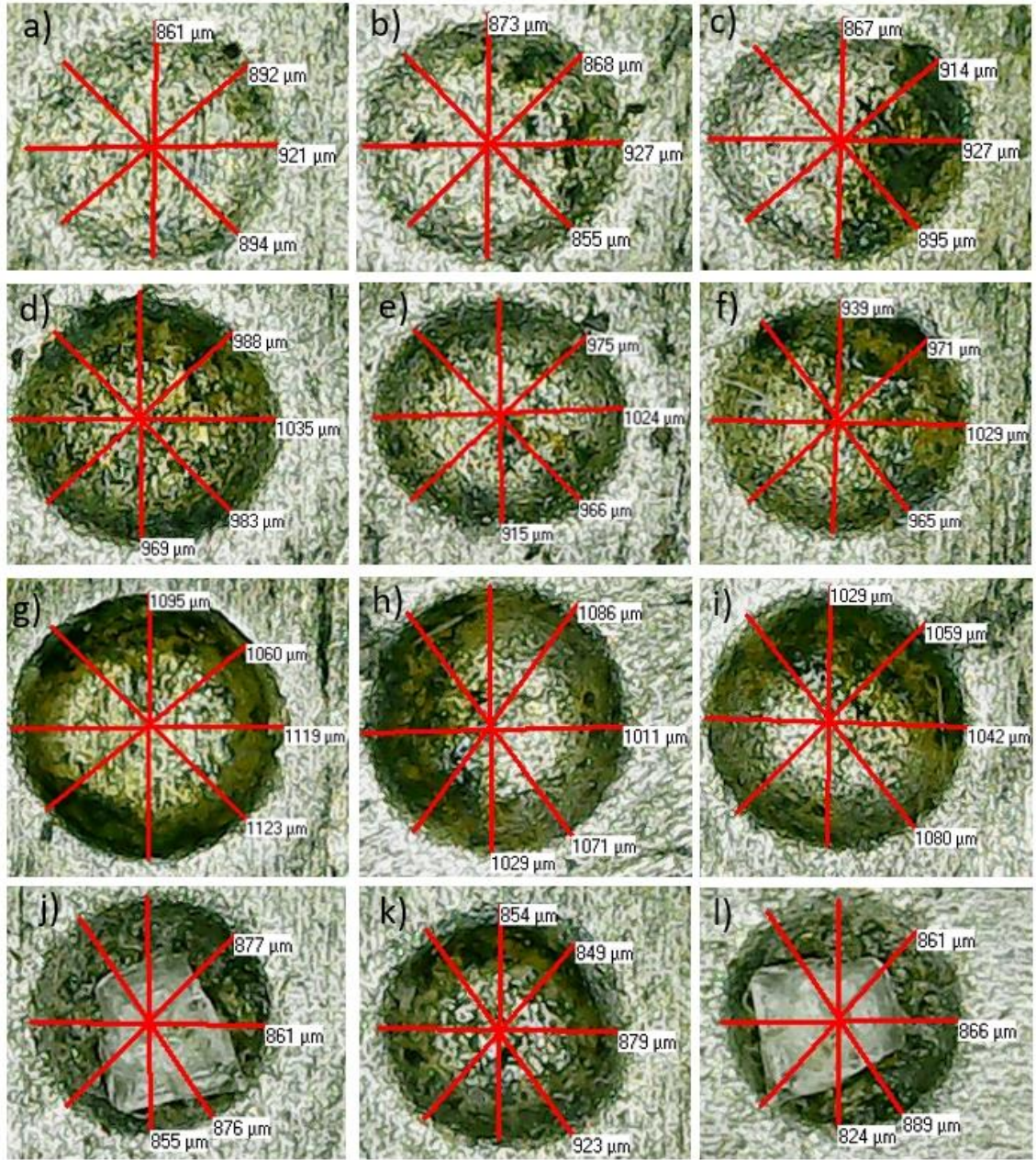


Figura 5.17. Barrenos realizados con los controles difusos, gap y flujo.

