



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO



“Sintonización de un controlador difuso mediante un algoritmo genético aplicado
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:

José Félix Segundo Lovera

Director de Tesis:

Dr. Everardo Efrén Granda Gutiérrez

Tutores adjuntos:

Dr. Juan Fernando García Mejía

Dr. José Arturo Pérez Martínez

Noviembre de 2023

PUBLICACIONES

Segundo-Lovera, J. F., Granda-Gutiérrez, E. E., García-Mejía, J. F., Pérez-Martínez, J. A., 2022. Polarización con distintas formas de onda para la reducción del sobre corte en un proceso de maquinado electroquímico. Número Especial de la Revista Aristas: Investigación Básica y Aplicada, ISSN 2007-9478, Vol. 9, Núm. 17, pp. 308-314.

Abstract

The effect of electrode polarization in an electrochemical micromachining process with different waveforms: square, sinusoidal, and triangular is investigated to identify the waveform that favors the reduction of the overcutting effect to improve the machining precision. The output signal of a function generator is half-wave rectified and amplified using an audio amplifier circuit. The structure of the proposed circuit is of the non-inverting type, where the gain value is adjusted by modifying the feedback resistance. The circuit is powered by a GWINSTEK GPE-2323 laboratory power supply. Both input and output signals are monitored through a KEYSIGHT DSOX1102G oscilloscope. Subsequently, three experimental series of machining under the same conditions and using square, sinusoidal and triangular waveforms are performed at frequencies of 1, 5, 10, and 15 kHz, within the bandwidth range of the TDA2003 operational amplifier. Once the drill holes have been obtained, measurements are made in terms of the final diameter of the drill hole, as well as its depth. The results are analyzed by comparing the diameter of the overcuts and the depth of the drill hole.

Segundo-Lovera, J. F., Granda-Gutiérrez, E. E., García-Mejía, J. F., Pérez-Martínez, J. A., Reyes-Morales, R., 2022. Sistema embebido para el monitoreo y ajuste de parámetros en un proceso de maquinado electroquímico. Coloquio de Investigación Multidisciplinaria, ISSN: 2007-8102, Vol. 10, Núm. 1, pp 86-93.

Abstract

This work presents the design and results of applying an embedded system to adjust the parameters of an electrochemical machining process. The system is based on Raspberry

Pi and allows the selection of the waveform between sinusoidal, square, or triangular; on the other hand, it configures the gain factor of an amplifier to obtain a bias voltage of 3, 5, and 7 Volts. It also performs the monitoring and recording of voltage and current during the machining of holes in metallic materials on a micrometer scale. Through this system, it was possible to identify the initial current and the current window by modifying the distance between electrodes, which are relevant for the process. After the holes are machined, the diameter and depth reached are quantified to identify the material removal rate.

García-Mejía, J. F., López-Pérez, M. A., Garduño-Ruíz, G., Segundo-Lovera, J. F., Granda-Gutiérrez, E. E., Vázquez-Robledo, R. A., Colín-Rivas, L., Comparison between evolutionary algorithms in height adjustment in a pneumatic levitator. Revista: Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica. Memoria ELECTRO, ISSN 1405-2172, Vol. 44 pp. 83-87.

Abstract

This proposal presents a comparative study between three heuristic methods applied in the gain tuning of a Proportional-Integral-Derivative controller, applied to the height regulation of a pneumatic levitator, this is a mechanical device that aims to raise an object from the variations of a certain air flow supplied by a fan. The purpose of this comparison is to determine the use feasibility in automatic control of a new evolutionary algorithm called Cuckoo Search, a heuristic supported by the behavior of Cuckoo birds, which is modellable by Levy's flight, a stochastic process that depends only on its present value. The results show that the Cuckoo Search is more stable with respect to the number of executions than the genetic algorithms and differential evolution used in this case of study.

RESUMEN

El maquinado electroquímico consiste en el desbaste de material metálico mediante disolución anódica, donde intervienen cuatro elementos fundamentales: una fuente de alimentación, la pieza de trabajo, la herramienta de trabajo y el electrolito. En particular, para realizar barrenos mediante este proceso se emplea una herramienta de trabajo (cilindro hueco) la cual se sitúa en una región de la pieza de trabajo donde se llevará a cabo la remoción de material, que ocurre cuando una corriente eléctrica fluye entre dos electrodos: la pieza y la herramienta. La precisión del maquinado se evalúa usualmente mediante dos parámetros de interés: el sobre corte y el error en la profundidad, mismos que son utilizados en el presente trabajo.

Se han realizado investigaciones para comparar una fuente de alimentación pulsada (forma de onda cuadrada) y fuentes basadas en formas de onda (sinusoidal y triangular) Patel, et al. (2020), reporta que se mejora la precisión del maquinado al reducir el sobre corte en un 32.2 % al emplear una forma de onda sinusoidal y un 49.9 % con una forma de onda triangular con respecto a una polarización pulsada (forma de onda cuadrada) para ambos casos. Por ello, se explora en este documento la incorporación de las tres formas de onda, seleccionadas automáticamente, con el propósito de mejorar la precisión del mecanizado.

Durante el proceso de maquinado electroquímico no es posible realizar una medición directa y no invasiva de la distancia entre electrodos porque la naturaleza del fenómeno lo impide; variables como el flujo del electrolito y la pequeña zona disponible para realizar la medición delimitada por el área de la base de la herramienta de trabajo, son algunas de las restricciones; por lo tanto, se realizan estimaciones de la distancia entre electrodos de acuerdo con el monitoreo de la corriente de maquinado, el voltaje de polarización y el área de exposición de la herramienta. Se han propuesto sistemas de control difuso (Nopalera Angeles, 2021) para la remoción controlada de material tomando en cuenta dos variables de entrada: el error en la pendiente de corriente (rapidez de cambio de la corriente) y la estimación del área de exposición del electrodo (superficie del electrodo expuesta al electrolito), mientras que como salida se utiliza el ajuste de voltaje y la distancia entre electrodos. En la literatura, se reporta que la sintonización, es decir, el proceso de ajuste

de los conjuntos difusos, se realiza empíricamente a partir de series experimentales y del expertise del diseñador del control, hasta lograr un resultado satisfactorio del sistema y del proceso de mecanizado.

En esta investigación se propone el uso de algoritmos genéticos, por su capacidad de optimización y búsqueda, para sintonizar los intervalos de pertenencia de las funciones de membresía de las variables del controlador difuso, de tal forma que se pueda prescindir de una sintonización empírica, o que esta se apoye de una herramienta sistemática, y que en consecuencia se mejore la respuesta del controlador en el proceso de maquinado electroquímico al tolerar las imprecisiones derivadas de la estimación de la distancia entre electrodos de dicho proceso.

Palabras clave: Lógica difusa, algoritmo genético, sintonización, maquinado electroquímico.

ABSTRACT

Electrochemical machining involves the material removal of metallic components through anodic dissolution, utilizing four fundamental elements: a power source, the workpiece, the working tool, and an electrolyte. Specifically, to produce drills using this process, a working tool (hollow cylinder) is employed, which is positioned in a region of the workpiece where material removal will take place. This removal occurs when an electric current flows between two electrodes: the workpiece and the tool. Machining precision is typically assessed by two key parameters: overcut and depth error, both of which are utilized in this study.

Research has been conducted to compare a pulsed power source (square wave form) and sources based on waveforms (sinusoidal and triangular). Patel et al. (2020) reported that machining precision is enhanced by reducing overcut by 32.2% using a sinusoidal waveform and by 49.9% using a triangular waveform in comparison to pulse polarization (square waveform) in both cases. Therefore, this document explores the incorporation of all three waveforms, automatically selected, with the aim of improving machining precision.

During the electrochemical machining process, direct measurement of the electrode distance is not possible due to the nature of the phenomenon. Variables such as electrolyte flow and the limited measurement area defined by the tool's base area are some of the main constraints. Hence, electrode distance is estimated based on monitoring machining current and polarization voltage. Fuzzy control systems (Nopalera Angeles, 2021) have been proposed for controlled material removal, considering two input variables: the error in current slope (rate of change of current) and the estimation of the electrode exposure area (surface of the electrode exposed to the electrolyte). The output includes voltage adjustment and electrode distance. In the literature, it is reported that tuning, that is, the process of adjusting fuzzy sets, is performed empirically based on experimental data series and the expertise of the control designer until achieving a satisfactory outcome of the system and the machining process.

In this research, the use of genetic algorithms is proposed to aid in the tuning of the controller due to their optimization and search capabilities. This is intended to fine-tune

the membership function intervals of the fuzzy controller variables, eliminating the need for empirical tuning. This approach aims to enhance the controller's response in the electrochemical machining process by tolerating inaccuracies arising from the estimation of electrode distance.

Keywords: Fuzzy logic, genetic algorithm, tuning, electrochemical machining.

ÍNDICE

PUBLICACIONES	i
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
2.1 Definición del problema.....	6
2.2 Objetivos de investigación	9
2.3 Preguntas de investigación.....	10
2.4 Justificación.....	11
2.5 Impactos	13
2.6 Hipótesis.....	13
3 ESTADO DEL ARTE	14
3.1 Proceso de maquinado electroquímico.....	14
3.2 Lógica difusa en sistemas de control	25
3.3 Algoritmos genéticos	33
3.4 Control difuso con aplicaciones en ECM.....	34
3.5 Conclusiones de la revisión de la literatura.....	39
4 MÉTODO	46
4.1 Requerimientos y especificaciones generales	46
4.2 Diseño e implementación.....	47
4.2.1 Sistema mecánico.....	47

4.2.2	Fuente de alimentación	50
4.2.3	Sistema de monitoreo	57
4.2.4	Sistema de establecimiento de la IEG	60
4.2.5	Sistema de bombeo y filtración del electrolito.....	65
4.2.6	Integración del sistema embebido	67
4.2.7	Unidad de control difuso	68
4.2.8	Algoritmo genético.....	80
4.3	Experimentación	97
4.3.1	Identificación de la resolución de movimiento del sistema mecánico	97
4.3.2	Ajuste de forma de onda y el valor de voltaje de la fuente de alimentación	98
4.3.3	Validación del sensor de voltaje y corriente	98
4.3.4	Identificación de parámetros para el maquinado electroquímico	99
4.3.5	Ajuste genético del controlador difuso	100
4.3.6	Validación del ajuste genético del controlador difuso	103
4.4	Conclusión de la metodología.....	104
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	106
5.1	Sistema embebido	106
5.2	Estabilidad en el desplazamiento del eje Z	107
5.3	Fuente de alimentación	109
5.4	Sensor de voltaje y corriente	110
5.5	Parámetros del maquinado electroquímico	112
5.5.1	Selección del voltaje de polarización inicial de la celda electrolítica	112
5.5.2	Selección de la frecuencia de maquinado	117
5.6	Sintonización genética del controlador	122
5.6.1	Fase 1: Datos representativos para generar a la población inicial	122

5.6.2	Fase 2: Resultados del algoritmo genético.....	125
5.7	Evaluación del controlador	130
6	CONCLUSIONES.....	134
	REFERENCIAS.....	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Matriz de referencias del estado del arte.....	41
Tabla 4.1:Tabla de verdad del multiplexor.	52
Tabla 4.2: Análisis de las variables de entrada y salida del controlador difuso.....	72
Tabla 4.3: Matriz de asociación difusa del consecuente voltaje.	78
Tabla 4.4: Matriz de asociación difusa del consecuente IEG.	79
Tabla 4.5: Representación de un cromosoma con los límites de los conjuntos difusos de las variables del controlador.....	80
Tabla 4.6: Listado de las 27 combinaciones diferentes en los límites de los conjuntos difusos del controlador.....	102
Tabla 5.1: Distancia desplazada por cada configuración del motor a pasos NEMA 23.	108
Tabla 5.2: Parámetros de la serie experimental enfocados en el voltaje de polarización.	112
Tabla 5.3: Vista de los maquinados realizados con las tres formas de onda y 4 niveles de frecuencias.....	113
Tabla 5.4: Parámetros de la serie experimental para seleccionar la frecuencia.	117
Tabla 5.5: Vista de los maquinados realizados con las tres formas de onda y 4 niveles de frecuencias.....	118
Tabla 5.6: Parámetros de la serie experimental para generar los cromosomas de la población inicial del algoritmo genético.	123
Tabla 5.7: Resultados de las 27 combinaciones seleccionadas.....	123
Tabla 5.8: Límites de los conjuntos difusos del error en la pendiente de corriente generados mediante el algoritmo genético.	127
Tabla 5.9: Límites de los conjuntos difusos del ajuste en la IEG generados mediante el algoritmo genético.....	127
Tabla 5.10: Límites en los conjuntos difusos del error en la pendiente de corriente generados mediante el algoritmo genético.....	128
Tabla 5.11: Parámetros de la serie experimental para evaluar el controlador sintonizado genéticamente.....	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Área de exposición del electrodo, a) al inicio, b) durante el proceso, cuando la herramienta penetra en la pieza.	7
Figura 3.1: a) Herramienta y pieza de trabajo antes del maquinado. b) Herramienta de trabajo realizando el maquinado sobre la pieza de trabajo. c) Herramienta de trabajo deja de maquinar. d) Pieza de trabajo con material removido después del maquinado.	15
Figura 3.2: Representación del sobre corte.	21
Figura 3.3: Esquema de la doble capa eléctrica (EDL), adaptado de Han et al. (2018). .	21
Figura 3.4: Monitoreo de corriente RMS detectada tomando como parámetro de ajuste una ventana de corriente de 20 mA, adaptado de Nopalera Angeles (2021).	24
Figura 3.5: Comportamiento de la corriente de maquinado descrito por la pendiente en 5 ajustes, adaptada de Nopalera Angeles (2021).	25
Figura 3.6: Estructura de un controlador difuso, adaptado de (Almache Cabrera, 2013).	25
Figura 3.7: Función triangular.....	28
Figura 3.8: Función trapezoidal.	29
Figura 3.9: Función trapezoidal R.....	29
Figura 3.10: Función trapezoidal L.....	30
Figura 3.11: Función Gaussiana.....	31
Figura 3.12: Proceso general de un algoritmo genético.....	34
Figura 3.13: Modelo SISO del sistema de control para mantener la IEG, adaptado del trabajo de Gallegos Miranda (2019).	36
Figura 3.14: Diagrama de control del proceso PECM mediante un enfoque difuso; adaptado de Nopalera Angeles (2021).	36
Figura 3.15: Diagrama de flujo del Algoritmo Genético adaptado de Lau et al. (2015). .	38
Figura 4.1: Sistema mecánico basado en CNC coordinado en 3 ejes.	48
Figura 4.2: Diagrama eléctrico del eje Z sistema mecánico.	49
Figura 4.3: Diagrama de flujo de la función para mover el eje Z del sistema mecánico. .	50
Figura 4.4: Diagrama a bloques de la fuente de alimentación	51
Figura 4.5: Diagrama electrónico del selector de formas de onda.	52
Figura 4.6: Diagrama de flujo de la función para la selección de forma de onda.....	53

Figura 4.7: Diagrama electrónico del amplificador no inversor.	54
Figura 4.8: Diagrama de flujo de la función para establecer el factor de ganancia del amplificador no inversor.	55
Figura 4.9: Diagrama electrónico del rectificador de precisión de media onda.....	56
Figura 4.10: Diagrama electrónico del sistema de monitoreo de voltaje y corriente.....	59
Figura 4.11: Diagrama de flujo de la función para realizar la lectura del voltaje y la corriente.....	60
Figura 4.12: Simplificación del diagrama electrónico del sistema de monitoreo cuando: a) no hay contacto entre los electrodos, b) los electrodos hacen contacto.	61
Figura 4.13: Circuito electrónico del cambio de fuente de alimentación mediante relé. .	62
Figura 4.14: Diagrama de flujo de la función para activar y desactivar el relé y cambiar de fuente de alimentación.	62
Figura 4.15: Diagrama de flujo para establecer la IEG inicial.....	63
Figura 4.16: Diagrama de flujo para calcular la IEG.	64
Figura 4.17: Diagrama de flujo para calcular el área de exposición.	65
Figura 4.18: Sistema de filtrado del electrolito.	66
Figura 4.19: Diagrama electrónico del sistema de bombeo del electrolito.	66
Figura 4.20: Diagrama de flujo de la función para el sistema de bombeo del electrolito.	67
Figura 4.21: Sistema embebido para un proceso ECM.....	68
Figura 4.22: Diseño de las pistas de la PCB y acotaciones.....	68
Figura 4.23: Diagrama a bloques del controlador difuso para el proceso de maquinado electroquímico.....	69
Figura 4.24: Diagrama de flujo del cálculo del error en la pendiente.....	70
Figura 4.25: Diagrama de flujo del proceso de maquinado electroquímico mediante el controlador difuso.	71
Figura 4.26: Conjuntos difusos de la variable error en la pendiente de corriente.....	73
Figura 4.27: Conjuntos difusos de la variable área de exposición para una perforación de 100 μm	74
Figura 4.28: Diagrama de flujo para calcular los límites de los conjuntos difusos del área de exposición acorde a la profundidad del maquinado.	76

Figura 4.29: Conjuntos difusos de la variable ajuste en la IEG.	76
Figura 4.30: Conjuntos difusos de la variable ajuste de voltaje.	77
Figura 4.31: Representación de la población inicial de 27 cromosomas de 25 genes cada uno.	82
Figura 4.32: Diagrama de flujo de la función para cargar la población inicial de un algoritmo genético desde un archivo CSV.	84
Figura 4.33: Diagrama de flujo para evaluar el desempeño de la población del algoritmo genético mediante el cálculo del error MAPE.	84
Figura 4.34: Diagrama de flujo de la función de selección por ruleta del algoritmo genético.	86
Figura 4.35: Diagrama de flujo de la función de cruce por operador BLX- α del algoritmo genético.	90
Figura 4.36: Diagrama de flujo de la función para buscar a los parientes del cromosoma y calcular el error en la profundidad.	91
Figura 4.37: Diagrama de flujo de la función para ordenar a la población.	93
Figura 4.38: Diagrama de flujo para el reemplazo de la población del algoritmo genético.	95
Figura 4.39: Diagrama de flujo general de la integración de las etapas del algoritmo genético.	96
Figura 4.40: a) Posición inicial de la herramienta de trabajo. Descenso de la herramienta de trabajo hasta el punto PH para realizar un maquinado de a) 290 μm , b) 340 μm y c) 390 μm	104
Figura 5.1: Componentes del sistema de maquinado electroquímico desarrollado.	106
Figura 5.2: Vista de la PCB, a) componentes, b) pistas.	107
Figura 5.3: Error en la distancia desplazada con respecto a la media de las repeticiones en las dos configuraciones de dirección de giro de motor a pasos.	108
Figura 5.4: Comparación entre la distancia desplazada esperada y la distancia medida en las dos configuraciones de dirección de giro del motor a pasos.	109
Figura 5.5: Señal rectificadora y amplificada de: a) onda cuadrada, b) onda sinusoidal y c) onda triangular.	110

Figura 5.6: a) Comparación del voltaje RMS en el divisor de tensión medidos con el osciloscopio y con el sensor, b) Comparación del voltaje RMS total medido con el osciloscopio y con el sensor.....	111
Figura 5.7: Error en el sobre corte con respecto a la media de repeticiones de cada combinación de voltaje y forma de onda.	114
Figura 5.8: Error en la profundidad con respecto a la media de repeticiones de cada combinación de voltaje y forma de onda.	115
Figura 5.9: Error en la corriente de maquinado inicial con respecto a la media de repeticiones de cada combinación de voltaje y forma de onda.	116
Figura 5.10: Error en el sobre corte con respecto a la media de repeticiones.	119
Figura 5.11. Error en la profundidad con respecto a la media de repeticiones.	120
Figura 5.12: Error en la corriente inicial con respecto a la media de repeticiones.	121
Figura 5.13: Errores porcentuales absolutos en la profundidad de la perforación de las 27 combinaciones elegidas que conforman a la población inicial.	125
Figura 5.14: Repetibilidad del algoritmo genético al evaluar el error MAPE en la profundidad iterando 40 veces y 20, 40 60 y 80 generaciones por iteración.	126
Figura 5.15: Repetibilidad del algoritmo genético al evaluar 40 iteraciones con 20 generaciones por iteración.....	127
Figura 5.16: Visualización de los límites de los conjuntos difusos de la variable error en la pendiente de corriente generados mediante el algoritmo genético.	128
Figura 5.17: Visualización de los límites de los conjuntos difusos de la variable ajuste en la IEG generados mediante el algoritmo genético.	129
Figura 5.18: Visualización de los límites de los conjuntos difusos de la variable ajuste de voltaje generados mediante el algoritmo genético.	129
Figura 5.19: Error porcentual en el sobre corte de la serie experimental.	131
Figura 5.20: Error porcentual en la profundidad estipulada.	132
Figura 5.21: Posición del electrodo para un maquinado de 340 μm de profundidad. ...	133

1 INTRODUCCIÓN

El maquinado electroquímico (ECM, por sus siglas en inglés, *Electrochemical Machining*) es un proceso de manufactura no convencional que se utiliza para mecanizar materiales conductores de electricidad mediante la acción de una reacción química entre la pieza de trabajo y una herramienta, también conductora. A diferencia de los métodos de maquinado tradicionales, como el fresado o el torneado, el ECM no implica contacto mecánico directo entre la herramienta y la pieza de trabajo, lo que lo hace especialmente adecuado para mecanizar materiales duros y frágiles (Abdel & El-Hofy, 2005).

Los componentes básicos del proceso son: a) la pieza de trabajo, que es el material que se va a mecanizar y debe ser conductor de electricidad, b) electrodo o herramienta, que utiliza para definir la forma que se desea mecanizar en la pieza de trabajo, y que está hecho de un material conductor, c) electrolito, una solución química que actúa como medio conductor y facilita la transferencia de iones entre el electrodo y la pieza de trabajo (Mole, et al., 2016).

La pieza de trabajo y el electrodo se sumergen en el electrolito, manteniendo una pequeña separación entre ellos, denominada como Espacio Inter Electrodo (de las siglas en inglés, *Interelectrode Gap*, IEG). Luego, se aplica un voltaje entre la pieza de trabajo y el electrodo, lo que crea un circuito eléctrico a través del electrolito. Cuando se aplica el voltaje, se inicia una reacción electroquímica en la zona de contacto entre el electrodo y la pieza de trabajo, que resulta en la disolución del material de la pieza de trabajo en forma de iones metálicos. La disolución de material se produce selectivamente en la superficie de la pieza de trabajo según la forma del electrodo, y este se mueve lentamente o se ajusta para crear la forma deseada en la pieza de trabajo (Gallegos Miranda, 2019).

En los últimos años se han realizado diversos estudios acerca de una variante del ECM, que se denomina Micro Maquinado Electroquímico (de las siglas en inglés *Electrochemical Micromachining*, ECMM), el cual es utilizado en la elaboración de piezas metálicas con aplicaciones en diferentes campos de la ingeniería, principalmente en la manufactura de piezas metálicas de forma compleja y escala reducida (orden de los micrómetros) sin dañar la superficie de la pieza trabajada (Rodríguez, et al., 2018).

Uno de los parámetros del proceso que, por lo general, se debe mantener constante, es la IEG. En el trabajo realizado por Gallegos Miranda (2019), la IEG se define como una de las variables más importantes dentro del proceso de maquinado electroquímico; en su trabajo empleó una fuente de alimentación pulsada en dos configuraciones de voltaje 5 y 10 Volts y con frecuencias de 10, 20, 30, 40 y 50 kHz, además dos valores de IEG, 120 y 240 μm . Con la combinación de los valores anteriores realizó perforaciones y al analizar los resultados encontró que la combinación de un voltaje de 5 V con una IEG de 240 μm y una frecuencia de 40 kHz presenta un menor efecto de sobre corte y las perforaciones son uniformes. Cabe mencionar que a distancias mayores a 240 μm la remoción de material es menor conforme la distancia incrementa; por otro lado, a distancias menores existe el riesgo de generar las condiciones de un corto circuito. La aproximación de la IEG a 240 μm es retomada posteriormente en el trabajo de Nopalera Angeles (2021), debido a que basa su sistema de maquinado en el prototipo de Gallegos Miranda (2019), e implementa algunas mejoras en el controlador difuso y sustituye la fuente pulsada unipolar por una fuente pulsada bipolar.

Diferentes autores observan el efecto que presenta el avance de la herramienta de trabajo sobre la pieza de trabajo con varias fuentes de polarización. Por ejemplo, Catarino Aguilar (2017) experimentó realizando barrenos utilizando una celda electrolítica polarizada con una fuente de corriente continua; realizó la corrección de la IEG cada 75 s, tiempo en el que el desgaste realizado en la celda electrolítica fue de 20 μm de profundidad la cual es la misma distancia que la resolución de movimiento del sistema mecánico. Por su parte, Gallegos Miranda (2019) trabajó con fuentes pulsadas y ajustó la IEG de acuerdo con el cambio en la corriente de maquinado, la frecuencia y la propia IEG. En otro ejemplo, Nopalera Angeles (2021) efectuó maquinados con una fuente de polarización pulsada bipolar, encontrando que el ajuste de la IEG se realiza mediante el monitoreo de la corriente de maquinado de la celda electrolítica, es decir, se realiza un ajuste de 20 μm en la IEG cuando la corriente de maquinado disminuye 20 mA. En otro ejemplo, Liu et al. (2010) experimentaron con fuentes de polarización pulsada a altas frecuencias (0.5 a 2 MHz) y un periodo en alto de 45 ns constante para cada nivel de frecuencia y una velocidad de avance de 0.2 $\mu\text{m}/\text{s}$, encontrando que una frecuencia en el orden de los 0.5 a 1 MHz permite obtener un menor efecto de sobre corte (que es una medida de la calidad

del mecanizado, pues representa la cantidad de material que se remueve de la pieza de trabajo en comparación con la remoción ideal), debido a que en este intervalo no se reduce significativamente el tiempo de los pulsos en alto con respecto al periodo de la frecuencia y en consecuencia no se modifica la velocidad de avance de la herramienta de trabajo.

En el trabajo realizado por Catarino Aguilar (2017) se realiza el cálculo del volumen de material removido en un proceso de maquinado electroquímico, con una aproximación de la ley de Faraday. La Tasa de Remoción de Material (de las siglas en inglés, *Material Removal Rate*, MRR) se emplea para calcular el volumen de material removido. Durante el proceso de maquinado, las condiciones iniciales como el área de exposición del electrodo (superficie expuesta del electrodo en contacto con el electrolito) o la IEG, cambian conforme el proceso de remoción de material de la pieza de trabajo avanza, lo que origina un modelo con información ambigua debido a que la IEG y el área de exposición son cuantificadas con base en estimaciones; es decir, son aproximadas.

La forma de onda de la señal de polarización también tiene un efecto significativo en el proceso. En trabajos como el de Sharma, et al. (2021) o Patel, et al. (2020), quienes realizaron sus investigaciones enfocadas en la variante Maquinado Electroquímico con Alambre (de las siglas en inglés *Wire-Electrochemical Machining*, Wire-ECM), se reportan estos efectos. Estos autores proponen el uso de formas de ondas sinusoidales y triangulares para optimizar el proceso de maquinado electroquímico sin emplear frecuencias mayores a 1 MHz o tensiones de polarización mayores a 12 V. Según los resultados de Patel, et al. (2020), la forma de onda sinusoidal presenta una disminución del sobre corte en un 32.2 % frente a formas de onda cuadradas. A su vez las formas de onda triangulares presentan una disminución del sobre corte en un 49.9 % frente a las formas de onda cuadradas.

Por otra parte, la geometría del electrodo es importante en el proceso ECM o sus derivados. Si en el proceso de maquinado electroquímico se utiliza una herramienta de trabajo con forma cilíndrica para generar una perforación, el resultado será una perforación cilíndrica en la pieza de trabajo. En este mismo sentido, si la herramienta de trabajo fuera un prisma triangular la perforación obtenida será una perforación triangular. Es decir, la forma del electrodo define la forma final que adquiere la pieza de trabajo como

consecuencia de la remoción del material. Cabe destacar que el sobre corte se considera como una medida de la precisión del maquinado, pues representa la diferencia entre las dimensiones de la herramienta de trabajo empleada y la forma geométrica obtenida en la pieza de trabajo (Nopalera Angeles, 2021).

Cuando se trabaja con fuentes de voltaje pulsadas para energizar la celda electrolítica, se pueden modificar tres variables de la fuente: la frecuencia, la amplitud del pulso y el porcentaje del periodo del pulso en alto. Existen diferentes métodos para mejorar la precisión de maquinado cuando se trabajan con una fuente de voltaje pulsada, los cuales son: a) disminución de la duración del pulso, incrementando la frecuencia de la fuente de alimentación, b) disminución de la duración del pulso, disminuyendo el ciclo de trabajo con una frecuencia de pulso constante y c) disminuir la magnitud de los pulsos de la fuente de alimentación (Sharma, et al., 2021). No obstante, al emplear formas de onda como método de polarización de la celda electrolítica, el cambio del ciclo de trabajo solo es posible en formas de onda cuadradas.