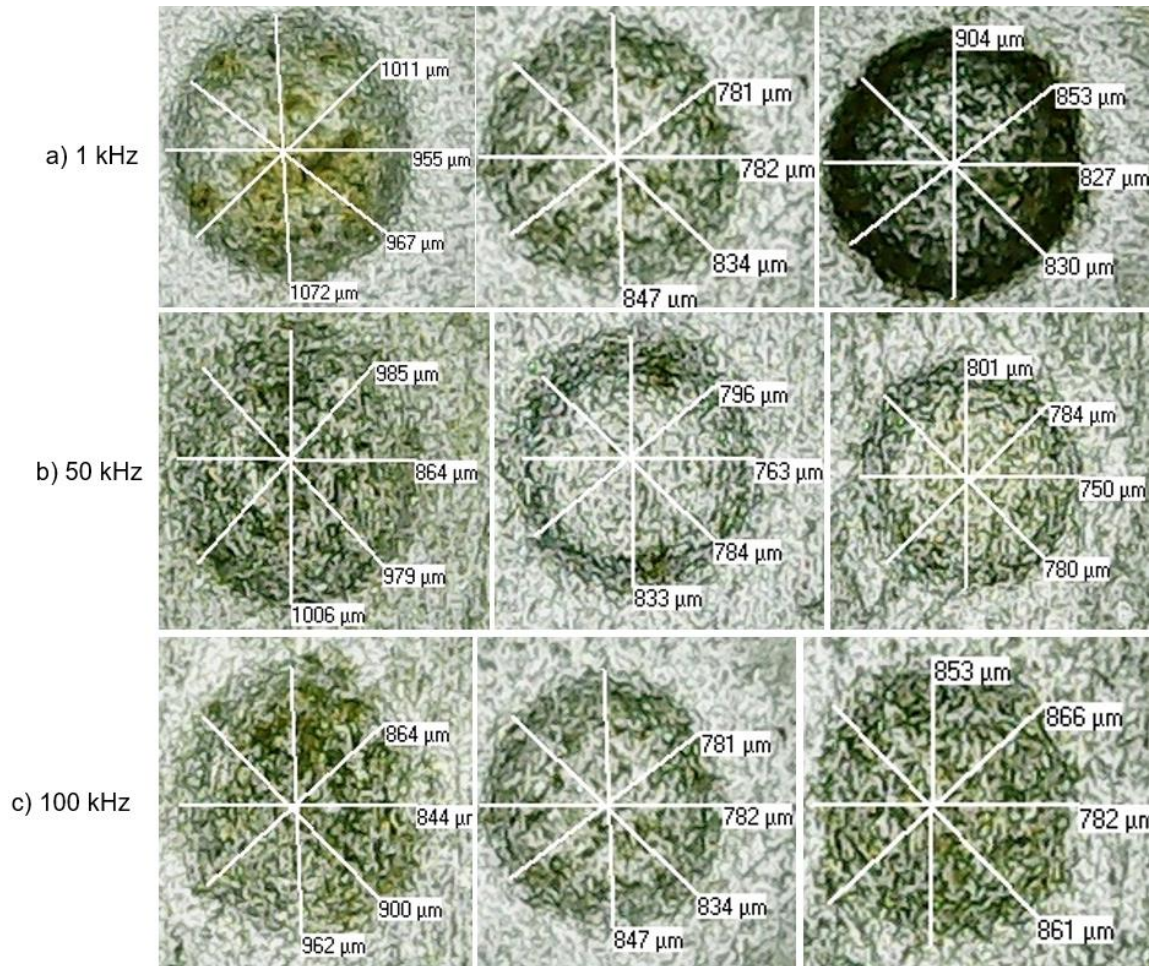


Figura 5.18. Barrenos realizados en la caracterización del flujo sin control.

5.8 Comparación de resultados con trabajos previos

En relación con el error en el gap o distancia inter-electrodos, los resultados obtenidos en este trabajo demuestran un control notablemente superior al reportado por otros autores, en el maquinado de barrenos. Mientras que en este estudio el promedio del gap se estabilizó en $260.80 \mu\text{m}$, con una desviación de $20.80 \mu\text{m}$ y un error del 8.67% respecto al valor de referencia de $240 \mu\text{m}$, los trabajos de (Nopalera, 2021) evidenciaron mayores desviaciones. Específicamente, el sistema MIMO alcanzó un error promedio del 39% , mientras que el sistema SISO presentó un error considerablemente más elevado, del 62% . Por su parte, (Catarino, Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico, 2017) reportó variaciones significativas en pruebas poligonales, donde la distancia inter-electrodos

alcanzó los 480 μm , atribuidas principalmente a limitaciones del sistema. En contraste, los resultados de (Gallegos Miranda, 2019) mostraron un rango de variación en el gap entre 120 y 240 μm , dependiendo de las condiciones iniciales. Este nivel de control en el presente trabajo destaca como altamente eficiente y preciso, reafirmando la robustez del sistema implementado.