Para realizar el control del proceso de maquinado, Gallegos Miranda (2019) realizó un controlador difuso SISO (de las siglas en inglés, *Single-Input Single-Output*) para el ajuste de la distancia entre electrodos mediante el monitoreo de la corriente de maquinado. Mientras que Nopalera Angeles (2021) retomó y mejoró el controlador del trabajo de Gallegos Miranda (2019) al agregar el ajuste del voltaje de polarización y la evaluación del área de exposición (base y paredes de un cilindro hueco), obteniendo un controlador de dos entradas y dos salidas, es decir un controlador difuso MIMO (de las siglas en inglés, *Multiple-Input Multiple-Output*).

Es importante mencionar que el ajuste de los intervalos de los conjuntos difusos del controlador, es decir, los rangos de evaluación de cada variable, tanto en el trabajo de Gallegos Miranda (2019) como en el de Nopalera Angeles (2021) se realizaron de manera empírica. El proceso de ajuste bajo esta metodología se realiza a prueba y error, con base en la experiencia y en los resultados de corridas experimentales con diferentes parámetros. Por lo tanto, para contribuir en el desarrollo de esta línea de trabajo, en esta investigación se propone el uso de una metodología de apoyo para el ajuste sistemático de los intervalos de los conjuntos difusos mediante algoritmos genéticos.

La propuesta expuesta en el párrafo anterior se base en la idea de que un algoritmo genético es una técnica de optimización y búsqueda inspirada en la teoría de la evolución biológica, que se utiliza para encontrar soluciones aproximadas a problemas complejos de optimización y búsqueda en un espacio de soluciones amplio y diverso. Su utilidad radica en su capacidad para explorar y explotar soluciones potenciales de manera eficiente y encontrar soluciones cercanas a óptimas, incluso en problemas difíciles donde otros enfoques pueden ser ineficientes (Lau, et al., 2015). Por ello, se aborda en esta investigación la premisa de que utilizando un algoritmo genético es posible sistematizar la selección y ajuste de los intervalos de pertenencia de los conjuntos difusos de un controlador utilizado en el proceso ECM.

En suma, la presente investigación se centra en la utilización de tres tipos de onda (sinusoidal, cuadrada y triangular), distintos valores de voltaje de polarización (5, 7, y 9 V) y con ajuste de la IEG, con ayuda de un algoritmo genético que sintonice las funciones de membresía, de tipo gaussianas (las cuales presentan un ajuste suave cerca del valor máximo y mínimo de pertenencia al conjunto difuso) de un algoritmo basado en lógica difusa, para estimar el comportamiento de algunas de las variables involucradas (área de exposición e IEG), y que, en consecuencia, se mejore potencialmente el desempeño del proceso de maquinado, logrando un efecto de sobre corte promedio menor al 39 %, con base en los resultados obtenidos en los trabajos previos.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Definición del problema

En el proceso ECMM convencionalmente se emplean fuentes de alimentación pulsada con forma de onda cuadrada para mejorar la precisión del maquinado y mantener una tasa de remoción de material aceptable ($0.5 - 3 \mu\text{m}^3/\text{s}$) con el fin de atenuar el efecto de sobre corte (Mole, et al., 2016). Por ese motivo, se le suele denominar Micro Maquinado Electroquímico Pulsado (PECMM, *pulsed electrochemical micromachining*). Sin embargo, estudios con otros tipos de formas de onda como las triangulares y sinusoidales sugieren mejores resultados en cuanto a la precisión de maquinado y disminución del sobre corte en la pieza de trabajo (Sharma, et al., 2021).

En el proceso ECMM intervienen diversas variables que son de interés para la investigación: voltaje de polarización, forma de onda, IEG, corriente de maquinado, área de exposición y MRR. El voltaje de polarización y la forma de onda son controlados por la fuente de alimentación y determinan la corriente de maquinado; la IEG es estimada con base en el monitoreo de la corriente de maquinado (Gallegos Miranda, 2019); el área de exposición de la herramienta de trabajo y la MRR son calculadas de manera aproximada debido a que dependen de la estimación de la IEG (Nopalera Angeles, 2021). Además de los parámetros de la fuente de polarización (voltaje, frecuencia) y la IEG, otras variables establecen la remoción de material como la concentración y flujo del electrolito. Por otro lado, el área de exposición incrementa conforme se remueve material de la pieza de trabajo y la herramienta penetra en ella.

Mientras la herramienta de trabajo se mantenga cerca de la pieza de trabajo, el material del área ubicada justo debajo de ella se elimina. Inicialmente, la herramienta de trabajo, con forma de cilindro hueco, expone el área de su base tal como se ilustra en la Figura 2.1 a) la cual se calcula mediante la ecuación (1) y dado que en este caso P no tiene efecto se puede emplear la ecuación (2); sin embargo, mientras la herramienta desgasta a la pieza de trabajo, la herramienta de trabajo va penetrando gradualmente y, a su área de la base expuesta inicialmente, se le suma paulatinamente una porción de las paredes de la circunferencia del cilindro, que constituye a la herramienta de trabajo, como se muestra

en la Figura 2.1 b) y el área de exposición se calcula mediante la ecuación (2). Entonces el área de exposición aumenta y en consecuencia la corriente de maquinado cambia conforme ocurre la remoción del material y conforme la herramienta avanza.

$$\text{Área de la base} = \left(\pi \left(\frac{De}{2} \right)^2 \right) - \left(\pi \left(\frac{Di}{2} \right)^2 \right) \quad (1)$$

$$\text{Área de exposición} = \text{Área de la base} + ((\pi)(De)(P)) \quad (2)$$

Donde:

Área de la base = Área de la base de la herramienta de trabajo (forma de anillo).

De = Diámetro externo de la herramienta de trabajo.

Di = Diámetro interno de la herramienta de trabajo.

Área de exposición = Área de exposición de la herramienta de trabajo.

P = Profundidad de la perforación con respecto a la superficie de la pieza de trabajo.

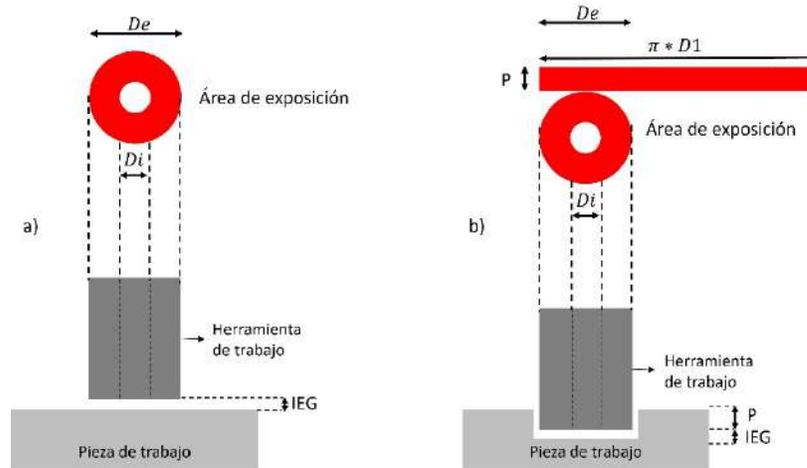


Figura 2.1: Área de exposición del electrodo, a) al inicio, b) durante el proceso, cuando la herramienta penetra en la pieza.

Debido a que se trabaja con diversas aproximaciones y estimaciones en las variables: área de exposición e IEG; se presenta la oportunidad de la integración de algoritmos difusos,

los cuales son capaces de procesar información ambigua, o con cierto grado de incertidumbre, y generar una respuesta precisa. Por esta razón, en trabajos previos se ha realizado investigaciones utilizando un sistema de control difuso de una entrada – una salida (Gallegos Miranda, 2019) y de dos entradas – dos salidas (Nopalera Angeles, 2021), para estimar la profundidad del maquinado a partir de las variables eléctricas voltaje de polarización y corriente de maquinado. En dichas propuestas, se pretende efectuar el control de la IEG, de tal manera que se mantenga constante frente a perturbaciones o imperfecciones geométricas de la pieza de trabajo. En ambos casos, en la base de conocimiento del controlador difuso, los intervalos de las funciones de membresía se definieron de forma empírica, mediante estrategias de prueba y error, las cuales dependen de la experiencia del investigador, obtenida de los resultados experimentales realizados bajo condiciones variables.

Los controladores basados en algoritmos difusos requieren de una base de conocimiento que, generalmente, es información acumulada a partir de la experiencia (Feltan & Luis Caballero, 2016). Con esta información empírica se dictaminan las reglas difusas, donde se evalúa la variable de entrada al sistema difuso con ayuda de las funciones de membresía y, con base en la inferencia realizada, se genera una respuesta de control.

Una alternativa para realizar el ajuste de los intervalos de las funciones de membresía que conforman la base del conocimiento del controlador difuso es recurrir a métodos de optimización numérica, como los algoritmos genéticos (Lau, et al., 2015). Los algoritmos genéticos son una técnica de programación inspirada en la evolución de las especies como estrategia para resolver problemas de optimización, que se adaptan al problema mediante la búsqueda en un espacio de soluciones amplio y diverso; por lo tanto, pueden ser empleados como método para el establecimiento de los intervalos de las funciones de membresía del controlador difuso. Los algoritmos genéticos pueden aplicarse a una amplia variedad de problemas sin necesidad de un conocimiento profundo del dominio, y son robustos frente a ruidos en los datos y cambios en las condiciones iniciales de los problemas a los que se aplican (Rodríguez Franco, et al., 2020).

A partir de lo anteriormente expuesto, se propone el uso de lógica difusa para el tratamiento de las variables estimadas y el uso de algoritmos genéticos para

potencialmente mejorar la base de conocimiento del algoritmo difuso, al sintonizar las funciones de membresía de los conjuntos difusos, de tal manera que se establecen los intervalos de cada conjunto difuso de forma metódica. Se propone emplear formas de onda triangular, sinusoidal y cuadrada en un controlador difuso que, a partir de la estimación del área de exposición y error en la pendiente de corriente de maquinado permita calcular ajustar el voltaje de polarización, la forma de onda y la IEG.

2.2 Objetivos de investigación

General

Desarrollar un controlador difuso de dos entradas - dos salidas con sintonización sistemática de las funciones de membresía mediante un algoritmo genético para el ajuste de los intervalos del voltaje y distancia entre electrodos, en un proceso de micro maquinado electroquímico, resultando en un sobre corte menor o igual al 39 %, y error en la profundidad menor o igual al 6.7 %, con base en los resultados reportados en trabajos previos realizados con controladores de una entrada – una salida y de dos entradas – dos salidas.

Específicos

- Implementar una fuente de alimentación que integre un circuito de rectificación, amplificación y selección de señales desde un generador de funciones para la polarización de la celda electrolítica.
- Establecer un sistema de monitoreo para registrar las variables eléctricas del proceso de maquinado, incluyendo corriente y voltaje de polarización a partir de señales cuadradas, sinusoidales y triangulares en la celda electrolítica.
- Calcular el área de exposición del electrodo y el comportamiento de la pendiente de corriente al aplicar polarización a la celda electrolítica utilizando formas de onda cuadrada, sinusoidal y triangular con tensiones en el rango de 3 a 9 V, a través de un diseño experimental.

- Desarrollar un controlador difuso capaz de ajustar la distancia entre los electrodos (IEG) y el voltaje de polarización, para mitigar el efecto de sobre corte durante el proceso de maquinado, basado en variables como el error en la pendiente de la corriente de maquinado (velocidad de cambio de la corriente) y el área de exposición del electrodo.
- Sintonizar las funciones de membresía gaussianas del controlador difuso utilizando un algoritmo genético y los resultados de pruebas del área de exposición, definiendo rangos adecuados para la IEG y voltaje de polarización.
- Evaluar la eficacia del controlador difuso midiendo el error en la profundidad de maquinado y su impacto en el sobre corte.
- Comparar los resultados obtenidos en el proceso de maquinado de orificios del controlador, con los obtenidos en estudios previos de la literatura, en términos de sobre corte y error en la profundidad de maquinado.

2.3 Preguntas de investigación

Mediante este trabajo se busca dar respuesta a diferentes cuestionamientos que están estrechamente relacionados con el desarrollo de la investigación, mismos que se enuncian a continuación:

- ¿Utilizar diferentes formas de onda en la fuente de alimentación durante el proceso de maquinado genera mejores resultados que emplear solo una forma de onda?
- ¿Qué sistema para monitorear la corriente RMS de maquinado es idóneo, considerando formas de onda sinusoidal y triangular además de la cuadrada?
- ¿Cómo determinar el número de pruebas para cada variable involucrada que proporcione la información general que integran la base de conocimiento?
- ¿Qué parámetros tomar en cuenta para sintonizar las funciones de membresía del controlador difuso con el algoritmo genético?
- ¿El algoritmo difuso podrá realizar el control de las variables, forma de onda, voltaje de polarización y IEG en un proceso de maquinado o se requiere de algún otro tipo de algoritmo?
- ¿Cuántas pruebas y que parámetros serán necesarios para validar el sistema?

2.4 Justificación

En el Maquinado Electroquímico Pulsado, Xiaolong, et al. (2016), reportan que el uso de pulsos ultracortos, es decir, emplear frecuencia en el orden de los MHz, presenta un sobre corte máximo de 30 % del diámetro del electrodo en el maquinado. Sin embargo, en este trabajo se muestran algunas limitaciones debido a que se dispone de poco tiempo para cargar completamente la carga capacitiva que se genera en la interfaz entre el electrolito y cada uno de los electrodos, por lo que dicha interfaz también es llamada doble capa eléctrica o EDL (de las siglas en inglés *Electrical Double Layer*, EDL), en el breve periodo del ciclo en alto. En consecuencia, se emplean voltajes mayores a 12 V de polarización. Para evitar este problema se propone usar voltaje de polarización con formas de onda sinusoidales y triangulares lo que implica realizar la caracterización del comportamiento de este tipo de formas de onda las cuales presentan un menor efecto de sobre corte de maquinado sin emplear frecuencias en el orden de los MHz, y en su lugar se emplean frecuencias en el rango de 5 a 50 kHz (Patel, et al., 2020).

De acuerdo con Patel et al. (2020), se generaliza que existen tres métodos para mejorar la precisión del maquinado y que son gobernadas directamente por la fuente de alimentación en un proceso de maquinado electroquímico pulsado; no obstante, existen restricciones de acuerdo con cada método. Los métodos, así como sus restricciones, de forma general son retomados por Sharma et al. (2021), como se enuncia a continuación:

- a) Disminución del periodo del pulso incrementando la frecuencia de la fuente de alimentación.
 - La tasa de remoción de material disminuye debido al poco tiempo disponible para recargar la carga capacitiva (descrita con mayor detalle posteriormente, en la Figura 3.3); es decir, la corriente que circula entre los electrodos disminuye conforme disminuye el tiempo del pulso reduciendo la tasa de remoción de material del maquinado.
 - El maquinado a frecuencias altas reduce el tiempo del pulso; por lo tanto, si se requiere aumentar la corriente, se aumenta el voltaje de polarización.
- b) Disminución de la duración del pulso disminuyendo el ciclo de trabajo con una frecuencia de pulso constante.

- La precisión mejora, pero la tasa de remoción de material disminuye.
- c) Disminuir la magnitud de los pulsos de la fuente de alimentación.
- Al disminuir la tensión aplicada a cada pulso, se mejora la precisión del maquinado, pero solo es posible con frecuencias menores a 1 MHz.

De lo anteriormente expuesto, el segundo método se descarta debido a que no se emplearán solamente pulsos cuadrados, sino que se utilizarán también formas de onda triangulares y sinusoidales. Por otra parte, la tensión de la fuente de alimentación sí es posible modificarla durante el proceso de maquinado.

La intención del trabajo es emplear las tres formas de onda, intercambiándolas en intervalos al realizar un maquinado conforme el monitoreo de la corriente. Debido a que cada forma de onda genera distintos efectos de sobre corte, se puede emplear la forma de onda cuadrada al inicio del maquinado, debido a que presenta una mayor tasa de remoción de material y sobre corte frente a ondas sinusoidales y triangulares; posteriormente, para finalizar el maquinado, usar formas de onda sinusoidales y triangulares, que presentan menor tasa de remoción de material y en consecuencia menor sobre corte.

Las variables involucradas en el proceso de maquinado electroquímico no son constantes, principalmente el área de exposición del electrodo sobre la pieza de trabajo se incrementa conforme el electrodo avanza, realizando la remoción de material sobre la pieza de trabajo. Al comienzo del proceso de desgaste, el área de exposición solo es la base del electrodo, pero conforme se realiza el desgaste de la pieza de trabajo, la base y parte de la pared lateral del electrodo se exponen gradualmente, incrementando el área de exposición; por lo tanto, existe desgaste en las paredes del electrodo, como ha sido reportado por Gallegos Miranda (2019) y por Nopalera Angeles (2021).

Debido a que las variables involucradas en el proceso de maquinado electroquímico no tienen un comportamiento constante a medida que avanza el proceso, el mantener las condiciones iniciales de tensión y IEG puede resultar inapropiado, debido a que el área de exposición cambia de manera significativa, por lo que se propone el uso de un controlador difuso que permita modificar los valores de las variables conforme el proceso de maquinado evoluciona.

2.5 Impactos

- Científico: Desarrollar un algoritmo de control basado en lógica difusa con sintonización mediante un algoritmo genético, que permita optimizar los intervalos de pertenencia de las funciones de membresía, con aplicaciones en un proceso de maquinado electroquímico, para el ajuste de la IEG y del voltaje de polarización.
- Tecnológico. Implementar un sistema de control que permita el maquinado de piezas con un menor sobre corte, utilizando polarización con formas de onda cuadrada, triangular y sinusoidal, a partir de un controlador difuso con sintonización por un algoritmo genético, que sistematice o sustituya la sintonización tradicional basada en el ajuste empírico por prueba y error.

2.6 Hipótesis

Al sintonizar las funciones de membresía de un controlador difuso mediante un algoritmo genético, aplicado en un proceso de micro maquinado electroquímico polarizado con formas de onda cuadrada, sinusoidal y triangular, se podrán definir de manera sistematizada los intervalos de las variables de voltaje de polarización y distancia entre electrodo, mientras que el sobre corte se mantiene por lo menos en 39 %, de acuerdo con lo reportado en trabajos previos.

3 ESTADO DEL ARTE

En el proceso de maquinado electroquímico intervienen diversos fenómenos que interactúan para lograr el desbaste controlado del material en el mecanizado de piezas metálicas para aplicaciones en la manufactura. Dichos fenómenos pertenecen al campo de estudio de distintas disciplinas. En este sentido, se analizaron fuentes bibliográficas recientes acerca del conocimiento teórico – práctico relacionado con el proceso de maquinado electroquímico, que abarca desde los fundamentos de la disolución anódica mediante electrólisis, hasta las herramientas computacionales para el control del proceso de desbaste, basadas en lógica difusa, así como la indagación de los posibles beneficios de integrar algoritmos genéticos para una mejora en la sistematización del ajuste en los intervalos de los conjuntos difusos de los controladores ya existentes. En este capítulo se presenta el análisis de la literatura que sirvió como punto de partida para la presente investigación.

3.1 Proceso de maquinado electroquímico

El maquinado electroquímico tiene diferentes variantes, dentro de las cuales destacan las siguientes: Maquinado Electroquímico Pulsado (de las siglas en inglés *Pulsed Electrochemical Machining*, PECM), Micro Maquinado Electroquímico a Través de la Máscara (de las siglas en inglés *Through-mask Electrochemical Micromachining*, TMECMM), Maquinado Electroquímico con Alambre (de las siglas en inglés *Wire-Electrochemical Machining*, Wire-ECM), Maquinado Electroquímico por Chorro (de las siglas en inglés *Jet-electrochemical Machining*, Jet-ECM) y el Rectificado Electroquímico (de las siglas en inglés *Electrochemical Grinding*, ECG). En cualquiera de las variantes, el mecanismo de eliminación de material de la pieza de trabajo es similar, puesto que se presenta a nivel iónico mediante disolución anódica en presencia de un electrolito; los distintos métodos difieren en la forma, dimensión y cinemática de la pieza y herramienta de trabajo (Patel, et al., 2020).

Entre las principales ventajas del proceso ECM se encuentran las siguientes: no presenta desgaste de la herramienta de trabajo, no se presenta rebabas en el acabado final de la

pieza y la capacidad de maquinar piezas complejas sin importar la dureza del material. Durante el proceso de maquinado, una corriente eléctrica fluye entre la pieza de trabajo (conectada al ánodo) y la herramienta de trabajo (conectada al cátodo), a través de un electrolito, usualmente de Cloruro de Sodio o Nitrato de Sodio. En la superficie de la pieza de trabajo, el material se disuelve en iones metálicos por reacción electroquímica hasta tomar la forma del electrodo (Yong, et al., 2010).

En un proceso de maquinado electroquímico generalmente intervienen los siguientes elementos: fuente de alimentación, herramienta de trabajo, pieza de trabajo y el electrolito. En la Figura 3.1, se aprecia el proceso de maquinado electroquímico en cuatro etapas: a) la herramienta de trabajo se encuentra inmóvil antes de comenzar el proceso y el electrolito no fluye por los electrodos, b) el cátodo se encuentra demasiado cerca de la pieza de trabajo mientras que el electrolito fluye y remueve material de la pieza de trabajo, c) el cátodo comienza a ascender cuando se ha removido el material deseado y el electrolito deja de fluir para evitar que se siga removiendo material y d) el electrodo regresa a su posición inicial y en la pieza de trabajo se observa el material removido con la forma del electrodo.

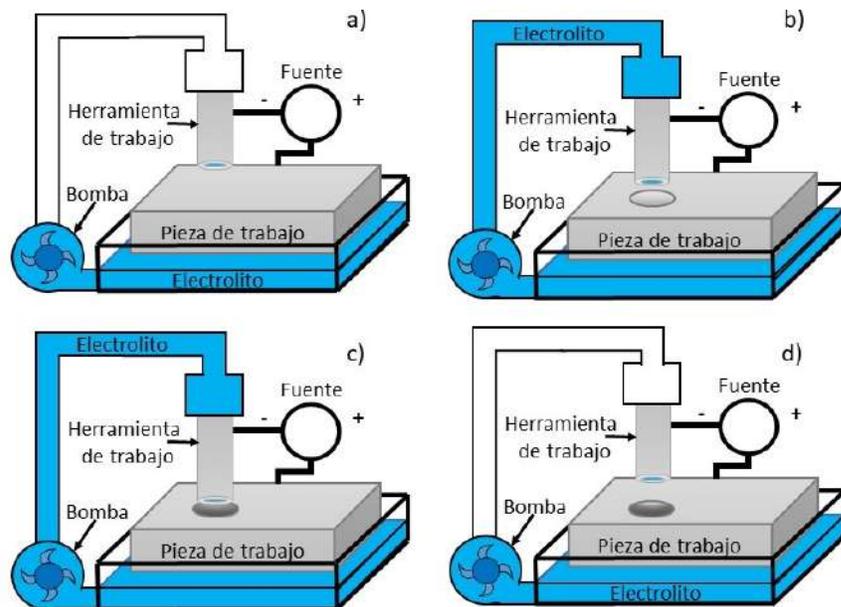
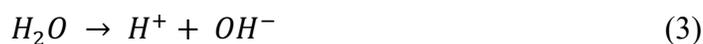


Figura 3.1: a) Herramienta y pieza de trabajo antes del maquinado. b) Herramienta de trabajo realizando el maquinado sobre la pieza de trabajo. c) Herramienta de trabajo deja de maquinar. d) Pieza de trabajo con material removido después del maquinado.

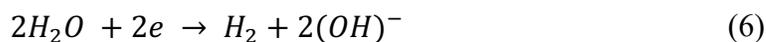
Entre los trabajos que conforman los antecedentes de esta línea de investigación, destacan los siguientes: a) la investigación de Catarino Aguilar (2017), quien empleó una fuente de polarización en corriente continua, b) la propuesta de Gallegos Miranda (2019), que trabajó con una fuente de polarización pulsada y c) la contribución de Nopalera Angeles (2021), quien diseñó una fuente pulsada bipolar. Los autores antes mencionados retoman las ecuaciones que modelan el intercambio de electrones durante la disolución anódica del trabajo de El-Hofy (2005) para realizar un mecanizado de una pieza de trabajo constituida mayoritariamente de Hierro (Fe) y empleando un electrolito a base de Cloruro de Sodio ($NaCl$) y agua (H_2O). El resultado de la disociación del electrolito y su disolución, en presencia de una corriente eléctrica, se representa por las siguientes ecuaciones químicas:



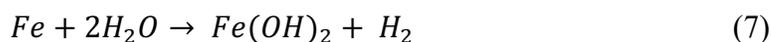
Los productos de las reacciones de las ecuaciones (3) y (4) con carga negativa OH^- y Cl^- son atraídos a la pieza de trabajo, mientras que los productos con carga positiva H^+ y Na^+ se mueven hacia la herramienta de trabajo. En la pieza de trabajo, el Hierro reacciona de Fe a Fe^{++} al perder dos electrones mostrada por la ecuación (5), de la siguiente forma:



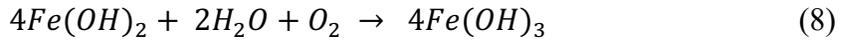
En la herramienta de trabajo, la reacción genera dos productos: gas hidrógeno y radicales hidroxilos, como se modela con la ecuación (6).



Para finalizar, el resultado de las reacciones electroquímicas de las ecuaciones (5) y (6), es que los iones de hierro se combinan con el hidroxilo para formar como producto hidróxido ferroso, $Fe(OH)_2$, como se presenta en la ecuación (7).



El hidróxido ferroso generado (7) puede reaccionar aún más con el agua y el oxígeno presente y producir hidróxido férrico, tal como se muestra en la ecuación (8).



En el proceso de maquinado electroquímico, para determinar cuánto material se ha removido durante la electrólisis, tanto Catarino Aguilar (2017) como Gallegos Miranda (2019) y Nopalera Angeles (2021) calculan el volumen de metal removido de la pieza de trabajo a partir de la primera ley de Faraday, la cual enuncia que “*La cantidad de masa desprendida que produce una corriente eléctrica es proporcional a la cantidad de electricidad transmitida*”; por lo tanto los tres autores determinan el volumen removido con la ecuación (9). Dicha ecuación es retomada de (Grover, 2007):

$$V = Cit \quad (9)$$

Donde:

V = Volumen de material removido (mm^3)

C = Constante de velocidad de remoción ($\frac{mm^3}{A.s}$)

I = Corriente (A)

t = Tiempo (s)

La ley de Ohm establece la relación entre voltaje (E), resistencia (R) y corriente (I); al integrar las condiciones que rigen al maquinado electroquímico, se contemplan: la separación entre la herramienta y la pieza de trabajo, la resistividad del electrolito empleado (r) y el área de superficie frontal entre la pieza y la herramienta (A); por lo tanto, la ecuación (10) modela el cálculo de la corriente tomando en cuenta el área y la IEG.

$$I = \frac{E \cdot A}{IEG \cdot r} \quad (10)$$

Donde:

E = Voltaje aplicado (V)

$A = \text{Área (mm}^2\text{)}$

$IEG = \text{Distancia entre electrodos (mm)}$

$r = \text{Resistividad del electrolito (}\Omega\text{.mm)}$

Grover (2007) sustituye la ecuación (10) en la ecuación (9), para obtener una ecuación que define a la ley de Faraday de forma más completa, como se plantea en la ecuación (11).

$$V = \frac{C(E.A.t)}{IEG.r} \quad (11)$$

Donde:

$V = \text{Volumen de material removido (mm}^3\text{)}$

$C = \text{Constante de velocidad de remoción (}\frac{\text{mm}^3}{\text{A.s}}\text{)}$

$E = \text{Voltaje (V)}$

$A = \text{Área de exposición (mm}^2\text{)}$

$t = \text{Tiempo (s)}$

$IEG = \text{Distancia entre electrodos (mm)}$

$r = \text{Resistividad del electrolito (}\Omega\text{.mm)}$

Es útil obtener una ecuación que modele la velocidad de avance de la herramienta de trabajo, empleando la ecuación (11), que es dividida en $A.t$ (Área x tiempo), de esta manera se convierte al volumen de material removido en velocidad de desplazamiento lineal. Entonces, la velocidad de avance Fr se representa en la ecuación (12).

$$\frac{V}{A.t} = Fr = \frac{C.E}{IEG.r} \quad (12)$$

Donde:

$V = \text{Volumen de material removido (mm}^3\text{)}$

$A = \text{Área de exposición (mm}^2\text{)}$

$t = \text{Tiempo (s)}$

Fr = Velocidad de avance de la herramienta de trabajo $\left(\frac{mm}{s}\right)$

C = Constante de velocidad de remoción $\left(\frac{mm^3}{A.s}\right)$

E = Voltaje (V)

IEG = Distancia entre electrodos (mm)

r = Resistividad del electrolito ($\Omega.mm$)

Para el cálculo de la IEG, esta variable es estimada tomando como referencia la corriente de maquinado I y utilizando la ecuación (10), por lo tanto, el cálculo estimado de la IEG queda como lo expresa la ecuación (13).

$$IEG = \frac{E \cdot A}{I \cdot r} \quad (13)$$

Donde:

IEG = Distancia entre electrodos (mm)

E = Voltaje (V)

A = Área de exposición (mm^2)

I = Corriente (A)

r = Resistividad del electrolito ($\Omega.mm$)

Otra variable involucrada en el maquinado electroquímico es la tasa de remoción de material (MRR). En trabajos previos, Gallegos Miranda (2019) y Nopalera Angeles (2021) realizan la estimación de esta variable con la ecuación (14), mientras que Sharma, et al (2021) y Patel, et al. (2020) emplean la ecuación (15), pero cabe resaltar que esta última ecuación solo es posible aplicarla con una forma de onda cuadrada.

$$MRR = \frac{V}{t} = C \frac{E \cdot A}{IEG \cdot r} \quad (14)$$

Donde:

MRR = Tasa de remoción de material $\left(\frac{mm^3}{s}\right)$

V = Volumen de material removido (mm^3)

t = Tiempo (s)

C = Constante de velocidad de remoción ($\frac{mm^3}{A.s}$)

E = Voltaje (V)

A = Área de exposición (mm^2)

IEG = Distancia entre electrodos (mm)

r = Resistividad del electrolito ($\Omega.mm$)

$$MRR = \frac{1}{T} \int_0^{T_{on}} \frac{I}{EF} dt \quad (15)$$

Donde:

T_{on} = Tiempo activo del pulso (s)

I = Corriente (A)

E = Peso equivalente del Ánodo (gr)

F = Constante de Faraday ($\frac{Coulomb}{mol}$)

El efecto de sobre corte se puede observar en la Figura 3.2. Este es un indicador del proceso de maquinado electroquímico que se puede medir solo al finalizar el maquinado, y se refiere a la diferencia existente entre el diámetro final (D2) del barreno o el canal realizado y el diámetro de la herramienta de trabajo (D1), dividido entre dos, como se muestra en la ecuación (16). El sobre corte, de manera ideal, se busca que esté en valores cercanos la IEG.

$$Sobre\ corte = \frac{D2 - D1}{2} \quad (16)$$

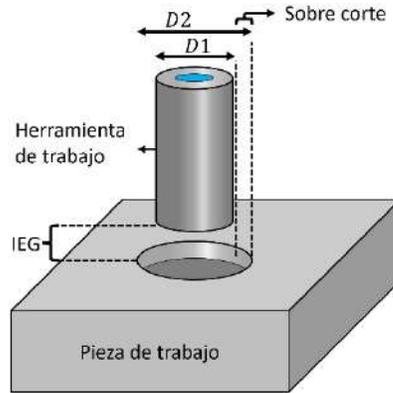


Figura 3.2: Representación del sobre corte.

En el Micro Maquinado Electroquímico Pulsado, la mayoría de los autores, como Mole et al. (2016), Sharma et al. (2021), Han et al. (2018), entre otros, realizan una caracterización del circuito en la IEG. Dicha caracterización es denominada como doble capa eléctrica (de las siglas en inglés *Electrical Double Layer*, EDL) con características capacitivas responsables de realizar el maquinado durante el proceso de carga y descarga controlado por una fuente pulsada. El esquema de la doble capa eléctrica entre los electrodos se observa en la Figura 3.3, donde C simula un capacitor y R a una resistencia, que son de utilidad para la caracterización del comportamiento eléctrico entre los electrodos.

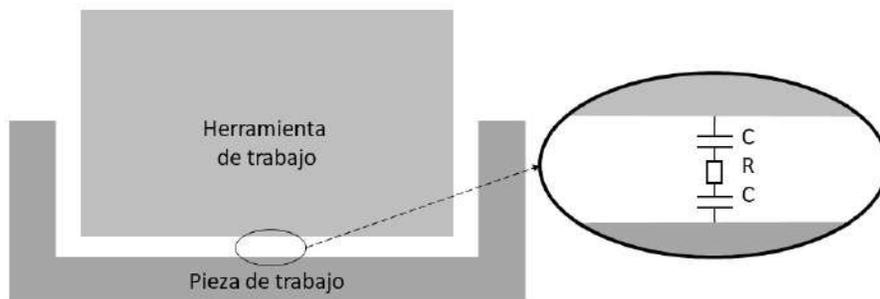


Figura 3.3: Esquema de la doble capa eléctrica (EDL), adaptado de Han et al. (2018).

Los modelos del comportamiento de la corriente entre los electrodos cuando se emplea una fuente de voltaje pulsada generalmente son representados como el efecto de carga y descarga de un capacitor con el fin de intentar explicar lo que ocurre entre los electrodos

y a la vez, para obtener un modelo matemático aproximado que pueda ser simulado y/o analizado. Sin embargo, el modelo solo es una representación aproximada, debido a que se trata de un proceso con una tendencia no lineal, como lo señalan autores como Gallegos Miranda (2019) y Nopalera Angeles (2021).

El usar fuentes de polarización pulsadas como fuentes de energización de la celda electrolítica ha generado que el desbaste la pieza de trabajo se realice de manera pausada y controlada, para comprender porque al usar fuentes pulsadas tienen ese efecto y que además se puede notar una mejora en el sobre corte, se requiere analizar las características que tiene una fuente pulsada con el proceso.

En la aproximación de Rodríguez et al. (2018), se realizaron varios experimentos para determinar la relación que existe entre las diferentes variables involucradas en el PECMM, específicamente en los valores de voltaje de la fuente pulsada y el valor del tiempo de activación del pulso durante el cual el capacitor adquiere una carga que será responsable de realizar el maquinado de la pieza. A medida que aumenta la amplitud del voltaje, disminuye el tiempo de activación del pulso necesario para cargar el capacitor; es decir, que el proceso de carga será más rápido si la tensión aplicada es mayor, ya que la velocidad de cambio de la corriente (pendiente de la curva corriente vs tiempo), será mayor. Por otro lado, Han et al. (2018) proponen un circuito basado en un arreglo de 4 MOSFET (del inglés *Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*) en una configuración de puente completo, para acelerar la despolarización del cátodo (herramienta de trabajo), ya que permite que, durante el tiempo de desactivación del pulso la conducción entre los MOSFET cortocircuito entre la pieza de trabajo y la herramienta de trabajo y, por lo tanto, el voltaje de polarización se puede eliminar rápidamente en el tiempo de apagado del pulso. Entonces el usar fuentes pulsadas como método de energización de la celda electrolítica genera que el desbaste de la pieza sea interrumpido y en el tiempo en que se interrumpe, el material es arrastrado fuera del área de trabajo mediante el flujo del electrolito.

En un proceso de maquinado electroquímico el efecto de sobre corte mejora en gran medida al emplear fuentes de alimentación pulsada frente a fuentes continuas para reducir el sobre corte de la pieza de trabajo y este hecho ha generado que se trabaje con señales

de pulso ultracortos, aunque dichas señales también tienen sus limitantes. Zhao & Xu (2020) afirman que mientras más pequeña sea la duración del pulso, la carga capacitiva no logra cargarse y, por lo tanto, no se realiza el maquinado. Para solventar este problema se aumenta la amplitud del voltaje para que el corto tiempo que dura el pulso se cargue completamente la carga capacitiva.

Por lo tanto, Patel, et al. (2020) proponen emplear formas de onda, sinusoidales y triangulares, como alternativa de las formas de onda cuadradas, para reducir el sobre corte en el proceso de PECMM frente al uso de frecuencias ultra altas (orden de los MHz). Los autores obtienen resultados con una notable disminución del diámetro de sobre corte del 32.2 % al emplear formas de onda sinusoidales con respecto de formas de onda cuadrada. Además, el diámetro de sobre corte disminuye en 49.9% al emplear formas de onda triangulares con relación a formas de onda cuadradas. De igual forma, Sharma, et al. (2021) continúan con la investigación del efecto de las diferentes formas de onda y concluyen que, al utilizar forma de onda sinusoidal y forma de onda triangular, se alcanza un menor efecto de sobre corte que pueden obtenerse con una frecuencia de pulso más baja (en el orden de algunos cientos de kHz), en contraste con un requisito de alta frecuencia (en unas pocas decenas de MHz). Además, sugieren que los resultados al aumentar la frecuencia del pulso para una forma de onda particular generan una reducción del ancho de corte significativamente menor que el impacto de cambiar la forma de onda del pulso y mantener constante la frecuencia y la relación de trabajo.

Nopalera Angeles (2021) monitorea la corriente de maquinado RMS (del inglés, *Root Mean Square*) que circula en la celda electrolítica para realizar el ajuste de la IEG como se muestra en la Figura 3.4. La corriente parte de un valor inicial de 45 mA en el punto *P1* y mientras se desgasta a la herramienta de trabajo la IEG va incrementando, este fenómeno ocasiona que la corriente disminuya hasta un punto *P2* con valor de 25 mA. En consecuencia, la IEG debe ajustarse para que la corriente vuelva a su valor inicial, y el parámetro de ajuste es una ventana de corriente de 20 mA; cuando la corriente desciende desde *P1* a *P2* se cumple el criterio de ajuste y la IEG debe ajustarse. Se observa también que el tiempo en realizar el ajuste va incrementando gradualmente. Nopalera Angeles

(2021), atribuye este comportamiento a la imprecisión de mantener la IEG lo más cercano posible a los 240 μm de separación inicial.

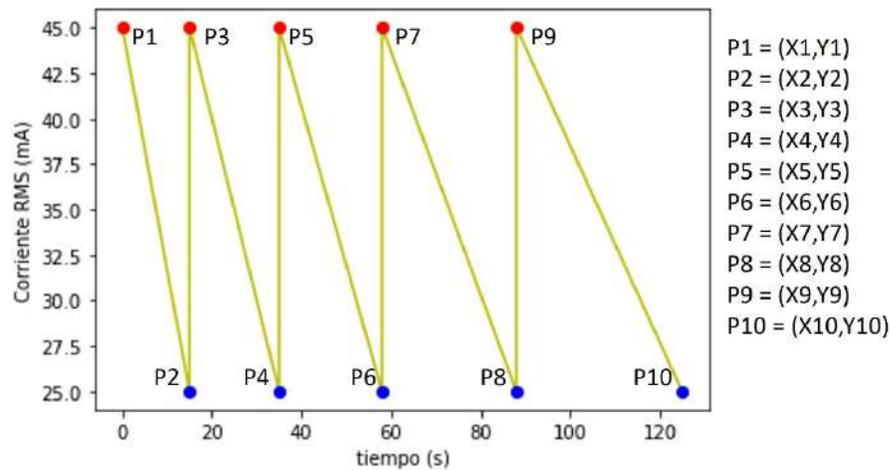


Figura 3.4: Monitoreo de corriente RMS detectada tomando como parámetro de ajuste una ventana de corriente de 20 mA, adaptado de Nopalera Angeles (2021).

Después de monitorear la corriente RMS, se observa que forman cinco pendientes: de P1 a P2, de P3 a P4, de P5 a P6, de P7 a P8 y de P9 a P10. Con los valores de cada pendiente se puede determinar la velocidad de cambio de la corriente en los cinco intervalos que describen las pendientes como se muestra en la Figura 3.5. Se puede observar también que el valor de las pendientes formadas va disminuyendo por que el tiempo en realizar el ajuste fue incrementando. Por lo tanto, Nopalera Angeles (2021) propone que si la pendiente inicial se mantiene con hasta un 10 % de error se puede asegurar una remoción de material e IEG constantes.

Durante el proceso de maquinado electroquímico se requiere un continuo ajuste de la IEG de manera proporcional al incremento de la profundidad, por el efecto de desbaste de la pieza de trabajo. Además, la IEG es una variable que es estimada de manera indirecta mediante la medición de la corriente de maquinado. También se ha encontrado que la pendiente de corriente constante es un indicador de que el proceso se está realizando de manera invariable; por lo tanto, está pendiente es calculada al iniciar el proceso, cuando la pendiente inicial o de referencia tiene un cambio mayor al 10% significa que las condiciones han cambiado y que se requiere un ajuste, ya sea de la IEG o del valor de

tensión en la celda electrolítica. El ajuste de las variables en un proceso de maquinado electroquímico debe ser realizado por un controlador capaz de manejar la incertidumbre presente en las estimaciones realizadas.

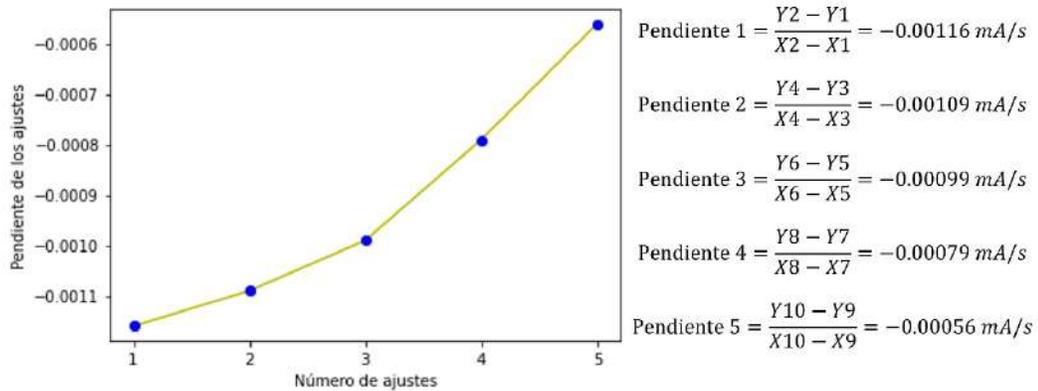


Figura 3.5: Comportamiento de la corriente de maquinado descrito por la pendiente en 5 ajustes, adaptada de Nopalera Angeles (2021).

3.2 Lógica difusa en sistemas de control

Una de las principales aplicaciones de la lógica difusa es en controladores difusos; es decir, sistemas de control con la capacidad de procesar información con un cierto grado de incertidumbre en sus variables. Los controladores difusos o FLC (de sus siglas en inglés, *Fuzzy Logic Controllers*) también suelen ser llamados sistemas de inferencia difusa o FIS (del inglés, *Fuzzy Inference System*) (Almache Cabrera, 2013). La estructura del controlador difuso se aprecia en la Figura 3.6, y cada uno de los bloques son analizados en las siguientes subsecciones.

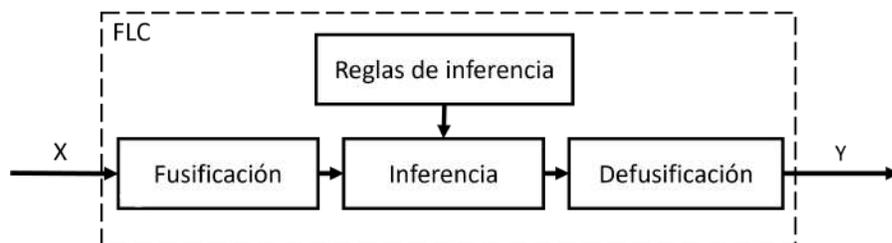


Figura 3.6: Estructura de un controlador difuso, adaptado de (Almache Cabrera, 2013).

Para comprender el papel de un controlador difuso, es necesario comparar a la lógica clásica con la lógica difusa. En la lógica clásica, a las proposiciones se les asignan dos posibles valores: verdadero (1) o falso (0). Por otro lado, en la lógica difusa se tiene una amplia gama de valores que están comprendidos en un intervalo entre 0 y 1. En otras palabras: la primera proposición es totalmente verdadera o falsa, en la segunda existe una amplia gama de proposiciones que sean parcialmente verdaderas o falsas en un rango entre 0 y 1 (Almache Cabrera, 2013).

La lógica difusa se relaciona a la percepción de las cosas desde un punto de vista humano. Cada percepción depende de la experiencia que es única en cada individuo y, por lo tanto, las afirmaciones se realizan con palabras que resultan ambiguas. Un ejemplo de información ambigua es la IEG, donde se puede afirmar que la distancia existente es lo suficientemente cerca para realizar una mayor MRR, pero no se especifican los valores numéricos de distancia y MRR.

Conjuntos difusos

En la teoría clásica de conjuntos, un elemento x del universo U pertenece totalmente o no a uno o más conjuntos, en cambio, la teoría de conjuntos difusos permite que un elemento x del universo U pertenezca a uno o más conjuntos con distintos grados de pertenencia. A partir de esta manera de entender los conjuntos, se construye las bases de los conceptos que constituye la estructura fundamental en que se apoya la lógica difusa (Feltan & Luis Caballero, 2016).

En los conjuntos clásicos no se cuenta con una flexibilidad para definir a los límites de los conjuntos, dado que el universo de discurso que contiene a conjuntos tiene límites que están bien definidos y limitados, por lo cual un elemento puede pertenecer solo a un conjunto en específico. En contraparte, los conjuntos difusos no presentan una limitación bien definida entre conjuntos; en este caso, se añade una función de pertenencia representada con un número real entre 0 y 1. En consecuencia, se introduce el concepto de conjunto difuso, que es representado por una palabra o etiqueta lingüística, por ejemplo,

para un universo U se pueden etiquetar a sus conjuntos difusos con las etiquetas como: mucho, poco, normal, entre otros.

Para cada conjunto se establece una función de pertenencia o membresía denominada $\mu_A(x)$, que indica el grado en que la variable x está incluida en el concepto representado por la etiqueta A ($0 \leq \mu_A(x) \leq 1$); si esta función toma el valor 0, significa que tal valor de x no está incluido en A , y si toma el valor 1, el correspondiente valor de x está absolutamente incluido en A (Feltan & Luis Caballero, 2016).

Fusificación y funciones de membresía

En un FLC siempre se involucra un proceso de fusificación; esta operación se realiza continuamente para cada entrada al proceso FLC, debido a que se trata de un paso previo al proceso de inferencia difusa. La fusificación es un procedimiento matemático en el que se convierte un elemento del universo de discurso (variable medida del proceso) en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece (Rodríguez Franco, et al., 2020).

La fusificación es un proceso matemático que consiste en tomar el valor de una variable numérica y convertirla en una variable difusa; es decir, se etiqueta con una palabra lingüística que define a un conjunto y su valor de pertenencia dentro de ese conjunto difuso. Las funciones de membresía toman los valores de las entradas (lecturas de sensores) y los convierte en forma difusa (variable lingüística), para que puedan ser procesadas por el mecanismo de inferencia. Dentro de las funciones de membresía destacan algunos ejemplos representativos:

- **Función triangular (Figura 3.7):** Definida mediante el límite inferior (a), el superior (b) y el valor modal (m), tal que $a < m < b$. El valor de pertenencia $\mu_A(x)$ se calcula de acuerdo con el valor de x , en los que se pueden presentar dos casos distintos como se muestra en la ecuación (17), para los casos en que $x < a$ y $x > b$ el valor de pertenencia de x a la función triangular es 0:

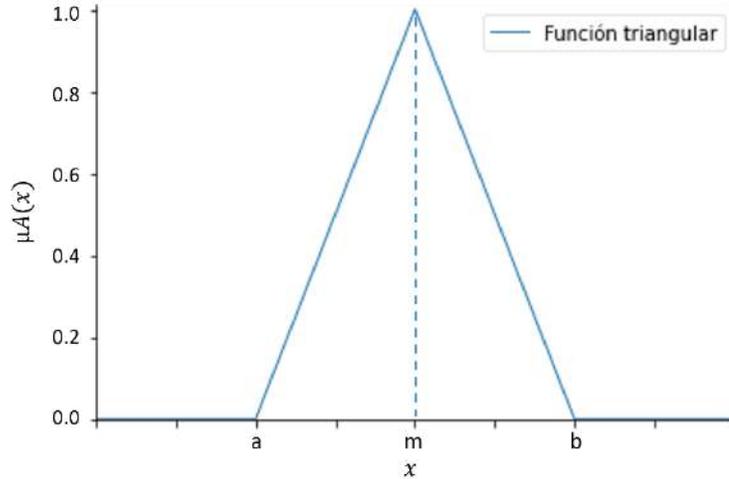


Figura 3.7: Función triangular.

$$\mu A(x) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{x-a}{m-a} & \text{si } a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{si } m < x \leq b \\ 0 & \text{si } x < a \\ 0 & \text{si } x > b \end{array} \right\} \quad (17)$$

- Función trapezoidal (Figura 3.8): Definida por sus límites inferior (a), superior (d), y los límites de soporte inferior (b) y superior (c), tal que $a < b < c < d$. El valor de pertenencia $\mu A(x)$ se calcula de acuerdo con el valor de x , en los que se pueden presentar cinco casos distintos como se muestra en la ecuación (18), para los casos en que $x < a$ y $x > d$ el valor de pertenencia de x en la función trapezoidal es 0.

$$\mu A(x) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } c \leq x \leq d \\ 0 & \text{si } x < a \\ 1 & \text{si } b < x < c \\ 0 & \text{si } x > d \end{array} \right\} \quad (18)$$

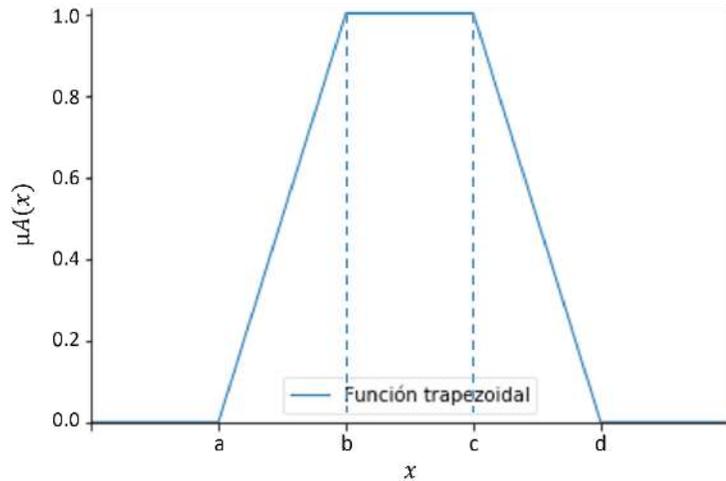


Figura 3.8: Función trapezoidal.

- Función Trapezoidal R (Figura 3.9): Es un caso especial de la función trapezoidal, denominadas funciones R, cuando solo se toma en cuenta la mitad derecha de una función trapezoidal. Cuando los parámetros $a = b =$ límite izquierdo del universo de discurso. El valor de pertenencia $\mu_A(x)$ se calcula de acuerdo con el valor de x , en los que se pueden presentar dos casos distintos como se muestra en la ecuación (19), para los casos en que $x > d$ el valor de pertenencia de x en la función trapezoidal R es 0.

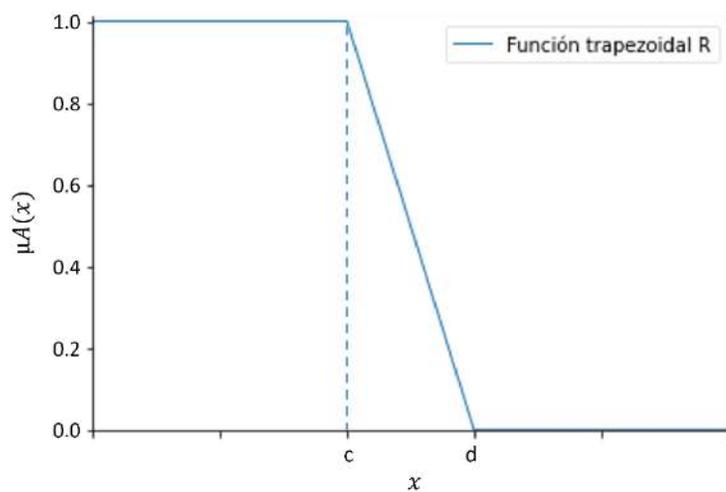


Figura 3.9: Función trapezoidal R.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } c \leq x \leq d \\ 0 & \text{si } x > d \end{cases} \quad (19)$$

- **Función Trapezoidal L (Figura 3.10):** Es otro caso especial de la función trapezoidal, denominada función L. Cuando los parámetros $c = d =$ límite derecho del universo de discurso. El valor de pertenencia $\mu_A(x)$ se calcula de acuerdo con el valor de x , en los que se pueden presentar dos casos distintos como se muestra en la ecuación (20), para los casos en que $x > a$ el valor de pertenencia de x en la función trapezoidal L es 0.

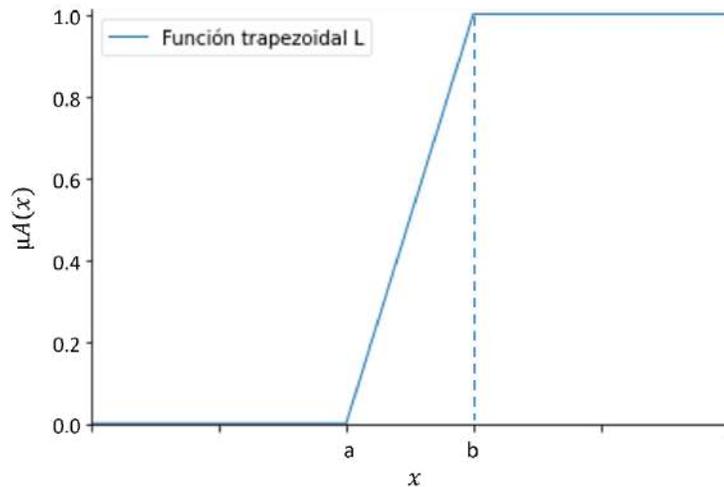


Figura 3.10: Función trapezoidal L.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{si } x > b \end{cases} \quad (20)$$

- **Función Gaussiana (Figura 3.11):** Definida por su valor medio (m) y el parámetro $k > 0$. Es la típica campana de Gauss, y cuanto menor es el valor de (k), más estrecha es

la campana. El valor de pertenencia de x en un conjunto difuso definido mediante una función Gaussiana esta descrito por la ecuación (21).

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{(x-m)^2}{2k^2}} \quad (21)$$

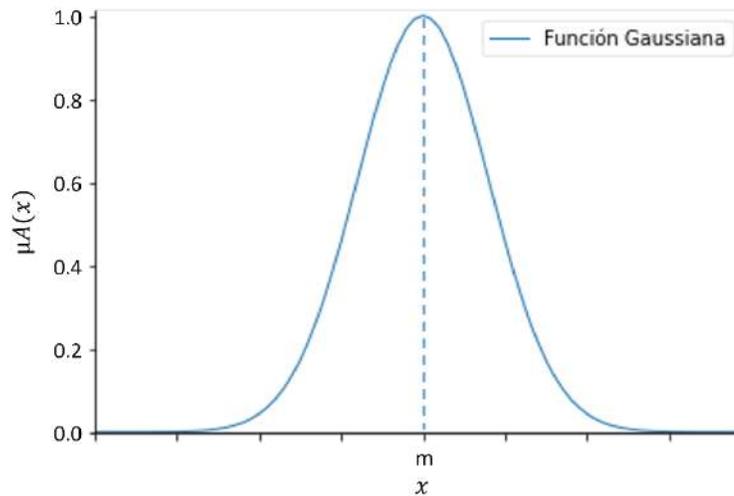


Figura 3.11: Función Gaussiana.

Reglas difusas

La lógica difusa usa reglas que combinan uno o más conjuntos difusos de entrada, llamados antecedentes o premisas, asociados a un conjunto difuso de salida llamado consecuente o consecuencia. Se involucra a los conjuntos difusos, lógica e inferencia difusas, con afirmaciones del tipo SI-ENTONCES. El antecedente es la variable de entrada que está siendo evaluada y el consecuente representa una variable que permite modificar la variable de respuesta. Los conjuntos difusos del antecedente se asocian mediante operaciones lógicas difusas AND, OR, etc. (Feltan & Luis Caballero, 2016).

Una regla difusa se plantea de la forma que se muestra a continuación:

SI <antecedente o premisa> ENTONCES <consecuencia o consecuente>

También se puede usar conjunciones como en la siguiente forma:

SI <antecedente> Y <antecedente> ENTONCES <consecuente>

Finalmente, al usar disyunciones queda de esta forma:

$$SI \langle \text{antecedente} \rangle O \langle \text{antecedente} \rangle ENTONCES \langle \text{consecuente} \rangle$$

En el contexto de la aplicación de la lógica difusa en un controlador para el proceso de maquinado electroquímico, se requiere identificar las variables de control y las variables de monitoreo. Por ejemplo, una variable de control que modifica el comportamiento del maquinado electroquímico es la magnitud de voltaje aplicado que se traduce como la corriente de maquinado que fluye en la celda electrolítica y donde el cambio en la corriente de maquinado se traduce como la variable de monitoreo. Por lo tanto, las reglas difusas aplicadas al proceso de micro maquinado electroquímico en el control de la corriente por medio del ajuste del voltaje de polarización puede ser de la forma: *SI Corriente mínima ENTONCES Voltaje incrementalo*. En otras palabras, incrementa el valor del voltaje porque la corriente actual es mínima.