En cuanto al sobre corte, este trabajo revela un rango que varía con el tiempo, mostrando valores entre 140 μm y 160 μm a los 60 segundos, hasta 119 μm y 135 μm a los 240 segundos, con porcentajes que oscilan entre el 16.06% y el 48% dependiendo del intervalo de tiempo. Comparativamente, los resultados de (Nopalera Angeles, Algoritmo de control difuso para el ajuste de polarización de un proceso de maquinado electroquímico pulsado, 2021) indican que el sistema MIMO alcanzó porcentajes de sobre corte promedio de 36% en maquinados lineales y 35% en pruebas poligonales, mientras que el sistema SISO reportó valores significativamente mayores, de hasta 83% en maquinados poligonales. Los datos de (Catarino, Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico, 2017) mostraron un sobre corte promedio de 39% en maquinados lineales y variaciones entre 34.6% y 39.4% en pruebas poligonales. Por otro lado, (Gallegos Miranda, 2019) encontró sobre cortes más elevados, de 630 μm a 40 kHz y 820 μm a 10 kHz, aunque atribuyó una reducción del 47% al empleo de PECMM en lugar de ECM. Estos resultados consolidan el desempeño de este trabajo al registrar valores más consistentes y contenidos en comparación con los reportados, aunque evidentemente no se han realizado maquinados lineales o poligonales con el sistema de esta investigación.

Respecto a la velocidad de remoción, los valores obtenidos en este trabajo se caracterizan por un comportamiento decreciente con el tiempo, oscilando entre 0.00156 mm^3/s a 60 segundos y 0.00084 mm^3/s a 240 segundos. Comparativamente, los resultados de (Nopalera, 2021) presentan velocidades promedio de 0.05 mm^3/s , con dispersión entre 0.004 y 0.007 mm^3/s a frecuencias de 60 kHz y 100 kHz, mientras que (Gallegos Miranda, 2019) destacó velocidades más altas, de $3.67 \times 10^{-2} \text{mm}^3/\text{As}$, con los valores óptimos observados en frecuencias de 40 kHz y 60 kHz. Aunque los valores de este trabajo son más bajos en magnitud, reflejan un control progresivo y una remoción estable, lo que podría interpretarse como una ventaja en términos de precisión del material removido.

En términos de profundidad, los resultados de este estudio indican un incremento progresivo, alcanzando profundidades de 150 μm a 60 segundos y hasta 380 μm a 240 segundos. Estos valores son consistentes con los reportados por (Gallegos Miranda, 2019), quien logró profundidades máximas de 800 μm bajo condiciones controladas, y por (Catarino, Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico, 2017), quien observó profundidades promedio de 0.93 mm en pruebas lineales y 1.23 mm en pruebas poligonales. Por su parte, los datos de (Nopalera Angeles, Algoritmo de control difuso para el ajuste de polarización de un proceso de maquinado electroquímico pulsado, 2021) validaron profundidades de 300 μm en acero AISI 1018. Si bien los resultados de este trabajo no alcanzan profundidades máximas tan altas, demuestran una consistencia progresiva y controlada en función del tiempo.

Finalmente, respecto al tiempo de maquinado, este estudio registró intervalos específicos de 60, 120, 180, y 240 segundos, evidenciando un desempeño estable y controlado en cada etapa. En comparación, los resultados de (Nopalera Angeles, Algoritmo de control difuso para el ajuste de polarización de un proceso de maquinado electroquímico pulsado, 2021) y (Catarino, Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico, 2017) reflejaron tiempos más prolongados, alcanzando hasta 25 minutos y 13 minutos, respectivamente, para lograr profundidades superiores a 1 mm. Este contraste pone de manifiesto una mayor eficiencia temporal en este trabajo, destacando su capacidad para lograr resultados precisos en tiempos más reducidos.