Defusificación

Es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada en términos difusos. Esta conclusión o salida difusa es obtenida por la etapa de inferencia, que genera un conjunto difuso; sin embargo, el dato de salida del sistema debe ser un número real, representativo de todo el conjunto obtenido en la etapa de agregado. Por ello, existen diferentes métodos de defusificación, que tienen resultados y principios distintos, siendo el más ampliamente usado, el método del centroide (Almache Cabrera, 2013). Con el método de defusificación del centroide se transforma la salida difusa en un número real el cual es la coordenada (x) del centro de gravedad de tal conjunto difuso de salida. La defusificación por centroide calcula el centro de gravedad del área resultante después de las reglas difusas, matemáticamente se expresa como se muestra en la ecuación (22):

$$C = \frac{\int_m^n x\mu(x)dx}{\int_m^n \mu(x)dx} \quad (22)$$

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.

3.3 Algoritmos genéticos

Desde la década de 1950 se desarrollaron investigaciones inspiradas en la evolución de las especies, con el objetivo de emular el fenómeno de la evolución humana. En 1970, John Holland presentó su trabajo denominado “Algoritmo Genético como una herramienta de optimización basada en procesos evolutivos a partir de la mejora genética” (Rodríguez Franco, et al., 2020). David Goldberg, quien fue discípulo de John Holland desarrolló aún más el concepto de algoritmo genético (Noshadi, et al., 2015).

Un algoritmo Genético consta de los siguientes pasos, que también se ilustran en la Figura 3.12:

- **Función objetivo:** Determinar los valores valor óptimos de las variables involucradas (en este caso: error en la pendiente de corriente, voltaje e IEG).
- **Población:** Crear un conjunto aleatorio de posibles soluciones, es decir las combinaciones de forma de onda, voltaje e IEG.
- **Evaluación:** Se evalúa el desempeño de cada una de las soluciones.
- **Selección:** Se realiza conforme a diferentes criterios (Elitismo, Ruleta, Torneo o aleatorio).
- **Cruce:** Se combinan a dos padres para generar dos hijos. Dos combinaciones de forma de onda, voltaje e IEG se combinan y generan nuevas soluciones o hijos.
- **Mutación:** Selección de cierto porcentaje de hijos para ser mutados.
- Si la función objetivo es alcanzada o se han realizado cierto número de generaciones terminar el algoritmo, en caso contrario repetir proceso desde el tercer paso.

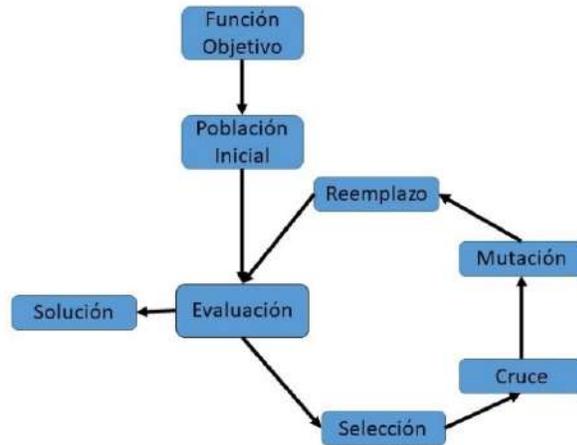


Figura 3.12: Proceso general de un algoritmo genético.

Al realizar la integración de algoritmos genéticos con la lógica difusa, descritos en el trabajo de Noshadi, et al. (2015), se empleó un sistema de tipo Mamdani donde para cada valor de la entrada se tiene un diferente valor en la salida, descrito por sus reglas difusas de la forma: *Si ENTONCES*. Para el algoritmo genético, Noshadi, et al. (2015) codificaron las soluciones con individuos de 100 cromosomas e hizo la comparación de trabajar como una única población de 1000 individuos y con cinco poblaciones de 200 individuos en una topología de anillo; es decir, las cinco poblaciones organizadas en un círculo donde al finalizar cada generación las poblaciones se rotan a la población contigua. Aunque en casos específicos la topología de anillo presentó mejores resultados que una población general, con población general el algoritmo tiene siempre la misma tendencia. Este trabajo es un referente para la incorporación de algoritmos genéticos y lógica difusa, que demuestra la compatibilidad y las ventajas de esta hibridación.

3.4 Control difuso con aplicaciones en ECM

En el contexto de un controlador difuso con entradas como el error de la derivada de la corriente y el cálculo del área de exposición, y salidas como el ajuste de la distancia entre electrodos y el ajuste de voltaje, los algoritmos genéticos figuran como una solución viable en la sintonización de los límites de los conjuntos difusos de un controlador difuso.

Los algoritmos genéticos utilizan principios inspirados en la evolución biológica, como la selección natural y la reproducción, para encontrar automáticamente los intervalos en los conjuntos difusos, y esto tiene efecto en el rendimiento del controlador. Con ello, se pretende abordar un punto de interés que se ha realizado de forma empírica. Al aplicar algoritmos genéticos a la sintonización de reglas difusas en un controlador difuso para el maquinado electroquímico, es posible obtener ajustes en los intervalos de los conjuntos difusos que potencialmente reduzcan el efecto de sobre corte y el error en la profundidad.

En el trabajo presentado por Gallegos Miranda (2019), se propone un sistema difuso de tipo SISO; es decir, una entrada – una salida, donde la variable de entrada es el error entre la IEG estimada y de la IEG inicial. Cabe destacar que la IEG inicial fue establecida en 240 μm , y que dicha distancia fue determinada mediante una caracterización a diferentes distancias, mediante un proceso experimental.

El controlador propuesto por Gallegos Miranda (2019) se puede apreciar en la Figura 3.13, donde cada una de las dos variables tiene tres conjuntos difusos: uno para establecer el límite inferior del universo de discurso, uno para el rango ideal y uno para el límite superior del universo de discurso. Las funciones de pertenencia de cada conjunto fueron de tipo trapezoidal debido a la menor complejidad computacional con la que se calcula el valor de pertenencia de la variable al conjunto difuso en la pendiente de una función trapezoidal en comparación de la complejidad de una función gaussiana. El controlador difuso propuesto por el autor fue implementado en una computadora de placa reducida Raspberry Pi 3B, que a partir de su puerto GPIO (del inglés, *General Purpose Input/Output*) manipula el controlador del motor a pasos que ajusta la IEG, mientras que el monitoreo de la corriente se realiza con un sensor de corriente, cuya magnitud es obtenida mediante un convertidor analógico a digital (en inglés, *Analog to Digital Converter*, ADC).

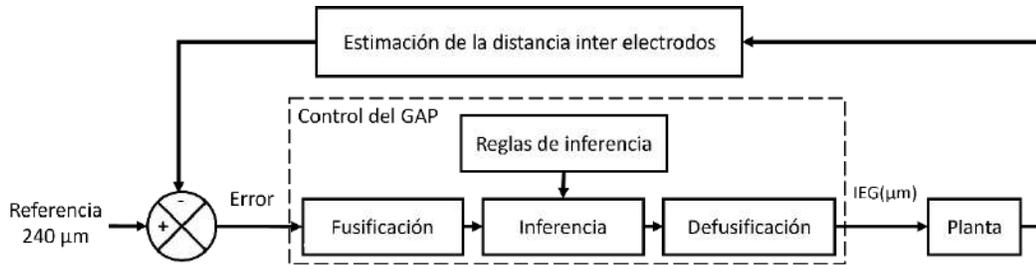


Figura 3.13: Modelo SISO del sistema de control para mantener la IEG, adaptado del trabajo de Gallegos Miranda (2019).

De manera similar, Nopalera Angeles (2021) actualiza el sistema difuso del trabajo anterior en un sistema difuso de tipo MIMO, al considerar múltiples entradas y múltiples salidas. Las entradas son: el error de la velocidad de cambio (pendiente) de la corriente y la estimación del área de exposición. Las salidas son, el voltaje y la IEG, como se muestra en la Figura 3.14. Cada variable, tanto de entrada como salida, tiene tres conjuntos difusos: uno para establecer el límite inferior del universo de discurso, uno para el rango ideal y uno para el límite superior del universo de discurso. A diferencia de su predecesor, en este trabajo las funciones de pertenencia de cada conjunto se realizaron con funciones gaussianas en vez de funciones triangulares y trapezoidales. De igual forma que el trabajo de Gallegos Miranda (2019), Nopalera Angeles (2021) emplea una Raspberry Pi para el ajuste de la IEG, el monitoreo de la corriente y el ajuste del voltaje.

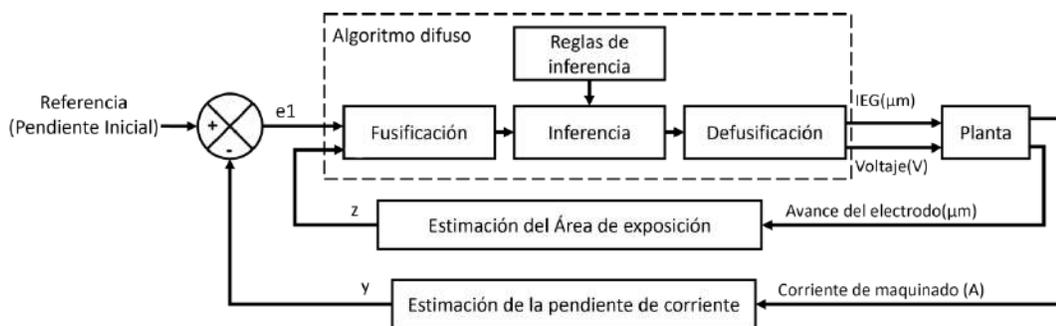


Figura 3.14: Diagrama de control del proceso PECM mediante un enfoque difuso; adaptado de Nopalera Angeles (2021).

En el trabajo de Leyva Bravo (2018), hace una hibridación entre el proceso ECM y un proceso de Maquinado por Descarga Eléctrica (de sus siglas en inglés *Electrical Discharge Machining*, EDM), a la combinación de ambas técnicas se denomina Maquinado Electroquímico por Descarga Eléctrica (de sus siglas en inglés *Electrochemical Discharge Machining*, ECDM). El autor implementa un modelo difuso de tres variables de entradas: voltaje, frecuencia y corriente; y dos variables de salida: sobre corte y tasa de remoción de material; para un sistema de maquinado híbrido ECDM. En este trabajo se retoma la idea de determinar la exactitud lograda por el sistema difuso en cuanto a la MRR y el sobre corte mediante el cálculo del Error Porcentual Medio Absoluto, con la ecuación (23).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Vm - Vp}{Vm} \right| * 100 \quad (23)$$

Donde:

$MAPE$ = Error Porcentual Absoluto Medio

n = Numero de muestras

Vm = Valor medido

Vp = Valor predicho

En la búsqueda de la literatura se identifica el trabajo de Ballesteros Ricaurte (2010). Esta investigación está en un contexto diferente al ECM, pero debido a que realiza la combinación de lógica difusa y algoritmos genéticos, se puede retomar algunas ideas relevantes para la presente investigación. El autor emplea el software MATLAB®, y se realiza el modelo de inferencia difusa para visualizar las variables de entrada y salida, así como el número de conjuntos difusos y las funciones de pertenencia, donde para las entradas las funciones de pertenencia son de tipo gaussianas, argumentando que tienen mayor precisión en la delimitación de los conjuntos difusos. Por otro lado, las variables de salida se representaron con funciones de pertenencia triangulares. El número de reglas difusas fue inicialmente de 625, pero se redujeron a 45 al evaluarlas y seleccionar las que mejores resultados presentaron. En la parte del algoritmo genético se empleó una

población de 500 individuos y en la operación de remplazo se debe considerar un menor número de padres en la nueva población.

Lau, et al. (2015) parten de una idea general de la combinación de la lógica difusa y los algoritmos genéticos, y aunque en este caso también se observa que la aplicación es para un ámbito diferente al ECM, se rescata la idea general de la combinación de ambas técnicas para retomarla e implementar un algoritmo genético para la sintonización de los conjuntos difusos de un FLC. El autor realizó un modelo de algoritmo genético desarrollado para el servicio ferroviario que tiene múltiples objetivos, además tiene diferentes restricciones, tales como una programación de trenes eficaz y con costes optimizados, basada en la demanda dinámica de los pasajeros.

El conocimiento tácito y la experiencia de los profesionales se pueden plasmar en las reglas difusas, lo que facilita el proceso de búsqueda de soluciones. Sin embargo, el uso de una metodología sistemática que ayude a la creación y sintonización de las reglas o de los conjuntos difusos en las funciones de membresía pueden ser apoyado por los algoritmos genéticos. El algoritmo genético de Lau, et al. (2015) se modela como se muestra en Figura 3.15 y trabaja con una población de 20 individuos y 500 generaciones, además, tiene una probabilidad de 80% de cruce y 5% de mutación. Mientras que para el algoritmo difuso se emplean funciones de tipo Trapezoidal en la variante L y R para los límites del universo de discurso, además de funciones triangulares para los conjuntos intermedios del universo de discurso.

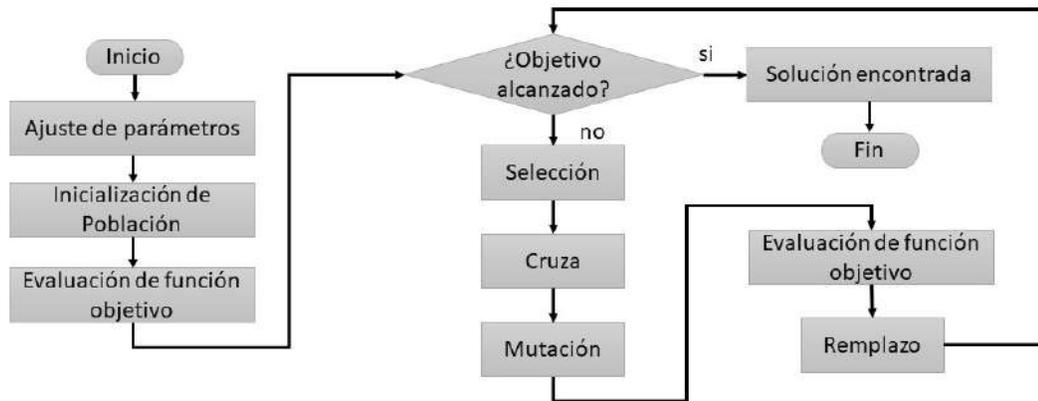


Figura 3.15: Diagrama de flujo del Algoritmo Genético adaptado de Lau et al. (2015).

3.5 Conclusiones de la revisión de la literatura

En la Tabla 3.1, se presenta la matriz de referencias que conforman el estado del arte del presente proyecto de investigación. De forma general se describen los trabajos realizados, así como las metodologías empleadas, las cuales engloban las diferentes disciplinas que integran este trabajo de investigación de maquinado electroquímico y controladores difusos aplicado en maquinado electroquímico.

Han (2018) resalta la importancia de la precisión en un proceso de PECM que se logra al implementar tecnología MOSFET para realizar una rápida polarización y despolarización de la fuente pulsada y garantizar que la celda electrolítica no este polarizada en el tiempo en bajo del pulso. Por su parte, Mole, et al. (2016) desarrollaron una fuente de polarización con tecnología basada en transistores de efecto de campo FET logrando trabajar con frecuencias de hasta 400 kHz. Xiaolong, et al. (2016) experimentaron con pulsos ultracortos al usar frecuencias en el orden de los MHz y establecieron que solo se puede trabajar con pulsos de 80 ns. Xu, et al. (2020) analizaron los métodos para aumentar la precisión de los maquinados al aumentar la duración de los pulsos cambiando el ciclo de trabajo y modificando la frecuencia, demostrando que se pueden obtener pulsos cortos sin el desarrollo de fuentes pulsadas en el orden de los MHz.

Para otras variantes, Sharma, et al. (2021) investigaron el efecto de usar formas de onda sinusoidales y triangulares con una fuente basada en generador de funciones y un circuito amplificador. Demostraron que el diámetro del sobre corte disminuye al usar formas sinusoidales y triangulares con respecto a formas cuadradas, como también fue planteado por Patel, et al. (2020).

Tanto Rodríguez, et al. (2018) como Zhao & Xu (2020) y Yong, et al. (2010) concluyen que en el PECM usar pulsos ultracortos tiene limitaciones en el ancho del pulso, dado que se observa que existe un tiempo mínimo de activación del pulso para cada valor de voltaje pulsado para hacer fluir la corriente entre la herramienta y la pieza de trabajo (es decir, en la IEG). De estos trabajos se establece que el principal parámetro que determina la tasa de remoción de material es la intensidad de la corriente de maquinado.

En lo que concierne al desarrollo de sistemas completos, Catarino Aguilar (2017) diseñó un sistema computacional para la remoción controlada de material metálico en un proceso

de maquinado electroquímico con una fuente de polarización en corriente continua logrando establecer la relación entre la IEG y la corriente de maquinado. Por otro lado, Gallegos Miranda (2019) empleó un controlador difuso de una entrada y una salida en un proceso de maquinado electroquímico pulsado y logra ajustar la IEG en función de la corriente en la celda electrolítica, mientras que Nopalera Angeles (2021) diseñó una fuente de polarización pulsada bipolar y un controlador difuso de múltiples entradas y múltiples salidas para ajustar el IEG y el voltaje en la fuente de alimentación.

Por lo tanto, derivado del estudio de la literatura se establece que existen tres áreas de oportunidad que se abordan fundamentalmente en la presente investigación: a) el uso de algoritmos genéticos para la sintonización sistemática de un controlador difuso de múltiples entradas y múltiples salidas, aplicado al proceso de maquinado electroquímico; b) la utilización de fuentes de polarización que permitan la modificación de la forma de onda durante el proceso de mecanizado y c) el establecimiento de una metodología capaz de ser utilizada para ajustar la distancia entre los electrodos (IEG), el voltaje de polarización y seleccionar la forma de onda, para mitigar el efecto de sobre corte durante el proceso de maquinado, basado en variables como el error en la pendiente de la corriente de maquinado (velocidad de cambio de la corriente) y el área de exposición del electrodo.

Tabla 3.1: Matriz de referencias del estado del arte.

Fuente	Título	Resumen	Metodología empleada	Áreas de oportunidad
(Han, et al., 2018)	Effects of a polarization on a machining accuracy in pulse electrochemical machining.	La precisión del proceso de maquinado electroquímico ha sido un problema, por lo tanto, se ha estudiado el fenómeno de la polarización por pulsos, demostrando que se obtienen mejores resultados al emplear un voltaje pulsado sobre el voltaje continuo. Para acelerar la despolarización del cátodo, entonces el voltaje de polarización cae a cero por completo durante el tiempo de desactivación del pulso.	Implementación de un circuito de potencia pulsada a partir de 4 MOSFET, para acelerar la despolarización del cátodo (herramienta de trabajo), permitiendo que durante el tiempo de desactivación del pulso la conducción entre los MOSFET cree un cortocircuito entre la pieza y la herramienta de trabajo, y por lo tanto el voltaje de polarización se puede reducir rápidamente en el tiempo de apagado del pulso.	Pueden realizarse experimentos con diferentes formas de onda, así como diferentes frecuencias y voltajes de polarización. El circuito de potencia que realiza la conmutación para la polarización y despolarización inmediata del cátodo durante cada estado de la señal debe probarse con las tres formas de onda. Además de considerar la caracterización del circuito.
(Xu, et al., 2020)	Electrochemical micromachining based on time constant control.	Análisis de dos métodos básicos para aumentar la resolución del mecanizado para el micro mecanizado electroquímico de pulsos. El primero al reducir la duración del pulso y el segundo método es aumentar la constante de tiempo del circuito. Se agrega un circuito de retroalimentación positiva en un circuito equivalente.	Se usa un circuito de retroalimentación positiva (basado en un amplificador inversor y un amplificador proporcional inversor) en un sistema de micro mecanizado electroquímico, y su constante de tiempo se controla ajustando la ganancia de retroalimentación (voltaje equivalente en una resistencia en serie con la celda electrolítica). La ganancia de retroalimentación es un parámetro de control efectivo para el mecanizado y la resolución se mejora significativamente con un aumento en la ganancia.	Debido a que la precisión del mecanizado electroquímico de pulsos está determinada por tres parámetros: capacitancia por unidad de área en doble capa, resistividad del electrolito y ancho de pulso. Donde las dos primeras son más complejas de controlar, entonces, el ancho de pulso de voltaje es el parámetro de control efectivo en precisión de micro maquinado electroquímico.
(Sharma, et al., 2021)	Investigations into machining accuracy and quality in wire electrochemical micromachining under sinusoidal and triangular	En el micro mecanizado electroquímico de alambre (Wire-ECMM) se ha mejorado la exactitud, precisión y calidad aplicando voltaje pulsado de alta frecuencia sin embargo emplear altas frecuencias requiere una amplitud de alto voltaje provocando un mayor consumo de energía. Se propone el uso de una forma de voltaje pulsado	Un análisis matemático del espacio de mecanizado en el proceso sugiere que la precisión en términos de sobre corte mejora significativamente cuando se emplea formas de onda sinusoidal y triangular. Las formas de onda se generan utilizando un generador de funciones con la ayuda	Existen diferentes métodos para disminuir el sobre corte del maquinado, pero presentan desventajas. Uso del potencial de CC constante promediado en el tiempo: la doble capa eléctrica formada en la celda electrolítica permanece polarizada. Disminuir la duración del pulso aumentando la

	voltage pulse condition.	sinusoidal y triangular en lugar de la forma de onda rectangular tradicional.	de un circuito electrónico de rectificación y amplificación. Se sugiere una reducción del ancho de la forma de onda para las tres formas al cambiar la frecuencia de pulso de voltaje de 100 kHz a 200 kHz es significativamente menor que al cambiar de forma cuadrada a triangular.	frecuencia del pulso: la doble capa eléctrica no tiene suficiente tiempo para cargarse. Disminuir la duración del pulso al reducir la relación de trabajo: la precisión del mecanizado mejora, pero la profundidad de la perforación disminuye. Por lo tanto, conviene encontrar un punto óptimo.
(Patel, et al., 2020)	Reducing overcut in electrochemical micromachining process by altering the energy of voltage pulse using sinusoidal and triangular waveform.	En el proceso de micro maquinado electroquímico (ECMM), se mejora la disolución del material de la pieza de trabajo en condiciones de voltaje pulsado ya que el suministro intermitente de voltaje proporciona tiempo de inactividad para eliminar las burbujas de hidrógeno y lodos que se generan en la zona de maquinado. Se desarrolla un enfoque de reducción de energía del pulso al cambiar la forma de onda del pulso de voltaje de Rectangular a Sinusoidal y triangular para la reducción del sobre corte.	Utilizan un rectificador de media onda y amplifican pulsos de tensión de tres diferentes formas de ondas de un generador de funciones. Los pulsos de salida del circuito se aplican al mecanizado. Se consideran tres etapas: a) filtrado de la señal del generador de funciones, b) se emplea un medio puente rectificador donde la señal pasa de bipolar a unipolar y c) amplificación del pulso hasta 600 mA. Se ejecutaron un total de 12 experimentos con frecuencias de 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz y 50 kHz, voltaje de 10 V y un GAP de 25 μm .	Las formas de onda sinusoidal y triangular reducen el sobre corte con respecto a la forma de onda cuadrada. Además, partiendo de una frecuencia de 5kHz se presentan mejoras en la disminución del sobre corte al multiplicar la frecuencia por 2 (18%), 4 (35.9%), y 10 (40%). Lo que implica el empleo de frecuencias relativamente bajas y, además, el empleo de lógica difusa para estimar las variables involucradas y predecir su comportamiento.
(Rodríguez, et al., 2018)	Optimization of pulsed electrochemical micromachining in stainless Steel.	El micro mecanizado electroquímico pulsado (PECMM) se considera una tecnología clave en el mecanizado de materiales a microescalas, por lo tanto, se estudia el PECMM para el mecanizado de acero inoxidable al emplear un electrodo de tungsteno de 2 a 8 μm . Se observa que existe un tiempo mínimo de activación del pulso para cada valor de voltaje pulsado para hacer fluir la corriente entre la herramienta y la pieza de trabajo (GAP). El principal parámetro que determina la tasa de remoción de material es la magnitud de la corriente.	Se emplea un generador de pulsos de hasta 100 MHz, así como de una fuente de alimentación conectados a un amplificador de pulsos el cual proporciona corriente necesaria en el GAP. Se realizó un micro agujero de 130 μm con un borde muy afilado sin remover material alrededor del agujero al usar una amplitud de voltaje de 12 V y un periodo de 370 ns (frecuencia de 2.7 MHz), con un tiempo de pulso en alto de 80 ns (21.62% de ciclo de trabajo) y un GAP de 2 μm . Se hacen experimentos con 5, 6 y 7 V, periodos de 370 ns y ciclos de trabajo entre 20 y 50 %.	Las condiciones del proceso del micro maquinado deben garantizar que la corriente fuera del área debajo de la base de la herramienta de trabajo sea muy baja, mientras que la corriente de maquinado en la celda electrolítica está ligada al voltaje aplicado, por lo tanto, si las variables de voltaje y corriente son bajas no hay remoción de material.

(Zhao & Xu, 2018)	Limiting current density in electrochemical micromachining.	Se propone un método para calcular la densidad de corriente de difusión en el polo eléctrico en el micro-mecanizado electroquímico. Se investiga los cambios de la corriente de difusión con factores del sistema, a partir de los cuales se propone un método para aumentar la densidad de la corriente que fluye entre la herramienta y la pieza de trabajo con un pequeño espacio libre entre el orificio y la herramienta. Este es el método de micro-mecanizado electroquímico que utiliza un electrodo de herramienta vibrante. Usando este método, se realiza un experimento de grabado en una placa de acero que muestra que se obtienen simultáneamente una velocidad de mecanizado razonable de 2 $\mu\text{m/s}$.	Se propone un método para calcular la densidad de corriente de difusión en el polo eléctrico en el micro mecanizado electroquímico y derivar las ecuaciones correspondientes. Con base en ecuaciones derivadas, se investigan los cambios de la corriente de difusión con factores del sistema. A partir de los resultados, se propone un método para aumentar la densidad de la corriente de difusión en el poste eléctrico con un pequeño espacio libre entre el orificio y la herramienta. Se empleó una herramienta de 30 μm de diámetro, el electrolito fue 0.01 M de NaNO_3 , un voltaje de polarización de 3.5 V y una frecuencia de la fuente de alimentación de 125 Hz mientras que la amplitud de la vibración de la herramienta de trabajo fue de 5 μm .	Se analiza el comportamiento de la corriente de difusión en un proceso de micro maquinado electroquímico, pero se implementa una herramienta de trabajo vibrante para realizar micro perforaciones. Cabe resaltar que se obtiene mejor resolución mientras la frecuencia y amplitud de la vibración aumenta hasta alcanzar parámetros óptimos (108 Hz y 5 μm) alcanzando una circunferencia simétrica con un diámetro de 108 μm . Entonces se propone implementar un algoritmo de lógica difusa que permita estimar los valores óptimos en un proceso de maquinado electroquímico de acuerdo con el comportamiento durante el maquinado.
(Catarino Aguilar, 2017)	Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico.	Desarrollo e implementación de un sistema computacional para un proceso de maquinado electroquímico con una fuente de alimentación de corriente continua. El sistema desarrollado con lenguaje de programación Python y una computadora de tamaño reducido Raspberry Pi.	Realiza un proceso de maquinado electroquímico con fuente de alimentación de corriente continua, donde los parámetros controlados son el voltaje de polarización, así como la corriente. Además, se mantiene un gap casi constante al realizar el desplazamiento de la herramienta de trabajo sobre la pieza de trabajo con ayuda de un sistema mecánico de tres ejes.	Se especifica que la polarización directa es poco efectiva en procesos de maquinado electroquímico. Se realiza una caracterización del proceso de maquinado electroquímico del cual se enuncian las fórmulas matemáticas que determinan la tasa de remoción de material.
(Gallegos Miranda, 2019)	Sistema Computacional para la remoción controlada de Material en un proceso de	Diseño e implementación de un sistema computacional para un proceso de maquinado electroquímico pulsado donde las variables controladas del proceso en primer lugar es la distancia entre la pieza de trabajo y la herramienta de trabajo (GAP) debe mantenerse constante para garantizar una remoción	Se empleó un algoritmo difuso de tipo SISO con tres conjuntos difusos de entrada y tres conjuntos difusos de salida para mantener el gap en 240 μm , el algoritmo difuso desarrollado es capaz de responder a perturbaciones presentes en la superficie de la pieza maquinada.	Al emplear fuentes de alimentación pulsada se mejoran los resultados de maquinado frente a fuentes continuas. Los resultados del monitoreo de la corriente durante el proceso de maquinado presentan un aumento en función al área expuesta de la

	Maquinado Electroquímico por Pulsos.	de material homogénea. Cabe resaltar que el GAP es una variable estimada a partir del voltaje aplicado y la corriente.	Se realiza un monitoreo constante de la corriente durante el proceso de maquinado con ayuda de un sensor de corriente.	herramienta por lo tanto se presenta una mayor tasa de remoción de material. Esto es, que a medida que se realiza la remoción de material de la pieza de trabajo, la herramienta de trabajo se expone más aumentando el área de exposición, entonces se requiere ajustar los parámetros iniciales para reducir el sobre corte.
(Nopalera Angeles, 2021)	Algoritmo de control difuso para el ajuste de polarización de un proceso de maquinado electroquímico pulsado.	Desarrollo de un algoritmo de control difuso para la regulación de los parámetros de tensión que son suministrados durante el proceso de remoción de material en un proceso de Maquinado Electroquímico Pulsado para la optimización de la exactitud de maquinado y la tasa de remoción de material. El algoritmo difuso permite estimar la IEG a partir del monitoreo de la corriente, por lo tanto, el algoritmo tiene la capacidad de compensar las perturbaciones presentes en la pieza de trabajo como inclinaciones o deformaciones.	Se diseñó una fuente de alimentación de tipo buck con parámetros de tensión y polaridad ajustable que permite una tensión bipolar, las frecuencias empleadas son en un rango de 10 a 100 KHz, un ciclo de trabajo de 50% y una corriente máxima de 3 A. Un sistema de monitoreo de corriente a partir de un sensor de corriente de efecto Hall acoplado aun conversor analógico digital. Implementación de sistema mecánico de tres ejes para realizar el desplazamiento en tres ejes, donde el eje vertical (Z) es el encargado de mantener un gap constante a 240 μm . El algoritmo difuso es de tipo MIMO, es decir, múltiples variables de entrada: Corriente y área de exposición; Múltiples variables de salida: gap y voltaje.	Las fuentes pulsadas bipolares mejoran el proceso de maquinado electroquímico al aprovechar el tiempo de polarización inversa como un ciclo de limpieza del área comprendida en el gap. Sin embargo, se puede incursionar en el uso de otras formas de onda además de la cuadrada, como las triangulares y sinusoidales, además que la frecuencia de la señal también influye en el proceso debido a que está ligada a la duración del pulso en alto debido a que disminuye el periodo y la amplitud de voltaje aplicado es proporcional a la corriente de maquinado.
(Noshadi, et al., 2015)	Adjust genetic algorithm parameter by fuzzy system.	Se realiza la combinación de un algoritmo genético que es uno de los algoritmos de búsqueda aleatoria que emplea la evolución genética como modelo de resolución de problemas con un algoritmo difuso que tiene la capacidad de trabajar con conjuntos de datos imprecisos.	Combina lógica difusa y algoritmos genéticos. El algoritmo genético es de tipo paralelo, con una población de 200 individuos divididos en 5 segmentos, mientras que el algoritmo difuso es de tipo Mamdani; las soluciones encontradas en cada iteración son remplazadas por las nuevas soluciones encontradas por el algoritmo genético.	Se aprovecha la optimización de algoritmo genético mediante la implementación de algoritmo difuso, es decir ambos algoritmos pueden trabajar en conjunto. Por otro lado, se pretende realizar la optimización del algoritmo difuso mediante el algoritmo genético.

(Ballesteros Ricaurte, 2010)	Metodología de clonación artificial basada en técnicas de inteligencia artificial, aplicada en industria de níquel y cobalto.	Se realiza el desarrollo de una metodología que consiste en el estudio de los Algoritmos Genéticos y la Lógica Difusa para replicar las funciones de un controlador cuando se desconoce su modelo matemático. Se realizan algunos procedimientos para para obtener los conjuntos difusos que realizan la inferencia del procedimiento del sistema. Posteriormente se trabaja con el algoritmo genético simple con algunas alteraciones en sus operadores.	Se usa MatLab© en el modelo difuso a partir de funciones gaussianas para tres variables de entrada y funciones de salida triangulares para dos variables de salida, cabe resaltar que tanto para las entradas y las salidas se emplearon 3 conjuntos difusos para cada variable. El número de reglas difusa fue de 625 inicialmente, pero se redujeron a 45. Para el algoritmo genético se empleó una población de 500 individuos y en la operación de remplazo se considera un menor número de padres para la nueva generación.	Se presenta la ventaja de emplear el algoritmo difuso y el genético trabajando en línea. Los resultados se retoman en el momento y la planta tiene mejor desempeño, mientras que este proceso tiene las restricciones de que la población no debe ser muy grande y el número de generaciones también debe ser un numero pequeño. Para las reglas difusas del conjunto total se deben evaluar y descartar las reglas que produzcan pocos resultados.
(Lau, et al., 2015)	Development of a hybrid fuzzy genetic algorithm model for solving transportation scheduling problem.	Debido a la creciente demanda del servicio de transporte público ferroviario se presenta la necesidad de un eficaz servicio enfocado en el acortamiento del tiempo de espera y el tiempo de viaje y la reducción de los costos. Por lo tanto, se emplean un algoritmo genético híbrido basado en lógica difusa para optimizar el problema multiobjetivo que representa la programación de trenes.	El modelo de algoritmo genético desarrollado tiene múltiples objetivos además tiene diferentes restricciones. Por otro lado, el algoritmo genético trabaja con una población de 20 individuos y 500 generaciones, además, tiene una probabilidad de 80% de cruce y 5% de mutación. Mientras que para el algoritmo difuso se emplean funciones de tipo singleton o L y R para los límites del universo de discurso, además de funciones triangulares para los conjuntos intermedios del universo de discurso.	Existe una ventaja al emplear dos técnicas de Soft Computing, en este caso los algoritmos genéticos y la lógica difusa. En la lógica difusa emplear funciones gaussianas permiten mayor precisión frente a las triangulares pero el costo computacional incrementa. A pesar de ello se obtuvieron buenos resultados usando funciones triangulares. En el caso de algoritmo genético se probó con una población pequeña (20 individuos), aunque por el lado de las generaciones 500 son un número considerable si se tiene en cuenta el tiempo de ejecución.

4 MÉTODO

En este capítulo se describe el proceso de desarrollo de los diferentes módulos que integran al sistema embebido para el proceso de maquinado electroquímico: a) sistema mecánico, b) fuente de alimentación, c) sistema de monitoreo, d) sistema para establecer la IEG inicial y e) sistema de bombeo y filtrado del electrolito. Además, se describe la implementación del controlador difuso con un enfoque en las variables de entrada (error en la pendiente de corriente y área de exposición) y las variables de salida (ajuste de la IEG y voltaje) así como su posterior ajuste en los límites de los conjuntos difusos basado en un algoritmo genético. Finaliza con la descripción de las series experimentales para la validación del controlador y del ajuste realizado.

4.1 Requerimientos y especificaciones generales

En un proceso de Micro Maquinado Electroquímico intervienen varios sistemas independientes que, en conjunto, permiten realizar el maquinado de la pieza. Estos sistemas se deben integrar a un prototipo para el desarrollo específico de la experimentación necesaria para esta tesis, y se enuncian a continuación:

- Sistema mecánico: Permite la movilización del electrodo sobre la pieza de trabajo; requiere tener una precisión de movimiento en el orden los micrómetros, se puede configurar a 20, 5 y 2,5 μm por pulso (resolución o precisión de movimiento del sistema mecánico).
- Fuente de alimentación: Polariza el electrodo y la pieza de trabajo, a partir de un generador de funciones; el tipo de señal debe ser rectificadas a media onda y amplificada, siendo la ganancia de amplificación variable. La fuente de alimentación permite seleccionar la forma de onda entre sinusoidal, cuadrada y triangular, además, se puede modificar el valor de la tensión entre sus terminales de 3 a 9 V y el rango de frecuencias va de 1 kHz a 100 kHz.
- Sistema de monitoreo: Realiza la adquisición y discretización de las variables eléctricas involucradas en el proceso de Micro Maquinado Electroquímico, tales

como el voltaje de polarización y la corriente de maquinado. Debido a que está basado en un ADC de 16 bits que cuenta con un amplificador de ganancia programable, se puede obtener una resolución en el bit menos significativo de 187.5, 125 y 62.5 μV .

- Sistema de bombeo y filtrado del electrolito: Mantiene el electrolito en constante circulación y libre de desechos producto de la disolución del material de la pieza. El flujo del electrolito a través del electrodo cilíndrico hueco es de 0.75 ml/s, y es obtenido con una polarización de 7 V en la bomba del electrolito.
- Unidad de control: Establece la interacción entre los sistemas anteriores, además de la implementación del algoritmo de control difuso. La unidad de control está basada en un Raspberry Pi 3B, que a partir de su puerto GPIO puede interactuar con el sensor de voltaje y corriente, además de modificar los valores de los actuadores para ajustar el voltaje de polarización y la IEG.
- Interfaz de control del sistema de Micro Maquinado Electroquímico: Mediante esta interfaz basada en líneas de comando, el usuario manipula las variables del sistema y su operación en general.

4.2 Diseño e implementación

4.2.1 Sistema mecánico

La pieza de trabajo permanece inmóvil durante el maquinado, mientras que la herramienta de trabajo se desplaza sobre la pieza de trabajo mediante un sistema mecánico. El sistema mecánico está basado en Control Numérico por Computadora (de sus siglas en inglés *Computer Numerical Control*, CNC), el cual permite el control de la posición de la herramienta de trabajo en el espacio mediante software y a través de coordenadas X, Y, y Z. En la Figura 4.1, se puede observar que el eje Z es el encargado de elevar y descender a la herramienta de trabajo que se sujeta a una porta electrodos, por lo tanto, este eje permite modificar la IEG; el eje X desplaza la porta electrodos ya sea a la izquierda o

derecha; el eje Y es el encargado de mover una base móvil en el cual se coloca un contenedor que acumula el electrolito; en este mismo contenedor se coloca a la pieza de trabajo.

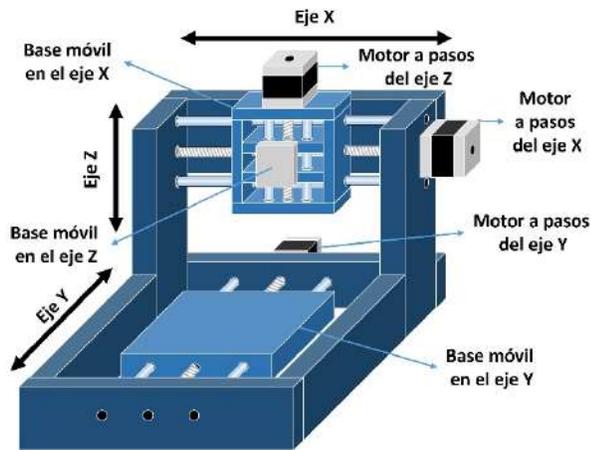


Figura 4.1: Sistema mecánico basado en CNC coordinado en 3 ejes.

Cada eje del CNC se mueve a partir de un motor a pasos NEMA 23, que es un actuador electromagnético rotatorio que convierte mecánicamente las entradas de pulsos digitales a movimiento rotatorio, que puede ser rotación en sentido horario o antihorario, mientras que la velocidad está relacionada a la frecuencia de pulsos. Este motor a pasos es de tipo industrial formado por 2 bobinas, y tiene las siguientes características: tensión nominal de 3.2 V, corriente nominal de 2.8 A, torque de 19.44 kgf/cm, 200 pasos por revolución, equivalentes a 1.8 grados por pulso (SIMAC Electronics GmbH, 2021).

El motor NEMA 23 requiere de un controlador para su correcto funcionamiento. El controlador TB6560 permite generar los pulsos de control para el motor a pasos; sus características son las siguientes: tensión de funcionamiento de 10 a 35 V, corriente máxima de 3 A, 8 terminales de entrada (voltaje, GND, dos terminales de habilitación (5V y GND), dos terminales de dirección y dos terminales de pulsos digitales), 4 terminales de salida (dos para cada una de las bobinas del motor a pasos). Además, el controlador TB6560, mediante interruptores, permite configurar las características de funcionamiento como: corriente de operación de acuerdo con el motor a pasos empleado, corriente de

parada que mantiene en cierta posición al motor, y configuración del movimiento en paso completo o micro pasos (medio, octavo y dieciseisavo).

El controlador TB6560 se conecta a una fuente de voltaje de 12 V, con una corriente máxima de 2 A. El controlador se configuró con una corriente de operación de 2 A, corriente de parada del 50 %, una resolución en micro pasos de dieciseisavo de un paso completo para obtener mayor resolución de movimiento (equivalente a 2.5 μm por pulso en el movimiento lineal), y 0 % en control de decline (MPJA, 2023). En la Figura 4.2, se aprecia el diagrama electrónico de la conexión entre el motor a pasos NEMA 23 y el controlador TB6560; las terminales de control de habilitación, dirección y pulso se controlan mediante los terminales 16, 20 y 21 del puerto GPIO de la Raspberry Pi respectivamente.

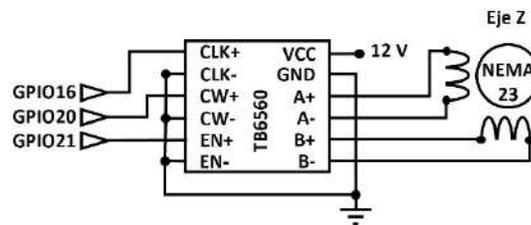


Figura 4.2: Diagrama eléctrico del eje Z sistema mecánico.

La función para mover el eje Z del sistema mecánico se puede observar en la Figura 4.3, la función puede analizarse en tres partes: la primera establece la dirección de movimiento del motor, se recibe como parámetro la variable *Distancia*, si la *Distancia* es mayor a cero se establece la *Dirección* del movimiento como subir, si la *Distancia* es menor a cero entonces la *Dirección* de movimiento es bajar y la variable de negativa cambia a positiva; la segunda realiza el cálculo de los *Pulsos* para desplazarse en la distancia requerida, el cual se calcula con la ecuación (24).

$$Pulsos = \frac{Distancia}{Resolución} \quad (24)$$

Donde *Resolución*, es la distancia de desplazamiento obtenida con la configuración de paso completo o fracción de paso; en la última parte del algoritmo, se genera un bucle de

repetición desde 0 hasta la cantidad de pulsos, en donde se genera un tren de pulsos que permite que el controlador TB6560 realice el movimiento del motor a pasos.

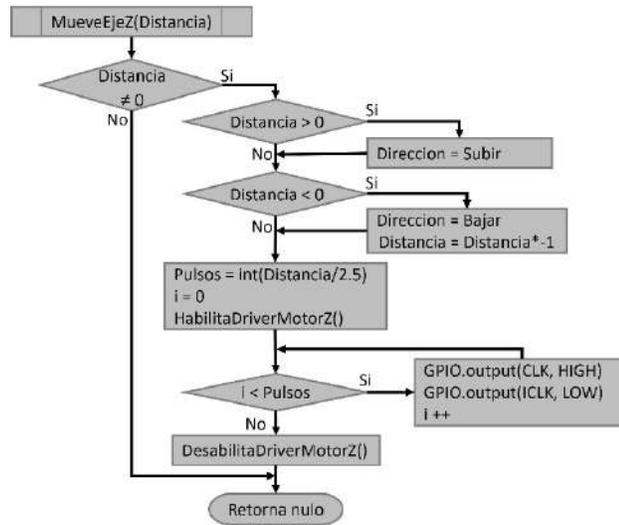


Figura 4.3: Diagrama de flujo de la función para mover el eje Z del sistema mecánico.

4.2.2 Fuente de alimentación

El voltaje aplicado a los electrodos forma una celda electrolítica, y produce una corriente eléctrica que fluye entre la pieza y la herramienta de trabajo. Esta corriente, también identificada como corriente de maquinado, es proporcional a la tensión de la fuente de alimentación. Esta corriente es la que propicia el intercambio de iones entre los electrodos, y promueve la disolución anódica en la que se sustenta el maquinado de la pieza de trabajo.

En la Figura 4.4, se presenta el diagrama a bloques de la fuente de voltaje que se propone para esta investigación, esta fuente consta de 2 etapas: la primera acondiciona la señal y la segunda brinda las características de potencia necesarias para ser empleada en la celda electrolítica. Mediante tres generadores de funciones KEYSIGHT 33210A se produce una forma de onda (uno para cada tipo de señal), por lo tanto, se dispone de tres formas de onda: sinusoidal, cuadrada y triangular. La selección de la forma de onda se realiza mediante un multiplexor analógico. La señal elegida se rectifica a media onda y posteriormente la señal rectificada es amplificada en tensión con un amplificador basado

en amplificadores operacionales. La señal es amplificada nuevamente en tensión y potencia mediante un amplificador de aislamiento KEYSIGHT modelo 33502A que permite el acoplamiento entre la etapa de potencia y la instrumentación. Finalmente, la forma de onda es empleada como fuente de voltaje para energizar a la herramienta de trabajo y a la pieza de trabajo, en un medio electrolítico.

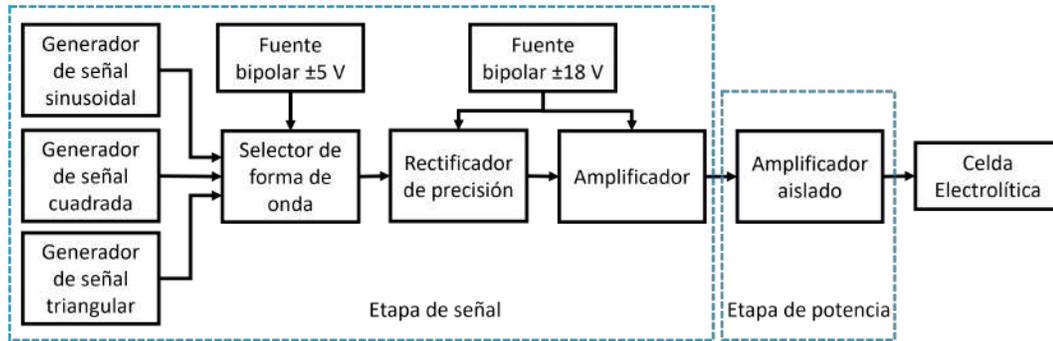


Figura 4.4: Diagrama a bloques de la fuente de alimentación

El selector de forma de onda emplea un multiplexor analógico con matrícula CD4052BC. Este es un circuito multiplexor/demultiplexor de 4 canales controlado digitalmente con dos entradas binarias. El circuito integrado CD4052BC puede manipular señales analógicas con una amplitud máxima de 20 V; en este caso particular, se polarizó con un voltaje de alimentación positivo de 5 V en su terminal VDD, con respecto a su terminal VSS (conectada a la referencia de tierra, GND) y -5 V en su terminal VEE, como se muestra en la Figura 4.5. El ancho de banda de este dispositivo es de hasta 25 MHz, mientras que el tiempo de propagación de la señal es de 60 ns (TEXAS INSTRUMENTS, 2023). En la Figura 4.5 también se aprecia el diagrama electrónico de las conexiones entre las tres formas de onda y el multiplexor CD4052BC; los voltajes de polarización del multiplexor; los terminales del puerto GPIO de la Raspberry Pi 3B empleados para habilitar y deshabilitar el multiplexor y los dos terminales de control A y B.

Se generó la tabla de verdad del multiplexor analógico que se observa en la Tabla 4.1, cada combinación en los dos bits de selección vB y vA indican el canal seleccionado y su respectiva señal. Al tratarse de solo dos bits de selección, el número de canales se limita a cuatro.

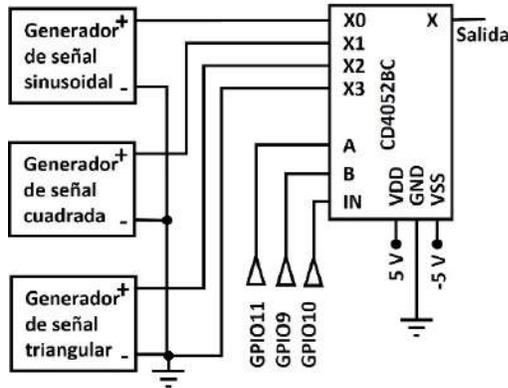


Figura 4.5: Diagrama electrónico del selector de formas de onda.

Tabla 4.1: Tabla de verdad del multiplexor.

vB	vA	Salida
0	0	Forma de onda sinusoidal
0	1	Forma de onda cuadrada
1	1	Forma de onda triangular
1	0	Señal nula (GND)

En la Figura 4.6, se representa el algoritmo de la función para la selección de la forma de onda. Dicha función recibe como parámetro la forma de onda deseada *Forma*; luego se evalúa la variable *Forma* en cuatro casos acorde a la tabla de verdad de la Tabla 4.1: si es igual a cero corresponde a la señal sinusoidal y se le asigna 0 a las variables vA y vB ; si es igual a uno entonces corresponde a la señal cuadrada y se le asigna el valor de 1 a vA y 0 a vB ; si es igual a tres la señal correspondiente es la triangular y se le asigna el valor de 0 a vA y 1 a vB ; en el último de los casos es igual a 3 lo que corresponde a una señal nula o GND con valor de 1 para vA y vB . Para finalizar, a los terminales del puerto GPIO se le asignan los valores de vA y vB finalizando la función. Es indispensable resaltar que la amplitud de la señal de cada forma de onda es de 1 V pico a pico; este valor se estableció en esta magnitud debido a que en las posteriores etapas se modifica su valor y al finalizar se obtendrá una amplitud de entre 3 a 9 V que representa el intervalo propuesto.

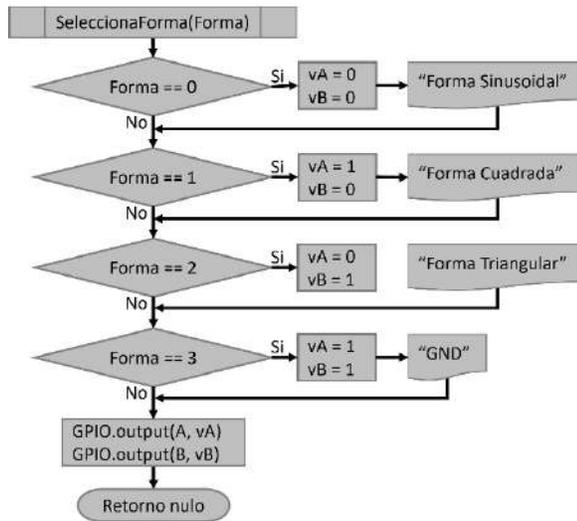


Figura 4.6: Diagrama de flujo de la función para la selección de forma de onda.

La señal seleccionada, se amplifica (o atenúa) de acuerdo con los parámetros de maquinado que se requieren. Para amplificar la señal se realizó un circuito amplificador, con la característica de establecer el factor de ganancia de forma digital. Para esta tarea se empleó el potenciómetro digital X9C103S como resistencia variable para ajustar la ganancia de un amplificador basado en amplificadores operacionales.

El potenciómetro digital trabaja con un voltaje de 5 V, tiene valor resistivo de hasta 10 k Ω , y modifica su valor resistivo a través de 100 puntos de derivación con una resolución de 100 Ω por cada punto (RENESAS, 2019). Cada punto de derivación es accesible desde el terminal variable VW ; el acceso a la posición del punto de derivación se realiza con tres terminales de control: CS es el pin de habilitación, UD establece el decremento o incremento del valor resistivo e INC establece el cambio de la resistencia en 100 Ω activado con un flanco de bajada por cada pulso.

En la Figura 4.7, se presenta el diagrama electrónico del amplificador con ajuste de ganancia mediante el potenciómetro X9C103S, dos resistencias y un amplificador operacional TL082 en configuración no inversora. El factor de ganancia A_v (factor de amplificación) se establece a partir de la relación entre el valor resistivo variable del potenciómetro RP , el valor de resistencia base RB de 5.6 k Ω y el valor de resistencia de $R3$ de 5.6 k Ω ; además, la configuración de amplificador no inversor tiene un coeficiente

de amplificación por defecto de uno, tal como se modela con la ecuación (25). El voltaje de entrada al amplificador (V_{in}) se multiplica por el factor de ganancia A_v para establecer el voltaje de salida (V_{out}), como se expresa en la ecuación (26).

$$A_v = 1 + \frac{R_P + R_B}{R_3} \quad (25)$$

$$V_{out} = (A_v)(V_{in}) \quad (26)$$

Los valores de voltaje de salida requeridos hasta este punto son 2, 2.8 o 3.6 V pico a pico, debido a que se conoce el valor del voltaje de entrada, que es 1 V pico a pico. El factor de ganancia es el mismo que el valor requerido, considerando lo anterior para encontrar el valor resistivo del potenciómetro en los tres casos propuestos se despeja la ecuación (25) y se obtiene la ecuación (27) para calcular el valor resistivo del potenciómetro digital y obtener el factor de ganancia necesario.

$$R_P = (A_v \cdot R_3) - (R_3 + R_B) \quad (27)$$

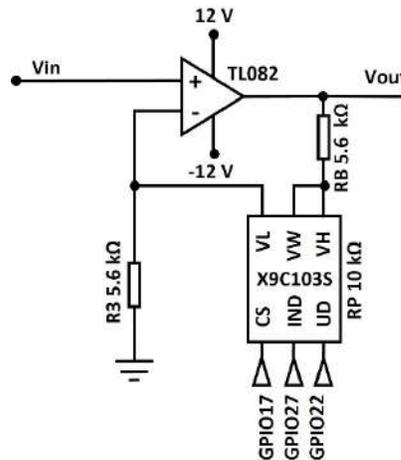


Figura 4.7: Diagrama electrónico del amplificador no inversor.

En la Figura 4.8, se observa el diagrama de flujo de la función para establecer el factor de ganancia a través del valor resistivo del potenciómetro digital. La función recibe como

parámetro la variable V que es el voltaje deseado para el maquinado. Para cada uno de los tres valores propuestos de voltaje se le asigna un valor a t , que es el valor de la resistencia del potenciómetro que se calculó con la ecuación (27), para obtener el voltaje deseado. Un ciclo desde cero hasta el valor requerido t con pasos de 100 manda el pulso de conteo en la terminal INC del potenciómetro.

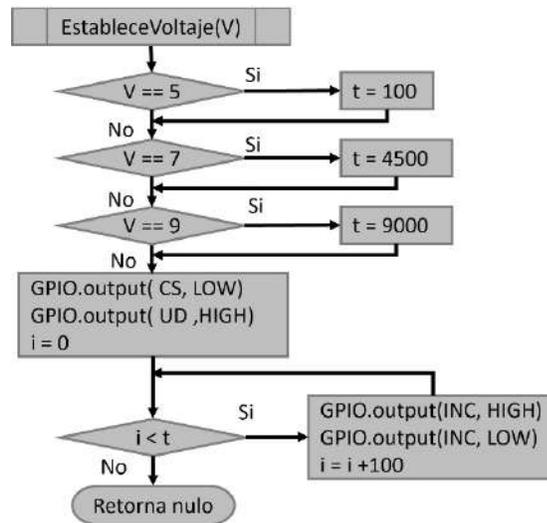


Figura 4.8: Diagrama de flujo de la función para establecer el factor de ganancia del amplificador no inversor.

En el proceso de maquinado electroquímico, la herramienta de trabajo es conectada al polo negativo de la fuente de alimentación y la pieza de trabajo al polo positivo; es decir, se energiza a los electrodos de forma unipolar, para provocar la disolución anódica exclusivamente de la pieza de trabajo. La señal seleccionada por el multiplexor y que posteriormente se amplifica, es una señal con valores tanto positivos como negativos, puesto que es producida mediante un generador de funciones; en otras palabras, una señal bipolar. Por lo tanto, se deben eliminar los valores negativos de la señal, dado que, si se emplea la señal bipolar, durante el ciclo positivo se desgastaría a la pieza de trabajo, pero durante el ciclo negativo se desgastaría a la herramienta.

El proceso de rectificación se efectúa mediante un rectificador de precisión de media onda basado en un amplificador operacional matrícula TL082. Este amplificador operacional tiene un ancho de banda hasta 4 MHz, voltaje de polarización de hasta ± 18 V y una

corriente de salida de 20 mA (STMicroelectronics, 2016). El rectificador de precisión se construyó con un TL082, dos resistencias de 10 k Ω y dos diodos de recuperación rápida 1N4148. En la Figura 4.9, se muestra el diagrama electrónico del rectificador de precisión de media onda. Cabe señalar que la amplitud de la señal del generador de funciones fue de 1 V pico a pico, después es amplificada ya sea a 2, 2.8, o 3.6 V pico a pico y al ser rectificada a media onda en esta etapa, la señal queda con una amplitud de 1, 1.4 o 1.8 V pico. También se puede observar que después de rectificar la señal hay una resistencia RE , este elemento funciona como estabilizador cuando no exista contacto mediante el electrolito en la celda electrolítica.

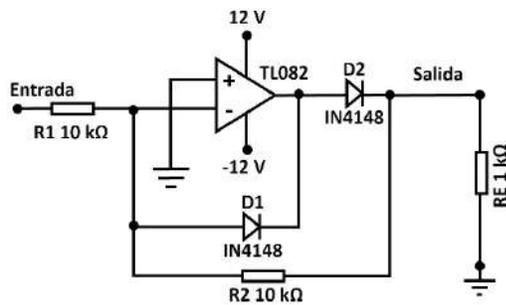


Figura 4.9: Diagrama electrónico del rectificador de precisión de media onda.