Los resultados de este estudio sobresalen en términos de precisión y consistencia en el control de las métricas evaluadas, destacándose particularmente en el error en el gap y en la contención del sobre corte, mientras que mantienen un desempeño competitivo en velocidad de remoción y profundidades alcanzadas, con una eficiencia temporal superior a la reportada por otros autores.

CONCLUSIONES

Este trabajo se centra en diseñar, implementar y validar un sistema de control difuso aplicado al maquinado electroquímico, con el objetivo de regular dos parámetros esenciales del proceso: el flujo del electrolito y la distancia inter-electrodos (*gap*). Este sistema se construye sobre una arquitectura modular compuesta por subsistemas interconectados, todos gestionados por un microcontrolador ESP32, lo que permite una operación eficiente y sincronizada.

El subsistema de recirculación del electrolito incluye el bombeo y filtrado, controlado mediante un módulo L298N, ajustando el flujo del electrolito a través de modulación por ancho de pulso (PWM). Para garantizar la precisión del control, se utiliza un caudalímetro con adaptadores de nivel TTL a CMOS, lo que permite medir y regular el flujo dentro del rango operativo establecido, logrando un comportamiento estable y repetible.

El subsistema de desplazamiento mecánico ajusta el movimiento de la herramienta en el eje Z mediante un motor paso a paso NEMA 17 y un controlador TB6560. Este subsistema, con una resolución de 1/8 de paso, logra una precisión de 0.3968 μm por pulso. La caracterización de este movimiento incluye estrategias para encontrar la mínima histéresis mecánica.

Por otro lado, el subsistema de monitoreo registra parámetros clave del sistema, como la corriente de maquinado y el voltaje de polarización, utilizando circuitos amplificadores y convertidores RMS a CD. Estas señales son las entradas de los controladores difusos, permitiendo una medición indirecta, pero efectiva, para el control del *gap*.

El control difuso del flujo se basa en las variables de error y derivada del flujo, mientras que la salida, generada como una señal PWM, ajusta de forma dinámica el flujo del electrolito para mantenerlo cercano al valor de referencia. Los resultados experimentales demuestran la capacidad del sistema para estabilizar el flujo, incluso frente a perturbaciones externas, lo que garantiza un aporte constante de electrolito durante el proceso. En cuanto al control del *gap*, se emplearon las variables de error y el error en el

gap, con un enfoque difuso que permitió mantener el promedio del *gap* en 260.80 micrómetros, con una desviación de 20.80 micrómetros con respecto al valor establecido como referencia en 240 micrómetros, lo que representa un 8.67% de error respecto a dicho valor. Esto mejora la precisión del maquinado y minimiza el sobre corte.

El sistema desarrollado, validado experimentalmente en diversas condiciones de operación, permite identificar el flujo influye significativamente en el diámetro y el sobre corte de los barrenos, pero no en su profundidad. Se observa que a frecuencias bajas, como 1 kHz, los barrenos presentan una mejor definición en comparación con frecuencias más altas. Estas observaciones se validan mediante análisis estadísticos que confirman diferencias significativas entre los grupos de flujo bajo y medio, mientras que las diferencias entre los flujos medio y alto son marginalmente significativas. En conjunto, el sistema diseñado logra una integración robusta de sus subsistemas, destacándose por su capacidad para mantener el proceso dentro de parámetros adecuados para el maquinado de barrenos.