Hasta este punto la señal que proveniente de los generadores de funciones ha sido seleccionada con el multiplexor, amplificada y rectificada. Sin embargo, el amplificador operacional TL082 solo suministra una corriente máxima de 20 mA. por lo tanto, no puede ser empleada directamente en el proceso de maquinado, mientras que en la literatura consultada se reportan corrientes de maquinado de hasta 100 mA. Entonces se emplea un amplificador de aislamiento KEYSIGHT modelo 33502A, que tiene una corriente de salida máxima de hasta 200 mA. Además, este instrumento puede amplificar la señal con un factor de 5, en un rango de frecuencia de hasta 100 kHz. Las señales que entran al amplificador aislado tienen una amplitud de 1.0, 1.4 y 1.8 V pico, entonces, la señal de salida del amplificador aislado es de 5, 7 y 9 V pico respectivamente, que se conectan a los terminales de la celda electrolítica.

4.2.3 Sistema de monitoreo

Una vez que el proceso de maquinado comienza, se remueve el material de la pieza de trabajo, por disolución anódica, y en consecuencia la IEG incrementa. Entonces, se requiere ajustar la IEG acercando la herramienta a la pieza de trabajo para compensar el material removido y mantener la IEG lo más cercano al valor inicial. Sin embargo, no se identificó en la literatura una forma factible de medir directamente la IEG para realizar el ajuste correcto. Por lo tanto, se estima su valor a partir de otra variable medible, en este caso la corriente de maquinado.

La corriente de maquinado se mide a partir de una resistencia de muestreo (RM) de 1Ω colocada en serie con la celda electrolítica; así, la corriente que circula por la celda electrolítica es proporcional al voltaje medido en la resistencia, tal como se aprecia en la ecuación (20):

$$VRM = \frac{IRM}{RM} \therefore IRM = \frac{VRM}{RM} \quad (28)$$

Donde:

VRM = Voltaje en la resistencia de muestreo

IRM = Corriente en la resistencia de muestreo

RM = Resistencia de muestreo

La corriente de maquinado es una variable con la cual se puede estimar la IEG, pero se necesita construir el módulo que permita la medición de la corriente a partir de la resistencia RM . En ese sentido, se diseñó e implementó un circuito de monitoreo de la corriente y del voltaje en la celda electrolítica.

La celda electrolítica es energizada con diferentes formas de onda, por lo cual es necesario calcular el valor del voltaje y la corriente en la celda electrolítica. Ambos parámetros están en constante cambio siguiendo la forma de onda que se haya seleccionado; por lo tanto, las mediciones que se realicen serán diferentes dependiendo el instante en el que se realice la medición. Para contrarrestar este inconveniente se optó por usar el valor efectivo o RMS. Para determinar el voltaje RMS, se realiza mediante el cálculo por intervalos de la

forma de onda empleada. Este proceso lo realiza de forma automática el circuito conversor de voltaje RMS a DC matrícula AD536. Este circuito integrado realiza el cálculo del voltaje RMS y retorna un valor de en DC acorde a la señal medida.

El valor en DC resultante es equivalente al RMS de la señal; este debe ser leído y transmitido a la Raspberry Pi. Para realizar esta tarea se empleó el módulo ADS1115, el cual permite una conversión de un valor analógico a digital con una resolución de 16 bits y una tasa de 860 muestras por segundo (TEXAS INSTRUMENTS, 2018). Además, cuenta con el protocolo de comunicación serie I²C (abreviatura de sus siglas en inglés, *Inter Integrated Circuits*), con el que establece una comunicación con la Raspberry Pi para transmitir las lecturas realizadas utilizando dos puertos de comunicación (uno para la corriente y otro para el voltaje).

En la Figura 4.10, se observa el diagrama electrónico del sistema de monitoreo del voltaje y la corriente en la celda electrolítica. Para medir el voltaje en la celda electrolítica se emplea un divisor de voltaje para proteger al ADS1115, debido a que tiene un límite de 5 V como voltaje de entrada, mientras que la polarización se realiza hasta 9 V. Entre el divisor de voltaje y la celda electrolítica se agregó un seguidor de voltaje construido con un amplificador operacional TL082 para que la magnitud medida en la celda electrolítica no se distorsione por el divisor de tensión. En el divisor de tensión se mide la magnitud a través del AD536, al cual, en su terminal de salida, se agregó un capacitor para filtrar la señal analógica, que pasa por el proceso de conversión a un valor digital mediante el ADS1115, en el canal 0. Esta es transmitida a la Raspberry Pi mediante el protocolo I²C.

Por otra parte, la corriente se mide en la resistencia RM, en el cual también se ha colocado un seguidor de voltaje y un amplificador no inversor construido con el amplificador operacional TL082 y dos resistencias (R6 y R7). Esto porque la corriente de maquinado llega a valores de hasta 5 mA y debe ser amplificada la muestra de corriente. La salida del amplificador es retomada con el AD536 y posteriormente por el ADS1115 en el canal 1, y enviada a la Raspberry Pi, tal como se muestra en la Figura 4.10.

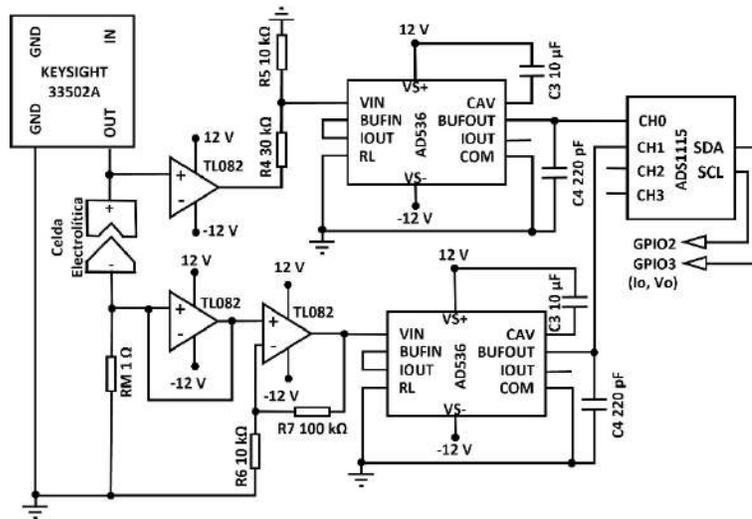


Figura 4.10: Diagrama electrónico del sistema de monitoreo de voltaje y corriente.

La Raspberry Pi recibe las lecturas de voltaje y corriente realizadas por el ADS1115, las cuales son evaluadas y registradas mediante una función escrita en lenguaje de programación Python. Este método retoma las ultimas 5 lecturas realizadas de cada variable y las promedia (a manera de filtro digital); el promedio resultante es multiplicado por el factor de conversión acorde a la ganancia empleada en el ADC1115. En este caso se empleó una ganancia de 1, por lo cual el factor de conversión es un voltaje de referencia de 4.096 V, acorde a la hoja de datos y la resolución alcanzada por 16 bits menos un bit de signo que es igual a 32768; el resultado es redondeado a 5 decimales debido a que en la corriente el valor medido aún debe dividirse entre el factor de amplificación y con los 5 decimales se mantiene una mayor resolución. El método retorna las dos variables tal como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 4.11.

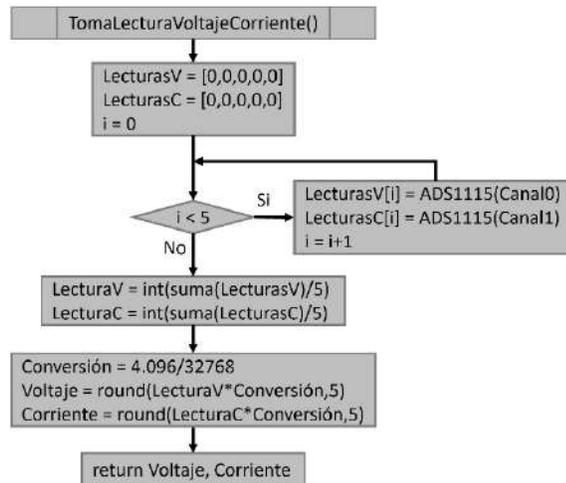


Figura 4.11: Diagrama de flujo de la función para realizar la lectura del voltaje y la corriente.

4.2.4 Sistema de establecimiento de la IEG

La IEG es un parámetro que se establece antes de iniciar el proceso de maquinado electroquímico. Para establecer este parámetro, se parte de las condiciones iniciales donde los electrodos están separados a una distancia desconocida. Se energiza a los terminales de la celda electrolítica y se acerca la herramienta de trabajo a la pieza de trabajo hasta que exista continuidad entre ellos; luego, con ayuda del sistema mecánico, se separan 240 μm para establecer la IEG. Por lo tanto, existe una interacción entre el sistema de monitoreo y el sistema mecánico.

Se requiere determinar cuál de las dos variables monitoreadas es la que proporciona información para establecer continuidad entre la pieza y la herramienta de trabajo, por lo tanto, tomando como base el circuito de monitoreo descrito en la Figura 4.10, se realizó una representación simplificada la cual se observa en la Figura 4.12. Se realiza un análisis en la Figura 4.12 de lo que ocurre en dos posibles casos: cuando la herramienta de trabajo está separada de la pieza de trabajo ambos elementos se comportan como un interruptor abierto tal como se muestra en la Figura 4.12 a); cuando la pieza de trabajo y la herramienta de trabajo hacen contacto, los electrodos se comportan como un interruptor cerrado como se observa en la Figura 4.12 b). En ambos casos, el voltaje en V_o será el mismo que el voltaje de salida del amplificador aislado, mientras que la corriente en I_o es

cero para el caso del inciso a) y un valor diferente de cero para el caso del inciso b). El valor de la corriente detectada cuando existe continuidad entre los electodos es proporcional al voltaje de la fuente de alimentación.

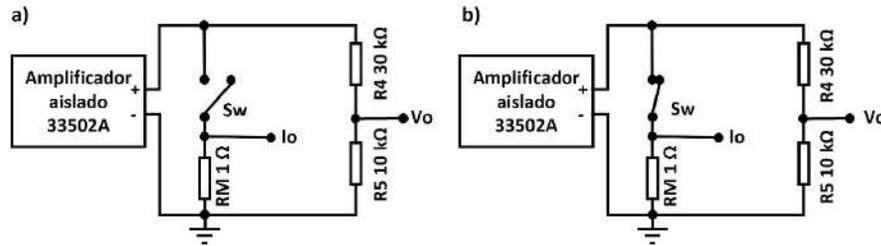


Figura 4.12: Simplificación del diagrama electrónico del sistema de monitoreo cuando: a) no hay contacto entre los electodos, b) los electodos hacen contacto.

Cuando existe contacto entre la herramienta la pieza de trabajo se crea un pico de corriente el cual puede dañar a la herramienta de trabajo o a algún elemento de la fuente de alimentación. Esto es porque para detectar la continuidad eléctrica se deben poner en contacto directo ambos electodos, lo que provoca un cortocircuito. Además, debido a que se han considerado diferentes valores de voltaje y tres formas de onda, el pico de corriente que se requiere identificar para detectar continuidad será diferente, por lo tanto, se consideró emplear una fuente de corriente continua a 5 V con una resistencia de 330 Ω , independiente de la fuente de polarización del electrodo; así, el pico de corriente que circule entre los electodos cuando exista continuidad será de 15 mA como máximo.

En la Figura 4.13, se aprecia la conexión del relé, las dos fuentes y la celda electrolítica. Para realizar el cambio de fuente de alimentación por formas de onda y la fuente de 5 V, se añadió un relevador matricula JQC3F el cual está conectado a la herramienta de trabajo y al pin común del relé, la fuente de alimentación por formas de onda se conectó a la terminal normalmente cerrada del relé, mientras que la fuente de 5V fue conectado a la terminal normalmente abierta. El relé es alimentado con una fuente de 5 V y se acciona mediante el terminal GPIO26 de la Raspberry Pi.

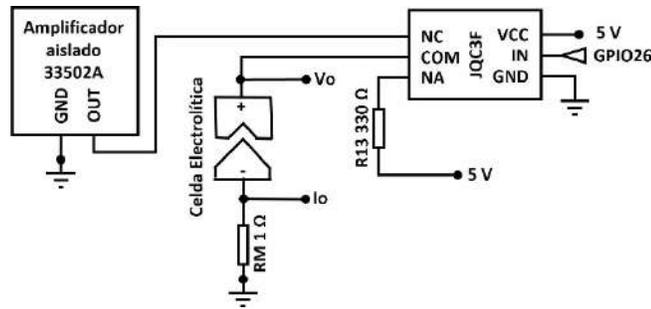


Figura 4.13: Circuito electrónico del cambio de fuente de alimentación mediante relé.

En la Figura 4.14, se aprecia el diagrama de flujo de la función que se escribió para cambiar el estado del relé y en consecuencia la fuente de alimentación; la función recibe como parámetro la variable *Estado*, si *Estado* es igual a uno el relé se desactiva, si el Estado es igual a 2 el relé se activa, la función finaliza sin retornar ningún valor.

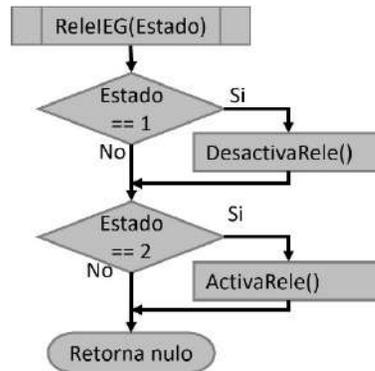


Figura 4.14: Diagrama de flujo de la función para activar y desactivar el relé y cambiar de fuente de alimentación.

Para establecer la IEG inicial a 240 μm , es necesario considerar las siguientes dos condiciones: la pieza y la herramienta de trabajo están separados, se ha activado el relé y la fuente que está polarizando a los terminales de la celda electrolítica es la fuente de 5 V. Se escribió una función para detectar la continuidad y posteriormente separar a los electrodos. En la función se inicializa una variable *Contacto* en False, si *Contacto* es igual a False, entonces se toma la lectura de corriente asignándolo a la variable *C*, si *C* es mayor a 5 mA se cambia el valor de *Contacto* a True, en caso de que *C* sea menor a 5 mA se

acerca $2.5 \mu\text{m}$ la herramienta de trabajo a la pieza de trabajo; si Contacto es igual a True quiere decir que se ha detectado contacto entre los electrodos y se procede a separar $240 \mu\text{m}$ los electrodos. El proceso que realiza la función para establecer la IEG inicial se puede Figura 4.15 mediante un diagrama de flujo.

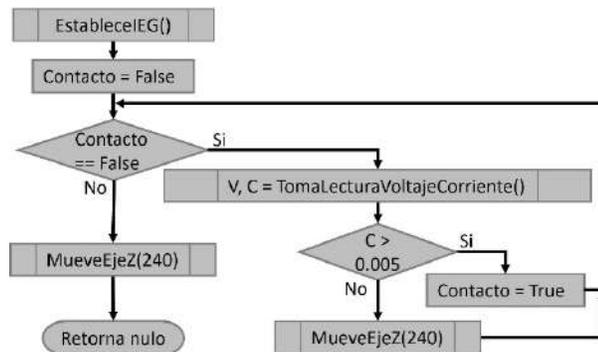


Figura 4.15: Diagrama de flujo para establecer la IEG inicial.

Para estimar la IEG mediante la medición de la corriente se requiere medir la corriente inicial, es decir la corriente que fluye entre los electrodos cuando la separación inicial entre ellos es de $240 \mu\text{m}$, así la corriente inicial va a disminuir gradualmente a medida que la IEG incrementa por efecto del desgaste de la pieza de trabajo. En la Figura 4.16, se observa la una función que se desarrolló para calcular la IEG al iniciar el proceso de maquinado, la función recibe como parámetros las variables: C_a la corriente de maquinado actual, V_a el voltaje actual en la celda electrolítica, A el área de exposición actual, F_o la forma de onda empleada y $AIEG$ un vector de dos elementos (el ajuste de la IEG y un valor de control). La función tiene los factores de conversión kF_o de voltaje pico a voltaje RMS de las formas de onda calculadas previamente y el valor de la resistividad del electrolito empleado r ; además, calcula la conversión de la corriente de maquinado c de mA a Amperes y se calcula la IEG inicial mediante la ecuación (13). Se evalúa si $AIEG$ en la segunda posición es cero, es decir si es la primera vez que se calcula la IEG, a este valor se le calcula y almacena la diferencia $AIEG$ con respecto a la IEG inicial de $240 \mu\text{m}$, se actualiza el valor de control $AIEG$ en la posición dos a uno y se calcula el valor correcto de IEG al restarle la diferencia $AIEG$ a IEG. Se retorna el valor IEG calculado y el valor

de ajuste AIEG, en las siguientes invocaciones de la función se calcula la IEG y se le resta el valor de ajuste *AIEG* que se calculó en la primera invocación de la función.

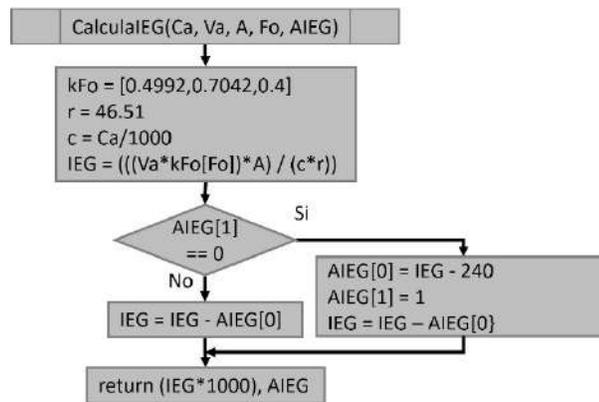


Figura 4.16: Diagrama de flujo para calcular la IEG.

El área de exposición es una variable que va incrementando a medida que se remueve el material de la pieza de trabajo y la herramienta de trabajo se acerca a la pieza de trabajo, en ese sentido se desarrolló una función la cual permite calcular el área de exposición. En la Figura 4.17 se aprecia el diagrama de flujo para calcular el área de exposición, la función recibe como parámetro el descenso de la herramienta de trabajo d , esta variable empieza con un valor de 24, a medida que se ajusta la IEG este valor va disminuyendo hasta alcanzar valores negativos, es decir que la herramienta de trabajo ya ha penetrado a la pieza de trabajo. Se inicializan un vector A de tres posiciones en ceros, este vector almacenará el área de la base de la herramienta de trabajo Aa , el área de las paredes del electrodo Ap y el área de exposición total At en ese orden. Si el descenso de la herramienta de trabajo es menor a cero es decir que la herramienta de trabajo ya realizó un descenso mayor a la IEG inicial y en consecuencia las paredes empiezan a hacer efecto en el área de exposición total, entonces la variable P es calculada al multiplicar el valor del descenso por menos uno para obtener un valor positivo. En caso de que d sea mayor a cero significa que la herramienta de trabajo aún no ha descendido lo suficiente por lo tanto el valor de P es cero y el área de exposición solo era el área de la base de la herramienta de trabajo. Se calculan las áreas correspondientes mediante las ecuaciones (1) y (2) y se almacenan en el vector A , la función finaliza al retornar el valor del área de exposición.

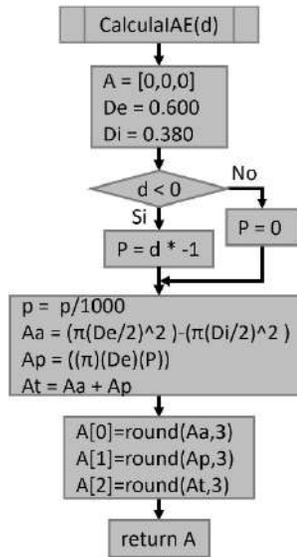


Figura 4.17: Diagrama de flujo para calcular el área de exposición.

4.2.5 Sistema de bombeo y filtración del electrolito

La herramienta de trabajo es un cilindro hueco de acero inoxidable grado AISI 316L, de 600 μm de diámetro externo y 380 μm de diámetro interno. Se emplea una bomba eléctrica para que el electrolito fluya por la parte hueca de la herramienta de trabajo; además, durante el desbaste de la pieza de trabajo se desprende el material metálico que la compone, por lo tanto, el electrolito acumula las pequeñas partículas y no puede volver a emplearse debido a que las impurezas en el electrolito pueden obstruir el flujo a través de la herramienta de trabajo. En consecuencia, se emplea un filtro para retener las partículas y subproductos del proceso y recircular el electrolito usado. El filtro diseñado está compuesto por un recipiente cilíndrico; en la parte superior está la entrada del electrolito usado, el cual cae por efecto de gravedad a dos etapas de filtro. En la parte inferior del recipiente se almacena el electrolito filtrado y es bombeado hacia la celda electrolítica para su reutilización. Después de emplearse en el proceso de desbaste, el electrolito con impurezas es bombeado con una segunda bomba nuevamente hacia el filtro. El ciclo de filtrado del electrolito se aprecia en la Figura 4.18.

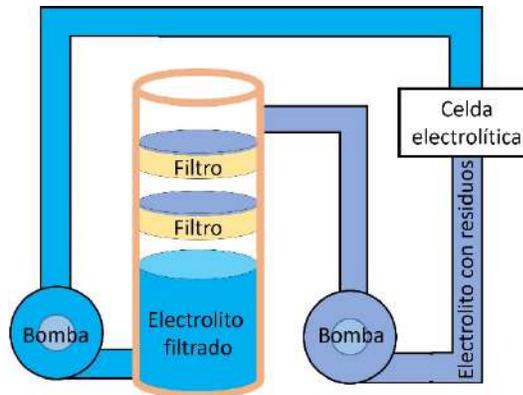


Figura 4.18: Sistema de filtrado del electrolito.

Las bombas para la recirculación del electrolito se alimentan con dos fuentes de voltaje de 12 V independientes. Además, son accionadas de manera independiente mediante un módulo relevador con matrícula JQC3F. Esto permite que sean activadas de manera automática mediante una rutina de control gestionada por un sistema embebido, donde cada relevador se conecta en serie con su fuente de voltaje; en el terminal normalmente abierto del relé se conecta al polo positivo de la fuente y el terminal común es conectado al polo positivo de la bomba. Esta configuración permite que el relevador se comporte como un interruptor. El control del relevador para activar o desactivar las bombas se realiza mediante los terminales GPIO5 y GPIO6 de la Raspberry Pi. El diagrama electrónico se puede apreciar en la Figura 4.19.

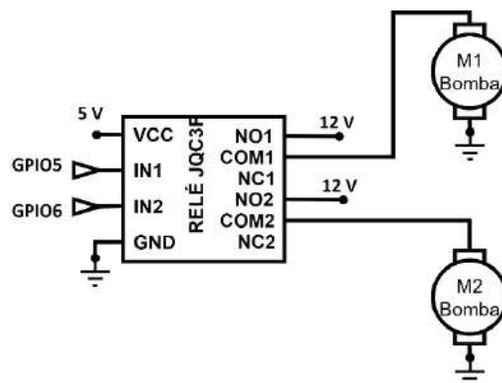


Figura 4.19: Diagrama electrónico del sistema de bombeo del electrolito.

Se escribió una función para activar o desactivar cada una de las bombas, en la Figura 4.20, se muestra el diagrama de flujo que activa o desactiva las bombas, se maneja como una función que recibe dos parámetros: la *Bomba* y el *Estado* si el numero de la bomba es igual al identificador se establece el estado para activar o desactivar la bomba, la función no retorna ningún valor.

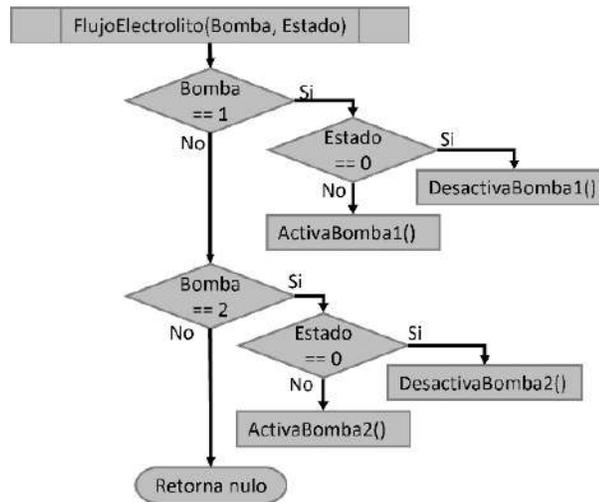


Figura 4.20: Diagrama de flujo de la función para el sistema de bombeo del electrolito.

4.2.6 Integración del sistema embebido

Para poder automatizar el proceso de maquinado electroquímico se requiere realizar la integración de los módulos anteriores en un sistema embebido como se muestra en la Figura 4.21, este sistema se encarga de seleccionar la forma de onda, amplificar la forma de onda seleccionada (etapa de señal), rectificar la forma de onda, amplificar la forma de onda (etapa de potencia), realizar la lectura de voltaje y corriente, mover la herramienta de trabajo sobre la pieza de trabajo.

Después de obtener el circuito completo de la Figura 4.21, se realizó el diseño de la placa de circuito impreso o PCB (de sus siglas en inglés, *Printed Circuit Board*) la cual se puede observar en la Figura 4.22, del lado izquierdo se aprecia las pistas del circuito y del lado derecho las acotaciones de los componentes.

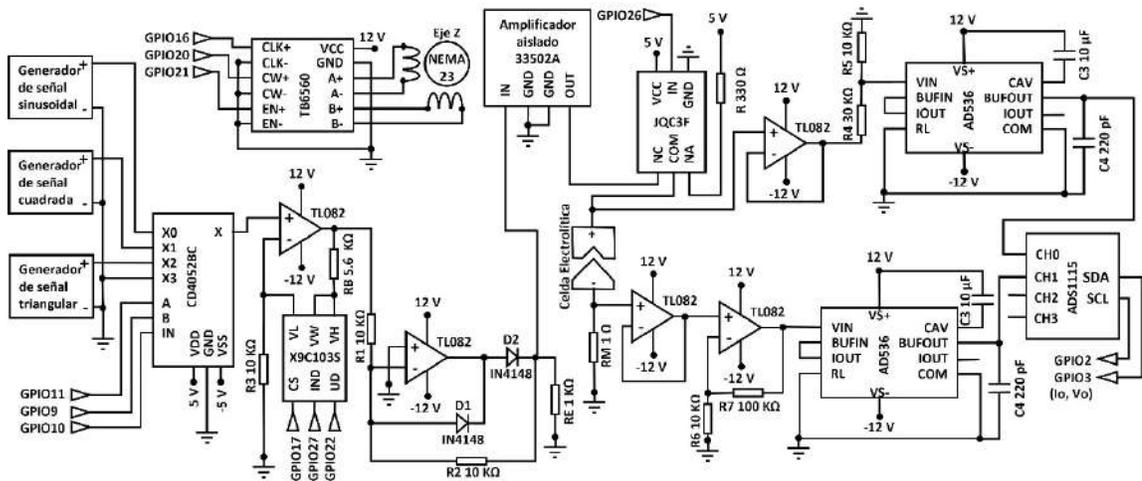


Figura 4.21: Sistema embebido para un proceso ECM.

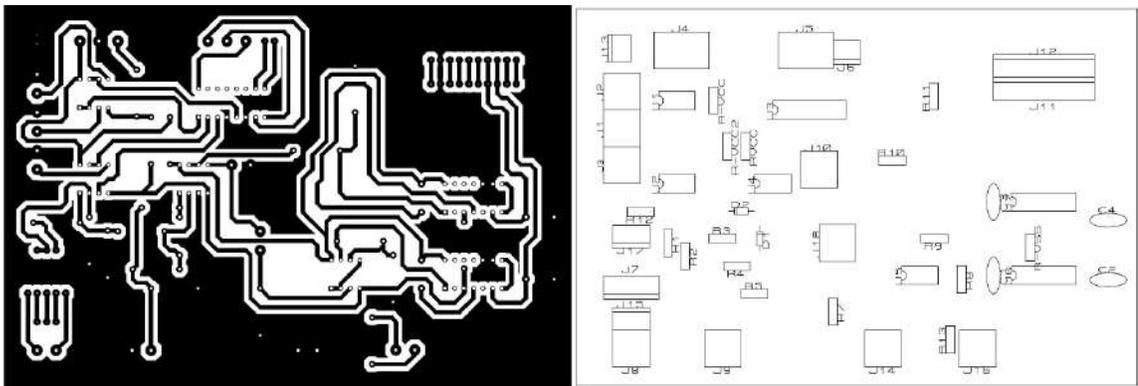


Figura 4.22: Diseño de las pistas de la PCB y acotaciones.

4.2.7 Unidad de control difuso

Las variables que se toman en cuenta para el sistema de maquinado son: error en la pendiente de corriente de maquinado, área de exposición, voltaje y distancia entre electrodos. Donde las primeras dos son consideradas como variables de entrada debido a que establecen el estado del sistema y las dos variables finales son las variables de salida y tienen la capacidad de ajustar el comportamiento de la planta. En la Figura 4.23, se observa el diagrama a bloques del controlador difuso.