REFERENCIAS

- Camacho, O., Iglesias, E., Herrera, M., & Aboukheir, H. (2021). Fuzzy logic-based control: From fundamentals to applications. *Revista Digital Novasinerzia*, 4(2), 2631-2654.
- Chang, W., Wang, S., Tang, H., Dong, B., Yang, Q., Chen, J., & Chen, S. (2022). Development of a micro-electrochemical machining nanosecond pulse power supply. *The Review of scientific instruments*, 93(2), 8.
- Catarino, A. O. (2017). *Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico*. Atlacomulco, México: Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Catarino, A. O., Granda, G. E., & Pérez, M. J. (2024). Diseño y desarrollo de estación compacta de micro-maquinado electroquímico pulsado bipolar. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 34-41.
- Lee, D., Kim, J.-S., & Hong, S. (2024). Dual-Core-Based Microcontrollers Inference Design and Performance Analysis. *IEEE*, 12(6), 120326 - 120336.
- Leyva Bravo, J. (2018). *Modelado del proceso de maquinado ECDM mediante lógica difusa*. Saltillo, Coahuila, México: Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología en Manufactura Avanzada, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales.
- Cintula, P., Horcík, R., & Noguera, C. (2015). The Quest for the Basic Fuzzy Logic. In F. Montagna (Ed.), *Petr Hájek on Mathematical Fuzzy Logic. Outstanding Contributions to Logic* (pp. 245 - 290). Cham: Springer .
- Liua, G., Zhang, Y., & Natsu, W. (2019). Influence of electrolyte flow mode on characteristics of electrochemical machining with electrolyte suction tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1(142), 66-75.
- Cook, N. H., Loutrel, S. P., & Meslink, M. C. (1967). *Increasing Electrochemical Machining Rates*. Cambridge: Instituto Tecnológico de Massachusetts.

- Lower, S. (2018). *Chem 1 virtual textbook: a reference text for General Chemistry*. Retrieved 08 2024, from <http://www.chem1.com/acad/webtext/elchem/>
- Lu, Y., Rajora, M., Zou, P., & Liang, S. (2017). Physics-Embedded Machine Learning: Case Study with Electrochemical Micro-Machining . *Machines*, 5(4).
- Arslan, I., Misha, U. K., Syeda, Z., & Kanwal, H. (2021). A Review of System on Chip (SOC) Applications in Internet of Things (IOT) and Medical. *International Conference on Advances in Mechanical Engineering*(21), SP.
- Barcia, O., Mattos, O., Pébère, N., & Tribollet, B. (1996). Anodic dissolution of metals under mass transport control. *Electrochimica Acta*, 41, 1385-1391. doi:10.1016/0013-4686(95)00460-2
- Bhattacharyya, B., Doloi, B., & Sridhar, P. (2001). Electrochemical micro-machining: new possibilities for micro-manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 113, 301 - 305.
- Bhattacharyya, B., Mitra, S., & Boro, A. (2002). Electrochemical machining: new possibilities for micromachining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 283-289.
- De Jesús, G. I., Granda, G. E., García, M. J., & Vázquez, R. R. (2023). Influencia del flujo del electrolito en orificios micrométricos realizados con maquinado electroquímico. *Revista Aristas, Ciencias Básicas y Aplicada* , 254 - 259.
- Department of Education Open Textbook Pilot Project. (2020). *LibreTexts: Electrochemistry*. Retrieved 08 05, 2024, from <https://chem.libretexts.org>
- Espressif Systems. (2024, Febrero). *ESP32 Series Datasheet*. Retrieved Febrero 20, 2024, from https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- Fang, X. L., Zou, X., Chen, M., & Zhu, D. (2017). Study on wire electrochemical machining assisted with large-amplitude vibrations of ribbed wire electrodes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 205-208.

- G. Bleris, L., Garcia, J., V. Kothare, M., & Arnold, M. (2006). Towards embedded model predictive control for System-on-a-Chip applications. *Journal of Process Control*, 16(3), 255-264.
- Galán, R., Jiménez, A., Sanz, R., & Matía, F. (2000). Control Inteligente. *Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 4(10), 43-48.
- Gallegos Miranda, I. (2019). *Sistema computacional para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico por pulsos*. Atlacomulco, México: Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación, Universidad Autónoma del Estado de México.
- García, P. A. (2019). *Sistemas Embebidos de Tiempo Real con aplicaciones en Bioingeniería*. Buenos Aires, Argentina: Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de la Plata.
- Gomelya, M., Kryzhanovska, Y., Shabliy, T., & Levytska, O. (2020). Utilization of Sodium Chloride Solutions to Obtain Ferrous Chlorides. *Journal of Ecological Engineering*, 21(8), 177-184.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna* (Tercera ed.). México, México: McGraw-Hil.
- Gupta, K., & Gupta, M. (2018). Developments in nonconventional machining for sustainable production: A state-of-the-art review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233, 4213 - 4232. doi:10.1177/0954406218811982
- Hadson Technology. (2008). *L298N Dual H-Bridge Motor Driver*. Retrieved Octubre 16, 2024, from <https://www.handsontec.com/dataspecs/L298N%20Motor%20Driver.pdf>
- Heath, S. (2003). *Embedded systems design*. Boston: Newnes.
- Joy- it. (2024). *joy-it.net*. Retrieved Marzo 04, 2024, from https://joy-it.net/EMA17-06_Datasheet.pdf

- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2018). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (1 ed.). México: Prentice Hall.
- Kamal, R. (2008). *Embedded systems : architecture, programming and design*. New Delhi: McGraw-Hill.
- Karnik, N., & Mendel, J. (2001). Centroid of a type-2 fuzzy set. *Information Sciences*, 132(1-4), 195 - 220.
- Neto, J., Silva, E., & Silva, M. (2006). Intervening variables in electrochemical machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 179, 92-96.
- Nopalera Angeles, I. U. (2021). *Algoritmo de control difuso para el ajuste de polarización de un proceso de maquinado electroquímico pulsado*. Atlacomulco, México: Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Nopalera Angeles, I. U., Granda Gutiérrez, E. E., García Mejía, J. F., Pérez Martínez, J. A., & Flores Fuentes, A. A. (2020). Control difuso para la regulación de flujo de electrolito en un proceso no convencional de Micro-Manufactura. *Coloquio de Investigación Multidisciplinaria*, 8(1), 1086-1093.
- Nopalera, A. U. (2021). *Algoritmo de control difuso para el ajuste de polarización de un proceso de maquinado electroquímico pulsado*. Atlacomulco, México: Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Pączkowski, T., & Zdrojewski, J. (2017). Monitoring and control of the electrochemical machining process under the conditions of a vibrating tool electrode. *Journal of Materials Processing Technology*, 244, 204 - 214.
- Ponce, P. (2010). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería* (Primera edición ed.). México: Alfaomega.
- Prayogo, G., & Lusi, N. (2022). Optimasi parameter proses pemesinan ecm (electrochemical machining) skala laboratorium dengan metode taguchi-grey relational analysis (GRA). *AME (Aplikasi Mekanika dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 8(1), 1 - 8.

- Rajesh, K. M., Ashwin, M., Shekhal, H. T., Tanmay, M. R., & Vivek, P. (2010). Low Power Dual Core Microcontroller. *IEEE*, 1(1), 364 - 369.
- Sadegh, M. (2017). Controlling Electrochemical Machining By Using a Fuzzy Logic Approach. *Modern Processes in Manufacturing and Production*, 6 (2), 61-71.
- Saravi, S., & Panagiotopoulos, A. (2021). Individual Ion Activity Coefficients in Aqueous Electrolytes from Explicit-Water Molecular Dynamics Simulations. *The journal of physical chemistry. B.*, 125(30).
- Segundo, L. J. (2023). *Sintonización de un controlador difuso mediante un algoritmo genético aplicado en un proceso de maquinado electroquímico*. Atlacomulco, México: Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Skoczypiec, S., & Ruszaj, A. (2014). A sequential electrochemical-electrodischarge process for micropart manufacturing. *Precision Engineering* , 38(3), 680-690.
- Sohrabpoor, H., Khanghah, S., Shahraki, S., & Teimouri, R. (2015). Multi-objective optimization of electrochemical machining process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82, 1683 - 1692.
- Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Edl, M., Kuric, I., . . . Dašić, P. (2020). *Advanced Manufacturing Processes*. Odessa, Ukraine: Springer. doi:10.1007/978-3-030-40724-7.
- Trillas, E., & Eciolaza, L. (2015). *Fuzzy Logic: An Introductory Course for Engineering Students*. Cham, Germany: Springer.
- Velmex Inc. (2016). *velmex*. Retrieved Marzo 04, 2024, from <https://velmex.com>
- Xu, C., Fang, X., Han, Z., & Zhu, D. (2020). Wire Electrochemical Machining with Pulsating Radial Electrolyte Supply and Preparation of Its Tube Electrode with Micro-Holes. *Applied sciences*, 1-12.
- Zhao, R., Dong, H., Zhou, J., Li, R., Chen, C., & You, P. (2023). State of the Art in Power Supply of Electrical Discharge Machining, Electrochemical Machining and their Variants. *Journal of Physics: Conference Series*, 2433, 012011.