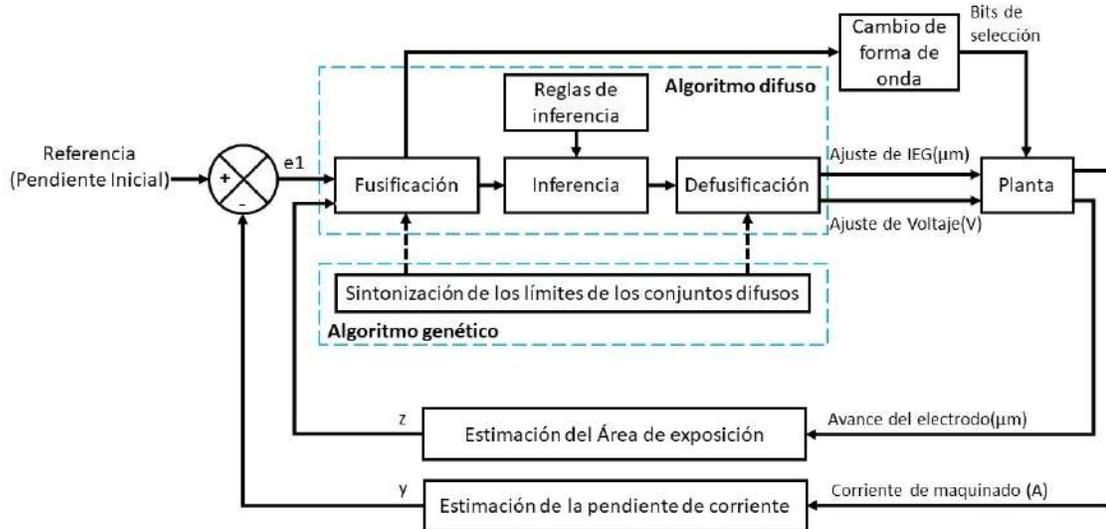


Figura 4.23: Diagrama a bloques del controlador difuso para el proceso de maquinado electroquímico.

Se desarrolló una función para calcular la pendiente de corriente durante el proceso de maquinado, debido a que esta variable permite conocer si la remoción de material se está realizando de manera controlada. La pendiente de corriente se define por la ecuación (29).

$$P = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (29)$$

Donde:

P = Pendiente de corriente.

x_1 = Tiempo inicial del intervalo que define a la pendiente.

y_1 = Corriente de maquinado en el instante x_1 .

x_2 = Tiempo final del intervalo que define a la pendiente.

y_2 = Corriente de maquinado en el instante x_2 .

La función también se emplea para calcular el error en la pendiente de corriente. El diagrama de flujo se visualiza en la Figura 4.24. La función recibe como parámetros seis variables de interés: los cuatro puntos que definen a una pendiente, una variable tipo vector de dos elementos P_i donde en la primera posición se almacena la pendiente inicial y en la

posición dos un valor de referencia y t el porcentaje de tolerancia de similitud de la pendiente inicial con las pendientes que se irán formando a lo largo del proceso de maquinado electroquímico.

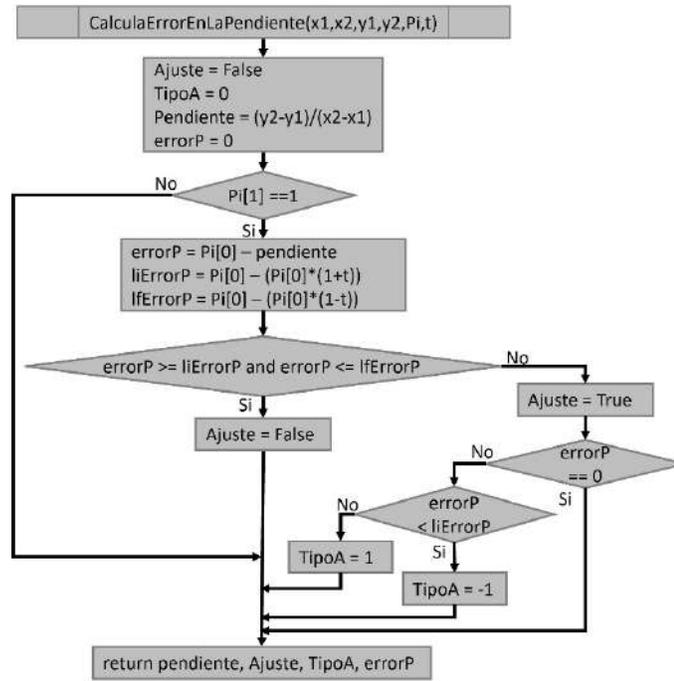


Figura 4.24: Diagrama de flujo del cálculo del error en la pendiente.

Luego, se inicializan las variables: *Ajuste* en false, *TipoA* en cero, *Pendiente* con el cálculo de la pendiente y *errorP* el cual se inicializa en 0. Si P en la posición uno es igual diferente de uno significa que la pendiente inicial no se ha calculado y la función retorna el valor de la pendiente inicial. Así cuando se vuelve a invocar la función, la variable P ya contiene al valor de pendiente inicial, entonces se procede a calcular el error *errorP* en la pendiente inicial con la pendiente actual, además, se calcula los intervalos de tolerancia *liErrorP* que es la pendiente inicial de referencia menos un porcentaje t y el límite *lfErrorP* que es la pendiente de referencia más un porcentaje t .

Si *errorP* se encuentra dentro del intervalo *liErrorP* y *lfErrorP* entonces se considera a la pendiente actual como una pendiente similar a la pendiente inicial y no se requiere ajuste, entonces finaliza la función. Si el *errorP* se encuentra fuera de los límites *liErrorP* y

$lfErrorP$ entonces se requiere ajuste, por lo tanto, se requiere buscar el tipo de ajuste ya sea negativo o positivo comparando a $ErrorP$ con $liErrorP$ y $lfErrorP$ respectivamente.

Para comprender el proceso de maquinado de orificios mediante el sistema desarrollado basado en un controlador difuso se realizó el diagrama de flujo de la Figura 4.25, donde se enuncian las tareas desarrolladas tanto por el usuario como por el sistema de control para realizar una perforación.

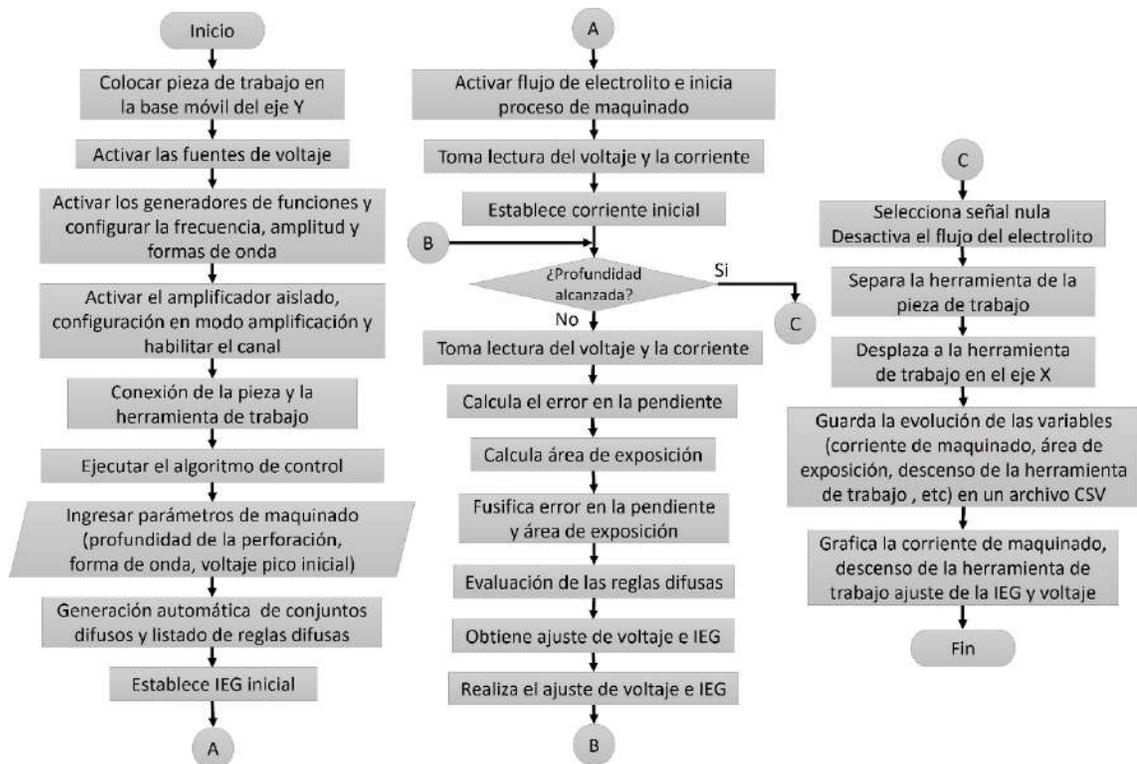


Figura 4.25: Diagrama de flujo del proceso de maquinado electroquímico mediante el controlador difuso.

Conjuntos difusos de las variables

En la lógica difusa, el primer paso es la conversión de un valor numérico a un valor difuso, denotado por el grado de pertenencia a una variable lingüística, en el proceso denominado fusificación. Para poder fusificar una variable, se requiere establecer el número de conjuntos difusos de cada variable, así como de su respectiva variable lingüística. Las variables que se han tomado en cuenta para manipular al controlador difuso y realizar el

maquinado de manera controlada son: error en la pendiente de corriente, área de exposición, ajuste de voltaje y distancia entre electrodos.

En la Tabla 4.2, se observan las características de cada variable, si es de entrada o salida en el controlador, el nombre de la variable, la etiqueta de cada conjunto, así como el rango normalizado y el tipo de función empleada para cada una. Las funciones de membresía empleadas en el controlador que fueron descritas en el apartado 3.2 son: Gaussianas Z para denotar una pertenencia del 100 al 0 % al conjunto en cuestión, la función Gaussiana describe una pertenencia de 100 % en el centro del conjunto y disminuye a ambos lados, la función de Gaussiana S describe una pertenencia que va del 0 al 100 %.

Tabla 4.2: Análisis de las variables de entrada y salida del controlador difuso.

Tipo de variable	Variables	Rango normalizado	Etiqueta	Función
Entrada	Error en la pendiente de corriente (dI)	-1 – 0.0	Negativa	Gaussiana Z
		-0.1 – 0.1	Cero	Gaussiana
	Área de exposición (AE)	0.0 – 1	Positiva	Gaussiana S
		0 – 0.45	Inicial	Gaussiana Z
		0.4 – 0.80	Intermedia	Gaussiana
Salida	Ajuste de voltaje (gV)	0.75 – 1	Final	Gaussiana S
		0 – 0.5	Bajo	Gaussiana Z
		0.4 – 0.6	Normal	Gaussiana
	Ajuste de la distancia entre electrodos (IEG)	0.5 – 1	Alto	Gaussiana S
		-1 – 0.0	Cerca	Gaussiana Z
		-0.1 – 0.1	Estándar	Gaussiana
		0.0 - 1	Lejos	Gaussiana S

El monitoreo de la corriente de maquinado permite calcular la pendiente de corriente o derivada de la corriente, posteriormente se calcula el error en la pendiente mediante la función descrita en la Figura 4.24, desde un punto de vista difuso se puede dividir la variable error en la pendiente de corriente en tres conjuntos que dividen al universo de discurso de la variable y establece una magnitud asociada a una variable lingüística para denotar una característica.

Los tres conjuntos difusos de la variable error en la pendiente de corriente se pueden apreciar en la Figura 4.26. Las variables lingüísticas seleccionadas son: *Negativa*, la cual establece una pendiente negativa, es decir que la derivada de la corriente tiene una

pendiente negativa y por lo tanto que la remoción de material se refleja como una pendiente negativa; *Cero* establece un cambio nulo en la pendiente de corriente, es decir no existe desgaste de material y por lo tanto se requiere un ajuste en la distancia entre electrodos; *Positiva* establece un cambio positivo en la pendiente de corriente. Para normalizar los datos del error en la pendiente de corriente en un rango de -1 a 1 se empleó la ecuación (30).

$$x_n = \frac{x}{U_{max}} \quad (30)$$

Donde:

x_n = Dato normalizado

x = Dato a normalizar

U_{max} = Máximo valor del universo de discurso de la variable

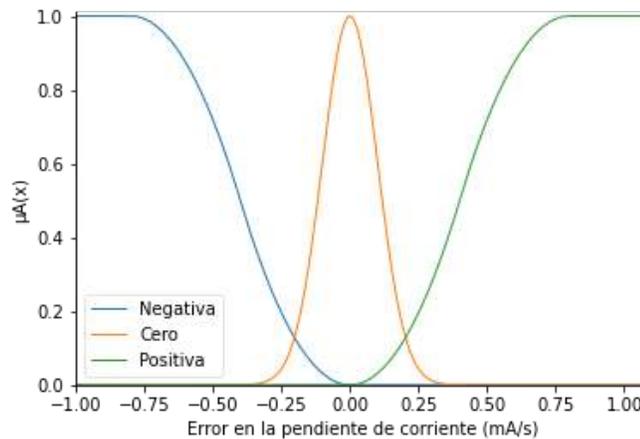


Figura 4.26: Conjuntos difusos de la variable error en la pendiente de corriente.

El área de exposición del electrodo se refiere a la superficie que queda expuesta entre la herramienta de trabajo y la pieza de trabajo. Al inicio del maquinado el área de exposición solo es la base del cilindro hueco de la herramienta de trabajo, pero a medida que la pieza

de trabajo es desgastada, la herramienta de trabajo penetra en la pieza de trabajo y al área inicial se le va sumando las paredes del cilindro en función del desgaste realizado.

Con lo anterior en cuenta el área de exposición puede denotarse por tres conjuntos difusos y sus variables lingüísticas: *Inicial*, cuando el proceso apenas comienza y el área expuesta solo es la base del cilindro; *Intermedia*, cuando la profundidad alcanzada aún no ha llegado al objetivo; *Final*, cuando la profundidad alcanzada es la estipulada. La ecuación (31) se empleó para normalizar los datos en un rango de 0 a 1 y los conjuntos difusos del área de exposición para una perforación de 100 μm se aprecia en la Figura 4.27.

$$x_n = \frac{x - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} \quad (31)$$

Donde

x_n = Área de exposición normalizada.

x = Valor del área de exposición sin normalizar

U_{max} = Máximo valor del universo de discurso

U_{min} = Mínimo valor del universo de discurso

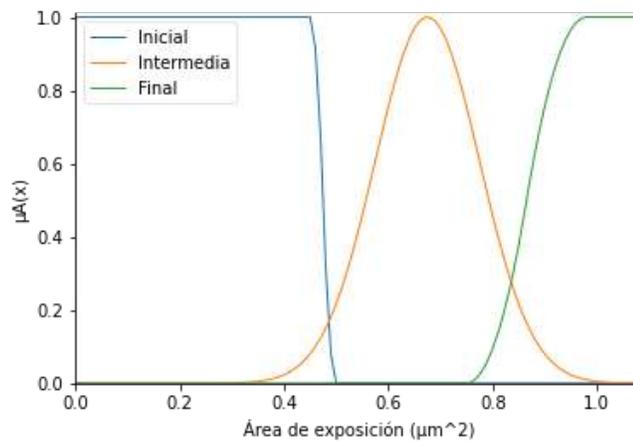


Figura 4.27: Conjuntos difusos de la variable área de exposición para una perforación de 100 μm .

El porcentaje del área de exposición inicial con respecto al área de exposición total que representa al universo del discurso depende de la profundidad de la perforación, es decir si la perforación deseada es menor a $240\ \mu\text{m}$ la herramienta de trabajo no superará la IEG inicial y por lo tanto el área de exposición siempre será la inicial que en este caso solo es la base del cilindro hueco y cuando la perforación deseada es mayor a $240\ \mu\text{m}$ y a medida que incrementa este valor, el porcentaje de la superficie de exposición inicial con respecto al área total va disminuyendo.

Se desarrolló una función que permite calcular y establecer los porcentajes acorde a la profundidad deseada que se aprecia en la Figura 4.28. La función recibe la variable PD es decir la profundidad deseada del maquinado en cuestión, se requiere emplear la función para calcular el área de exposición descrito en la Figura 4.17, esa función al invocarla y pasarle el valor de PD retorna un vector A de tres áreas: la base de la herramienta, las paredes y la total. Con respecto al área total, se calculan los porcentajes de: pAb que es la base de la herramienta de trabajo, pAp las paredes de la herramienta tomando en cuenta una profundidad PD , pG de la función Gaussiana y de pS que es de la función S. Con los porcentajes calculados se distribuyen y se normalizan (mediante la ecuación (31)) los intervalos de la función Gaussiana Z ($Z1$ y $Z2$), Gaussiana (G) y Gaussianas S ($S1$ y $S2$) empleadas y como último paso se genera un vector de nueve elementos con los intervalos de los conjuntos difusos normalizados que se emplearan en el controlador difuso.

Por otro lado, la variable ajuste en la distancia entre electrodos (IEG), permite ajustar la separación entre la pieza y la herramienta de trabajo, por ejemplo, cuando se establece la IEG antes de iniciar el proceso de maquinado o mantener la separación mientras se desgasta a la pieza de trabajo. Mantener la distancia entre electrodos tiene tres determinados valores: *Cerca*, cuando la IEG es menor a los $240\ \mu\text{m}$ iniciales; *Estándar*, cuando la IEG permanece en valores cercanos a los $240\ \mu\text{m}$ iniciales y *Lejos*, cuando la IEG es mayor a los $240\ \mu\text{m}$ iniciales. Los conjuntos difusos de la variable ajuste de la distancia entre electrodos se pueden apreciar en la Figura 4.29. Cabe señalar que se empleó la ecuación (30) para normalizar los datos en un intervalo de -1 a 1.

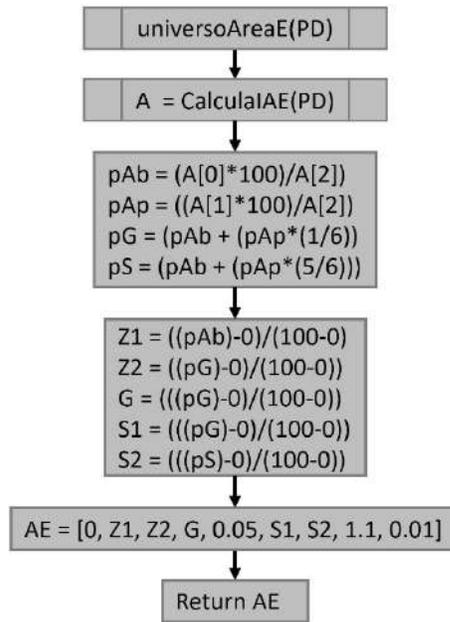


Figura 4.28: Diagrama de flujo para calcular los límites de los conjuntos difusos del área de exposición acorde a la profundidad del maquinado.

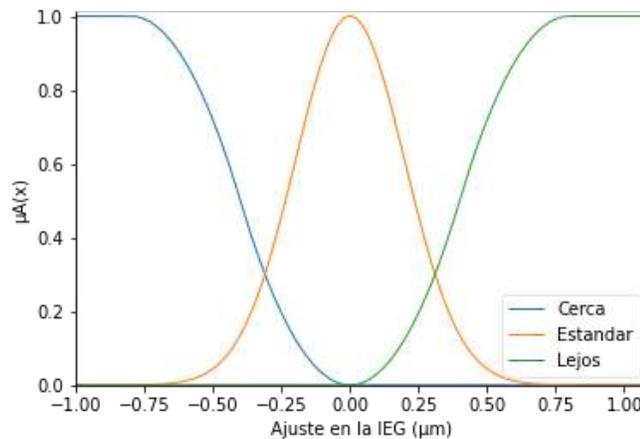


Figura 4.29: Conjuntos difusos de la variable ajuste en la IEG.

La variable ajuste de voltaje permite modificar la tensión que se le aplica a la celda electrolítica, los valores de tensión usualmente se modifican cuando el área de exposición es considerable y por lo tanto la corriente tiene una mayor área de dispersión. Los conjuntos difusos de la variable ajuste de voltaje se pueden apreciar en la Figura 4.30, se

eligieron tres variables lingüísticas: *Bajo*, cuando la pendiente de corriente es grande; *Normal*, cuando la pendiente de corriente se mantiene dentro del valor tolerable y *Alto*, cuando la derivada de la corriente es pequeña. Para normalizar los valores de voltaje en un rango de 0 a 1 considerando un rango de voltaje de 5 a 9, se empleó la ecuación (32).

$$x_n = \frac{x - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} \quad (32)$$

Donde

x_n = Voltaje normalizado

x = Valor de voltaje sin normalizar

U_{max} = Máximo valor del universo de discurso

U_{min} = Mínimo valor del universo de discurso

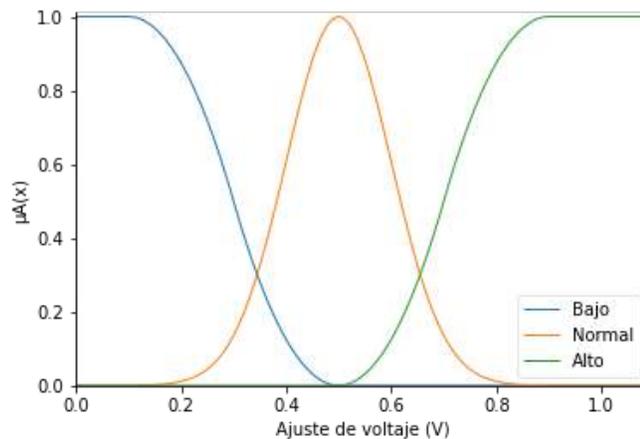


Figura 4.30: Conjuntos difusos de la variable ajuste de voltaje.

La variable forma de onda no puede considerarse una variable difusa debido a que no se puede fragmentar una forma de onda, pero podría considerarse pseudo difusa, además la variable MRR o velocidad de remoción es el volumen de material removido en cierto lapso y está ligado a la forma de onda debido a que cada forma de onda produce diferente velocidad de remoción. Debido a que se emplean tres formas de onda asociadas a una variable lingüística que establece el tipo de remoción, estas pueden ser: *suave*, debido a

que la forma de onda triangular produce la menor remoción; *moderada*, asociado a la forma de onda sinusoidal la cual produce una remoción media entre la triangular y la cuadrada; *agresiva*, es la remoción más rápida realizada por la forma de onda cuadrada.

Reglas difusas del controlador

Para enunciar las reglas difusas de operación del controlador difuso se debe considerar a las dos variables de entrada: el error en la pendiente de corriente y el área de exposición, junto con dos variables de salida: el voltaje de polarización y distancia entre electrodos para modelar de manera efectiva el sistema de control. Por lo tanto, las reglas difusas del controlador son expresiones lógicas basadas en el conocimiento experto que establece cómo se relacionan las entradas con las salidas, mediante términos lingüísticos permitiendo al controlador tomar decisiones basadas en situaciones reales y cambiantes, adaptándose a la variabilidad y la incertidumbre inherentes en los procesos.

Para poder analizar a cada una de las reglas difusas que se forman al combinar los conjuntos de las dos variables de entrada y establecer la salida a partir de los conjuntos del consecuente en voltaje, se recurre a una matriz de asociación difusa (Civelek, 2020). En la Tabla 4.3, se aprecia la matriz de asociación difusa, donde las columnas representan las etiquetas lingüísticas del error en la pendiente, mientras que las filas corresponden con las etiquetas lingüísticas del área de exposición; en los cruces entre fila y columna se observa la etiqueta lingüística del voltaje.

Tabla 4.3: Matriz de asociación difusa del consecuente voltaje.

		Error en la pendiente (EP)		
		<i>Negativa</i>	<i>Cero</i>	<i>Positiva</i>
Área de exposición (AE)	<i>Inicial</i>	<i>Normal</i>	<i>Bajo</i>	<i>Bajo</i>
	<i>Intermedia</i>	<i>Alto</i>	<i>Normal</i>	<i>Bajo</i>
	<i>Final</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Normal</i>

De manera similar al proceso anterior, se empleó la matriz de asociación difusa de la Tabla 4.4 para establecer los consecuentes de la variable IEG.

Tabla 4.4: Matriz de asociación difusa del consecuente IEG.

		Error en la pendiente (EP)		
		<i>Negativa</i>	<i>Cero</i>	<i>Positiva</i>
Área de exposición (AE)	<i>Inicial</i>	<i>Cerca</i>	<i>Estándar</i>	<i>Lejos</i>
	<i>Intermedia</i>	<i>Cerca</i>	<i>Estándar</i>	<i>Lejos</i>
	<i>Final</i>	<i>Cerca</i>	<i>Estándar</i>	<i>Lejos</i>

De la Tabla 4.3, cada una de las intersecciones de los tres conjuntos difusos de la variable error en la pendiente y los tres conjuntos difusos de la variable área de exposición da como resultado nueve reglas difusas y de la Tabla 4.4, las intersecciones de los conjuntos del error en la pendiente y los conjuntos del área de exposición da como resultado nueve reglas más, estas reglas se enuncian de R1 a R9 y de R10 a R18 respectivamente:

- R1 = Si EP es *Negativa* y AE es *Inicial* entonces V es *Normal*
- R2 = Si EP es *Negativa* y AE es *Intermedia* entonces V es *Alto*
- R3 = Si EP es *Negativa* y AE es *Final* entonces V es *Alto*
- R4 = Si EP es *Cero* y AE es *Inicial* entonces V es *Bajo*
- R5 = Si EP es *Cero* y AE es *Intermedia* entonces V es *Normal*
- R6 = Si EP es *Cero* y AE es *Final* entonces V es *Alto*
- R7 = Si EP es *Positiva* y AE es *Inicial* entonces V es *Bajo*
- R8 = Si EP es *Positiva* y AE es *Intermedia* entonces V es *Bajo*
- R9 = Si EP es *Positiva* y AE es *Final* entonces V es *Normal*
- R10 = Si EP es *Negativa* y AE es *Inicial* entonces G es *Cerca*
- R11 = Si EP es *Negativa* y AE es *Intermedia* entonces G es *Cerca*
- R12 = Si EP es *Negativa* y AE es *Final* entonces G es *Cerca*
- R13 = Si EP es *Cero* y AE es *Inicial* entonces G es *Estándar*
- R14 = Si EP es *Cero* y AE es *Intermedia* entonces G es *Estándar*
- R15 = Si EP es *Cero* y AE es *Final* entonces G es *Estándar*
- R16 = Si EP es *Positiva* y AE es *Inicial* entonces G es *Lejos*
- R17 = Si EP es *Positiva* y AE es *Intermedia* entonces G es *Lejos*
- R18 = Si EP es *Positiva* y AE es *Final* entonces G es *Lejos*

4.2.8 Algoritmo genético

Un desafío de los controladores difusos es el ajuste de los intervalos en sus conjuntos difusos. Esta tarea normalmente se realiza empíricamente, lo que puede afectar en la precisión del controlador Leyva Bravo (2018). Por otro lado, un algoritmo genético es una técnica de optimización inspirada en la teoría de la evolución de las especies, donde a partir de una población inicial, es decir las posibles soluciones, las cuales se seleccionan, se cruzan, se mutan y se reemplazan en la población original con el fin de optimizar un problema (Lau, et al., 2015). En ese sentido los algoritmos genéticos se presentan como una herramienta de apoyo en la optimización y búsqueda de nuevas soluciones de manera metódica para el ajuste de intervalos de los conjuntos difusos del controlador difuso.

Codificación del cromosoma

Los algoritmos genéticos están basados en una población, donde cada individuo de la población es representado por un cromosoma, y el cromosoma es la representación de una posible solución del problema. El objetivo del algoritmo genético consiste en encontrar los intervalos de cada conjunto difuso de las variables del controlador, donde cada límite del intervalo es representado por un número. Por lo tanto, se trata de una codificación real, es decir, que cada gen del cromosoma está representado por un número real.

En la Tabla 4.5 se aprecia la forma en que se codificó un cromosoma, donde cada gen es un intervalo de cada conjunto difuso de cada variable del controlador. Cada variable del controlador tiene dos genes ($z1$ y $z2$) que representan los intervalos de una función Gaussiana Z ; dos genes (g y m) donde g representa el punto medio de la función Gaussiana y m la media de la función Gaussiana; dos genes ($s1$ y $s2$) que representan los límites de una función Gaussiana S .

Tabla 4.5: Representación de un cromosoma con los límites de los conjuntos difusos de las variables del controlador.

Derivada de corriente (dI)						Área de exposición (AE)						Distancia entre electrodos (IEG)						Voltaje (V)					
z1	z2	g	m	s1	s2	z1	z2	g	m	s1	s2	z1	z2	g	m	s1	s2	z1	z2	g	m	s1	s2

Función objetivo

En los algoritmos genéticos se requiere establecer una función de optimización o función objetivo, esta función objetivo se irá mejorando a través de las generaciones hasta encontrar la mejor solución. Una forma de evaluar el sistema de maquinado electroquímico es por las características del maquinado que para esta investigación en particular se eligieron el sobre corte y el error en la profundidad, dándole un mayor peso a este último. El error en la profundidad es la diferencia entre la profundidad estipulada antes de realizar el maquinado y la profundidad obtenida al finalizar el maquinado, teniendo en cuenta que se busca minimizar el error en la profundidad de maquinado para que la profundidad obtenida sea similar o igual a la profundidad estipulada. De esta manera el error en la profundidad es el principal parámetro que determina el desempeño del controlador difuso y será optimizado con ayuda del algoritmo genético.

Para establecer el parámetro de desempeño o, en otras palabras, la función objetivo del algoritmo genético, se puede calcular el inverso del error MAPE del error en la profundidad, de modo que el algoritmo busca minimizar el error MAPE de la población. Al minimizar el error y calcular el inverso del error MAPE, la función objetivo se mejora a través de las generaciones. La función objetivo se formula mediante la ecuación (33) la cual establece que es el inverso del error MAPE, y el cálculo del error MAPE se realiza con la ecuación (23), tal como lo proponen García Mejía et al. (2022).

$$Funcion\ objetivo = \frac{1}{MAPE} \quad (33)$$

Población inicial

Para poder emplear un algoritmo genético para la reducción del error en la profundidad de la perforación, es necesario realizar una serie experimental de perforaciones con diferentes intervalos en las variables de entrada tomando en cuenta las restricciones propias de las variables. Por lo tanto, el algoritmo genético está diseñado para trabajar con una población inicial basado en maquinados previos para tener una base real como punto de partida.

En la Figura 4.31, se puede apreciar un ejemplo de población inicial, se observa un listado desde el cromosoma 0 al cromosoma 27, cada cromosoma está conformado por 25 genes enumerados de 0 a 24. El cromosoma está dividido en 4 bloques de 6 genes para representar a los intervalos de los conjuntos difusos de las cuatro variables del controlador, además, se ha calculado el error MAPE de la población inicial de acuerdo con el error de cada cromosoma identificado con el gen 24. Cabe mencionar que los genes sombreados no cambian de valor debido a las restricciones consideradas, para el caso de los genes Z2, G y S1 de las tres variables tienen el mismo valor para garantizar un solapamiento entre sus conjuntos difusos y garantizar la pertenencia de la variable en cuestión a mínimo dos conjuntos difusos que es la premisa de la lógica difusa tal como lo indica (Feltan & Luis Caballero, 2016), mientras que los genes *m* de las tres variables denotan la media de la función Gaussiana empleada para una pertenencia ideal, en el trabajo de Nopalera Angeles (2021) se sugiere un valor pequeño en este caso se propuso un 10 %. Para el caso de los genes del área de exposición están restringidos debido a que dependen de la profundidad deseada tal como se describió en el apartado 4.2.7.

N	dCorriente						Area de Exposición						IEG						Voltaje						24
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
	Z1	Z2	G	m	S1	S2	Z1	Z2	G	m	S1	S2	Z1	Z2	G	m	S1	S2	Z1	Z2	G	m	S1	S2	
1	0.2	0	0	0.1	0	0.2	0.5	0.5	0.8	0.1	0.8	1	0.2	0	0	0.1	0	0.2	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.4	0.267
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
27	0.4	0	0	0.1	0	0.4	0.5	0.5	0.8	0.1	0.8	1	0.4	0	0	0.1	0	0.4	0.2	0.5	0.5	0.1	0.5	0.2	0.19
																									MAPE
																									0.2524

Figura 4.31: Representación de la población inicial de 27 cromosomas de 25 genes cada uno

Resulta conveniente guardar el listado de los 27 cromosomas con 25 genes de la Figura 4.31, en un archivo CSV, que denomina un tipo de archivo que guarda un listado de valores separados por comas (de las siglas en inglés, *Comma Separated Values*). Este archivo es procesado posteriormente para generar la población inicial en el algoritmo genético. Para poder desarrollar el algoritmo genético que sintonice los límites de los conjuntos difusos del controlador aplicado en el maquinado electroquímico, cada paso de este algoritmo ha sido desarrollado mediante funciones en el lenguaje de programación Python.

La primera etapa del algoritmo genético consiste en generar la población inicial; en este caso específico, la población inicial son los resultados de la serie experimental del apartado 5.3.5, que fueron guardados en el archivo CSV, por lo tanto, se realizó la función para leer el archivo CSV y crear un arreglo con los datos del archivo.

La función, mostrada en la Figura 4.32 mediante su diagrama de flujo, requiere de una variable llamada *Archivo* la cual carga el archivo que lleva por nombre *DatosGenetico.csv*; posteriormente se extrae el número de filas y columnas del archivo CSV y los guarda en las variables *Filas* y *Columnas*; se crea una variable de tipo arreglo (matriz) llamada *Población* con el número de filas (cromosomas) y columnas (genes) iguales a *Filas* y *Columnas*; se inicializa una variable contador *i* para recorrer las filas. Si *i* es mayor a *filas* se han asignado todos los cromosomas del archivo a la variable *Población* y la función termina retornando la variable *Población*. En caso de que *i* sea menor o igual a *filas* quiere decir que existen cromosomas por agregar al arreglo *Población*, por lo tanto, se crea una variable llamada *Fila* que será igual a la fila (cromosoma) indexada en la variable *i* y se inicializa la variable *j* en cero para iterar a las columnas; si *j* es menor o igual a *Columnas* se crea una variable *Valor* la cual carga el valor del gen en la posición *j*, la variable *Valor* es cargada en el arreglo *Población* en la posición *i j*, se incrementa la variable *j* para leer el siguiente gen en la próxima iteración; si *j* es mayor a columnas (genes) se incrementa la variable *i* para que en la siguiente iteración se lea una nueva fila (cromosoma).

Después de leer los datos del archivo CSV y crear la población inicial, se requiere evaluar el error MAPE de la población, por lo cual se desarrolló una función que realiza la tarea en cuestión. En la Figura 4.33, se aprecia el diagrama de flujo de la función para calcular el error MAPE de la población, la función recibe como parámetro la variable *P* que es la población, se inicializa la variable *MAPE* en cero, así como la variable *E* que es para almacenar la sumatoria, se extrae el tamaño de la población *T* y se inicializa la variable de iteración *i* en 0. Si *i* es menor o igual a *T*, a la variable *E* se le suma el valor del gen 24 del cromosoma que es el error alcanzado por el cromosoma y se incrementa a la variable *i*. Si *i* es mayor a *T*, el error *MAPE*, será igual a la sumatoria de los errores entre *T*, se redondea el resultado y la función termina retornando el valor de *MAPE*.

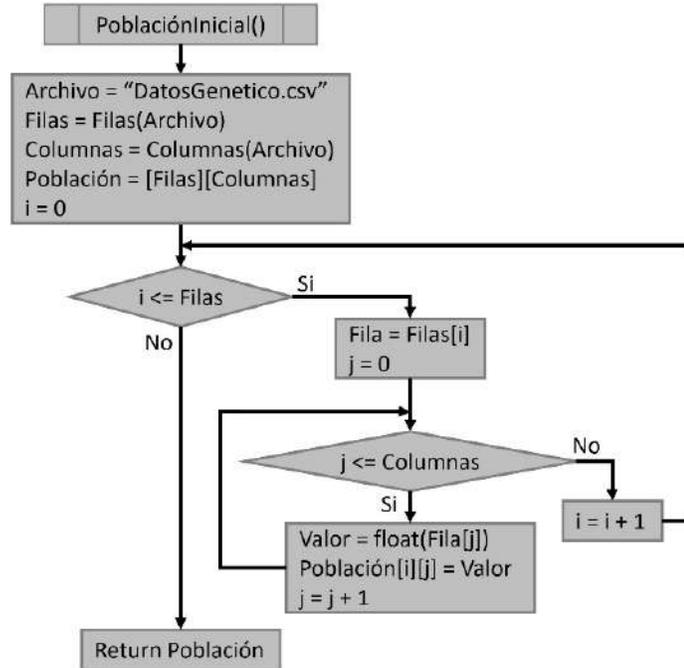


Figura 4.32: Diagrama de flujo de la función para cargar la población inicial de un algoritmo genético desde un archivo CSV.

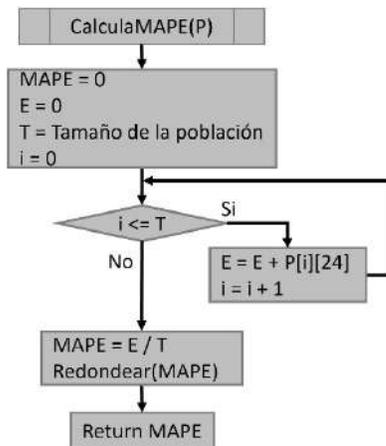


Figura 4.33: Diagrama de flujo para evaluar el desempeño de la población del algoritmo genético mediante el cálculo del error MAPE.

Selección de padres por método de ruleta

La etapa de selección juega un papel fundamental en el proceso de evolución y mejora de las soluciones. La selección es el mecanismo mediante el cual se eligen individuos de la población actual para convertirse en padres de la siguiente generación. Existen diversas técnicas de selección, cada una con sus propias ventajas y características. En este trabajo, se ha optado por utilizar la técnica de selección de la ruleta, también conocida como “selección proporcional” (Gutiérrez Reina, et al., 2020). Esta técnica asigna una probabilidad de selección a cada individuo de la población con base en su aptitud o valor de adaptación. Cuanto mayor sea la aptitud de un individuo, mayor será la probabilidad de que sea seleccionado como padre para la siguiente generación. De esta manera, los individuos más aptos tienen una mayor probabilidad de transmitir sus características favorables a las siguientes generaciones, lo que permite un proceso evolutivo más efectivo y dirigido hacia soluciones óptimas. A través de la técnica de selección de la ruleta, se busca maximizar el rendimiento del algoritmo genético y obtener soluciones competitivas en el problema planteado.

Se desarrolló una función, mostrada en el diagrama de la Figura 4.34, para realizar la selección de los cromosomas mediante el método de la ruleta, la cual recibe como argumento la variable P que es el arreglo que contiene a todos los cromosomas de la población. La función se puede analizar en tres partes, primero al calcular el desempeño de los cromosomas, se inicializa una variable T que es el tamaño de la población (cromosomas de la población), la variable de tipo vector de tamaño T llamada *Desempeño*, la variable *DesempeñoTotal* inicializada en 0 al igual que la variable de iteración i . Mientras que i sea menor o igual a T , en el vector *Desempeño* en la posición i se almacena el inverso del error en la profundidad del cromosoma i , en seguida a la variable *DesempeñoTotal* se le suma el desempeño calculado previamente, en seguida se incrementa la variable i .

La segunda parte calcula la probabilidad de selección de cada cromosoma, si la variable i es mayor a T se crean tres vectores de tamaño T : el vector p es la probabilidad del cromosoma, el vector q es la probabilidad acumulada y el vector a es para un número aleatorio y la variable iterable i se establece en 0. Si i es menor o igual a T , se crea una

variable auxiliar $AuxD$ la cual calcula la probabilidad del cromosoma entonces $AuxD$ es asignado al vector de probabilidad del cromosoma en la posición de la variable i , enseguida se calcula la probabilidad acumulada, posterior a esto, se genera un numero aleatorio y se guarda en el vector a en la posición i y se incrementa la variable i .

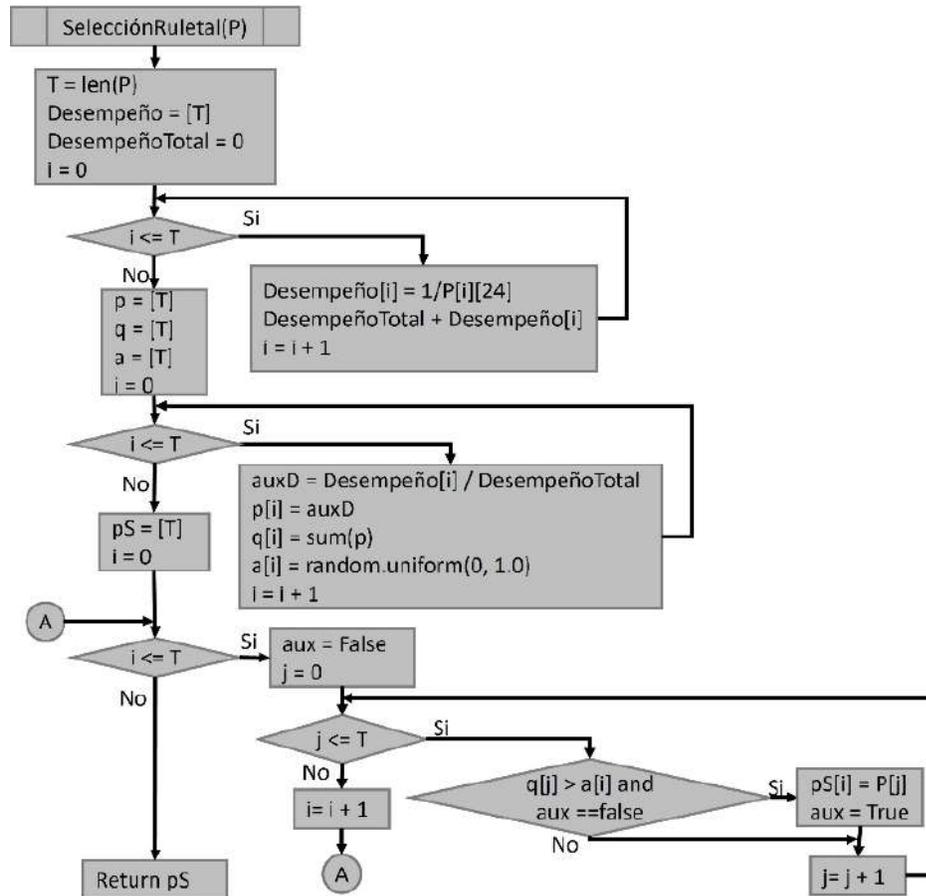


Figura 4.34: Diagrama de flujo de la función de selección por ruleta del algoritmo genético.

La tercera parte selecciona a los individuos de la población original y los guarda en un arreglo. Si i es mayor a T se crea el vector pS de tamaño T el cual almacenará a los cromosomas que sean seleccionados, además, se inicializa la variable de iteración i cero. Si i es mayor a T , entonces en el arreglo pS ya se han almacenado a todos los cromosomas seleccionados, la función termina y retorna la variable pS ; Si i es menor o igual a T se crea una variable de tipo booleana con valor *False* llamada aux y se inicializa la variable de

iteración j en cero; si j es mayor a T se incrementa la variable i ; si j es menor o igual T se hace una doble comparación, si la probabilidad acumulada q en la posición j es mayor a el valor aleatorio del vector a en la posición i y si la variable aux es igual a *False* si ambos criterios son verdaderos entonces en el arreglo pS en la posición i se almacena el cromosoma de la población original en la posición j y la variable aux cambia a *True*, en seguida y también en caso contrario se incrementa la variable j .

Cruce por aperador BLX- α

En los algoritmos genéticos el proceso de cruce también conocido como “recombinación genética”, desempeña un papel esencial en la creación de nuevas soluciones a partir de los individuos seleccionados. El cruce es una operación inspirada en la reproducción biológica, donde los cromosomas de dos padres se combinan para dar lugar a descendencia con características heredadas de ambos progenitores (Gutiérrez Reina, et al., 2020).

Existen diversas técnicas de cruce, cada una con sus propias particularidades y efectos sobre la diversidad genética de la población. En este trabajo, se ha optado por implementar una variante de la técnica de cruce BLX (del inglés, *Boundary Learning Crossover*), denominada BLX- α . La técnica BLX- α se caracteriza por generar descendencia que se encuentra más allá de los límites de los padres, lo que promueve una mayor exploración del espacio de soluciones y una mayor diversidad genética. A través del uso de la técnica BLX- α , se busca mejorar la capacidad de exploración y explotación del algoritmo genético, permitiendo obtener soluciones más variadas y, potencialmente, soluciones óptimas al problema abordado. Dado dos cromosomas que son los progenitores denotados por la expresión (34).

$$\begin{aligned} CP_1 &= (GP_{11}, \dots, GP_{1n}) \\ CP_2 &= (GP_{21}, \dots, GP_{2n}) \end{aligned} \tag{34}$$

Donde:

CP_1 = Cromosoma progenitor uno.

CP_2 = Cromosoma progenitor dos.

GP_{11} = Primer gen del cromosoma progenitor uno.

GP_{1n} = Ultimo gen del cromosoma progenitor uno.

n = Cantidad de genes de cada uno de los cromosomas.

GP_{21} = Primer gen del cromosoma progenitor dos.

GP_{2n} = Ultimo gen del cromosoma progenitor dos.

Con el cruce del par de cromosomas padres de la ecuación (34) mediante el operador de cruce BLX- α se generan dos cromosomas hijos con las características de los padres, los hijos generados siguiendo la ecuación (35).

$$\begin{aligned} CH_1 &= GH_{11}, \dots, GH_{1n} \\ CH_2 &= GH_{21}, \dots, GH_{2n} \end{aligned} \quad (35)$$

Donde:

CH_1 = Cromosoma hijo uno.

CH_2 = Cromosoma hijo dos.

GH_{11} = Primer gen del cromosoma hijo uno.

GH_{1n} = Ultimo gen del cromosoma hijo uno.

n = Cantidad de genes de cada uno de los cromosomas.

GH_{21} = Primer gen del cromosoma hijo dos.

GH_{2n} = Ultimo gen del cromosoma hijo dos.

Cada gen GH_{1i} del cromosoma hijo CH_1 y cada gen GH_{2i} del cromosoma CH_2 son generados aleatoriamente en el intervalo descrito a partir de la ecuación (36).

$$[C_{min} - (I \cdot \alpha), C_{max} + (I \cdot \alpha)] \quad (36)$$

Donde:

C_{min} = Valor mínimo de GP_{1i} y GP_{2i}

C_{max} = Valor máximo de GP_{1i} y GP_{2i}

$I = C_{max} - C_{min}$

α = Numero aleatorio uniforme entre $[0,1]$

Se desarrolló una función para realizar el cruce de dos cromosomas y generar dos nuevos cromosomas mediante el cruce BLX- α , la función recibe como argumento a la población de padres que han sido seleccionados previamente P , se declara una variable t igual al tamaño de la población, una variable tc igual a 25 que es el tamaño de cada cromosoma, se declara un arreglo para la nueva población llamada NP de t filas (cromosomas) y tc columnas (genes), una variable α que es el operador alfa de cruce por lo tanto es aleatorio y asegura una diversidad en el espacio de búsqueda del algoritmo genético, se inicializa una variable de iteración i en 0 para recorrer a todos los cromosomas de la población.

Si i es mayor a t , significa que todos los cromosomas de la población original han sido cruzados por lo tanto la función finaliza retornando la nueva población. Si i es menor o igual a t , se crean dos vectores vacíos de tamaño tc llamados $H1$ y $H2$ para almacenar a los hijos, un vector $P1$ para almacenar al primer padre que será cruzado, inicializado con el cromosoma en la posición i de la población original y un vector $P2$ para almacenar al segundo padre que será cruzado con el primer padre, el valor del vector $P2$ es igual al cromosoma en la posición i más uno de la población original, también se crea la variable de iteración j inicializado en 0 que itera a los genes de cada cromosoma. Si j es mayor a tc significa que todos los genes han sido cruzados, por lo tanto, el hijo $H1$ es igual a un nuevo cromosoma en la nueva población en la posición i , el hijo $H2$ es igual a otro nuevo cromosoma en la nueva población en la posición i más uno y se incrementa la variable i en dos para cruzar al siguiente par de padres (cromosomas).

Si j es menor o igual a tc se procede a verificar si la posición del gen denotado por la variable j es un gen que debe cruzarse, en este caso y de acuerdo con Figura 4.31, son los genes (0, 5, 9, 12, 17, 18 y 23) se realiza la cruce siguiendo la ecuación (36), si j no es alguno de los genes (0, 5, 9, 12, 17, 18 y 23), entonces se evalúa si es el gen 24 se asigna el promedio del error en la profundidad de dos cromosomas más parecidos al cromosoma hijo en cuestión mediante la función descrita por la Figura 4.36. Si j no es alguno de los genes (0, 5, 9, 12, 17, 18, 23 y 24) quiere decir que es alguno de los genes que no se cruzan de acuerdo con las restricciones del algoritmo, entonces solo se incrementa la variable j y posteriormente se evalúa si se han leído todos los genes del par de cromosomas padres, todo el proceso anterior se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 4.35.

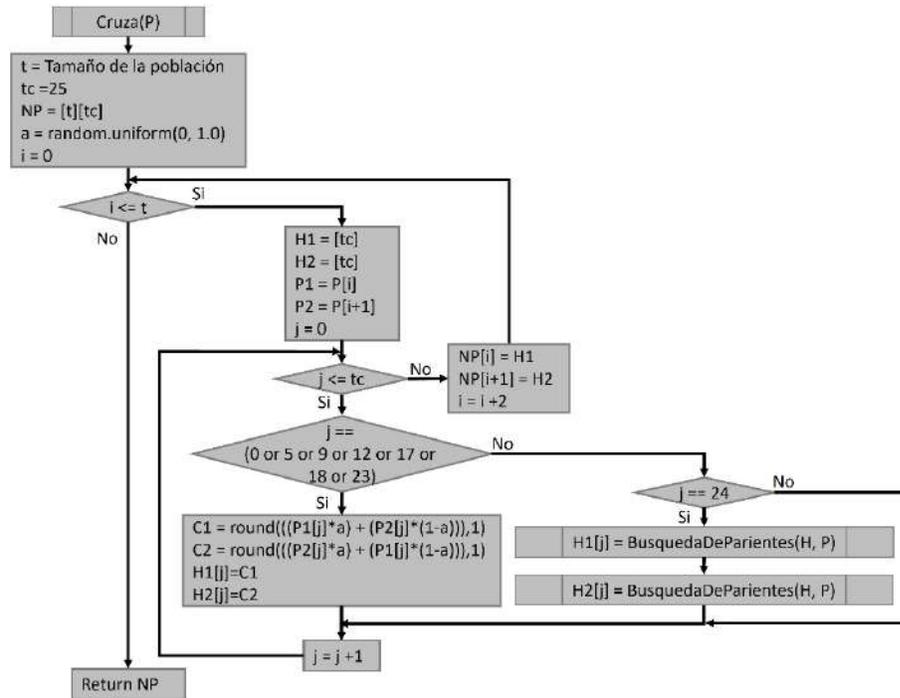


Figura 4.35: Diagrama de flujo de la función de cruce por operador BLX-a del algoritmo genético.

Cuando se realiza la cruce de los dos cromosomas padres para generar a dos nuevos hijos, al llegar al gen de error en la profundidad, es decir el gen 24, se requiere asignarle un valor, para esta tarea se desarrolló una función al que se le denominó búsqueda de parientes el cual consiste en buscar similitudes en los genes 0, 5, 9, 12, 17, 18 y 23 entre cada uno de los dos cromosomas hijo creados y toda la población, se estableció elegir dos cromosomas que se parezcan al cromosoma hijo y promediar el error de los dos cromosomas encontrados y asignar el promedio al gen de error del cromosoma hijo.

En la Figura 4.36 se observa el diagrama de flujo para la búsqueda de parientes, la función recibe como parámetros al cromosoma hijo H y a toda la población P , se crean dos vectores, *Similitudes* para almacenar la magnitud de similitud entre el cromosoma hijo y cada individuo de la población y *SimilitudesO* es para almacenar lo descrito anteriormente pero de manera ordenada, se inicializa la variable i para iterar cada cromosoma de la población asignado a la variable I , se calcula el puntaje obtenido *Score* a partir de la suma de los valores absolutos de la resta en los genes 0, 5, 9, 12, 17, 18 y 23 entre el hijo H y el

individuo I de la población, el *Score* de almacena en *Similitudes*, cabe destacar que mientras mayor sea en *Score* menos similitud tiene H con I . Después de iterar a toda la población se hace una copia de *Similitudes* asignada a *AuxSim*, se procede a ordenar de manera ascendente al vector *Similitudes*, se inicializa i en cero; si el primer valor del vector *Similitudes* es igual al elemento i del vector *AuxSim* se extrae el valor del error en la profundidad denotado por el gen 24 del cromosoma i de la población asignado a la variable $vp1$; si el segundo valor del vector *Similitudes* es igual al elemento i del vector *AuxSim* se extrae el valor del error en la profundidad denotado por el gen 24 del cromosoma i de la población asignado a la variable $vp2$; así con los valores $vp1$ y $vp2$ se calcula el promedio peP y finaliza la función retornando el promedio en el error en la profundidad de los cromosomas más parecidos al cromosoma hijo generado en el proceso de cruce.

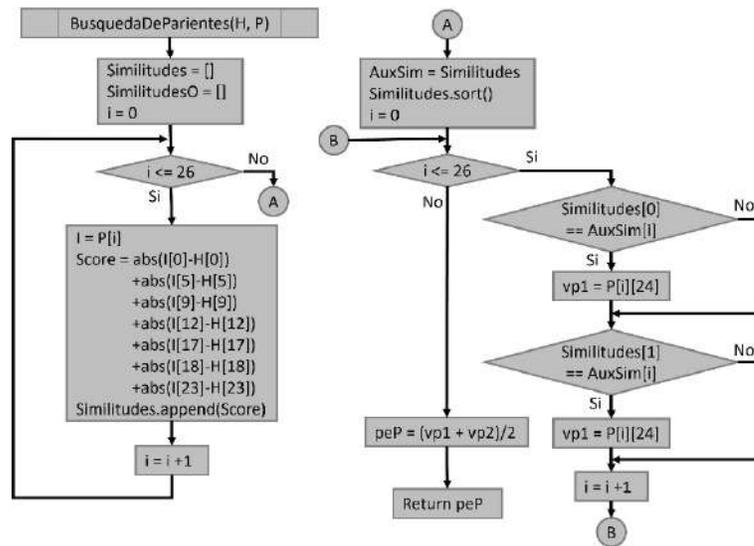


Figura 4.36: Diagrama de flujo de la función para buscar a los parientes del cromosoma y calcular el error en la profundidad.

Reemplazo de la población

La etapa de reemplazo en un algoritmo genético es un paso fundamental en el proceso de evolución de la población de individuos, ya que influye directamente en la convergencia hacia soluciones óptimas y en la preservación de la diversidad genética (Avelar Uribe, et al., 2019). Después de aplicar las operaciones de selección y cruce, es necesario decidir cuáles individuos sobrevivirán y formarán parte de la próxima generación y qué

individuos serán desechados. Diferentes enfoques de reemplazo pueden aplicarse, como el reemplazo generacional, donde toda la población actual es reemplazada por la nueva generación de descendientes, o el reemplazo elitista, donde se asegura que los mejores individuos de la población actual sean preservados en la siguiente generación. En este estudio, se empleará una estrategia de reemplazo elitista para favorecer la persistencia de los individuos más aptos y así acelerar el proceso de convergencia.

En el presente estudio, se implementó una estrategia de reemplazo parcial, de acuerdo con Civelek (2020) propone un intervalo entre el 70 y el 90 %, se optó por usar el 80 %, por lo tanto, el 80 % de los padres que tienen el menor desempeño serán reemplazados por el 80 % de los hijos que tienen el mejor desempeño. Esta estrategia permite combinar la diversidad genética de la población actual con las nuevas soluciones generadas por el cruce, permitiendo una exploración más exhaustiva del espacio de búsqueda. Al conservar una parte significativa de los padres mejor adaptados, se busca garantizar la persistencia de soluciones prometedoras, mientras se abre espacio para la incorporación de nuevas y potencialmente mejores soluciones. A través de este enfoque de reemplazo parcial, se busca obtener un equilibrio entre la explotación de soluciones cercanas al óptimo local y la exploración de nuevas regiones del espacio de búsqueda (Avelar Uribe, et al., 2019).

Antes de realizar el reemplazo de una parte de la población de padres con un porcentaje de la población de hijos, se requiere ordenar a ambas poblaciones para descartar a los cromosomas con el mayor porcentaje de error, es decir a las soluciones menos viables. Se optó por ordenar a la población de acuerdo con su porcentaje de error de menor a mayor, por lo tanto, los cromosomas con mayor desempeño quedaran al inicio del arreglo y los peores cromosomas al final del arreglo.

Se desarrolló una función que permite ordenar a los cromosomas de la población de manera ascendente de acuerdo con el error en la profundidad, es decir el valor del gen en la posición 24. Todo el proceso se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 4.37. La función recibe como parámetro la variable P , que es la población que será ordenada, se extrae el tamaño de la población y se almacena en la variable T , se inicializan dos vectores auxiliares $AuxE$ y $AuxI$ de tamaño T , se crea un arreglo PO para almacenar a

la población ordenada y se inicializa la variable de iteración i en cero. Se puede analizar el algoritmo de ordenamiento en dos partes.

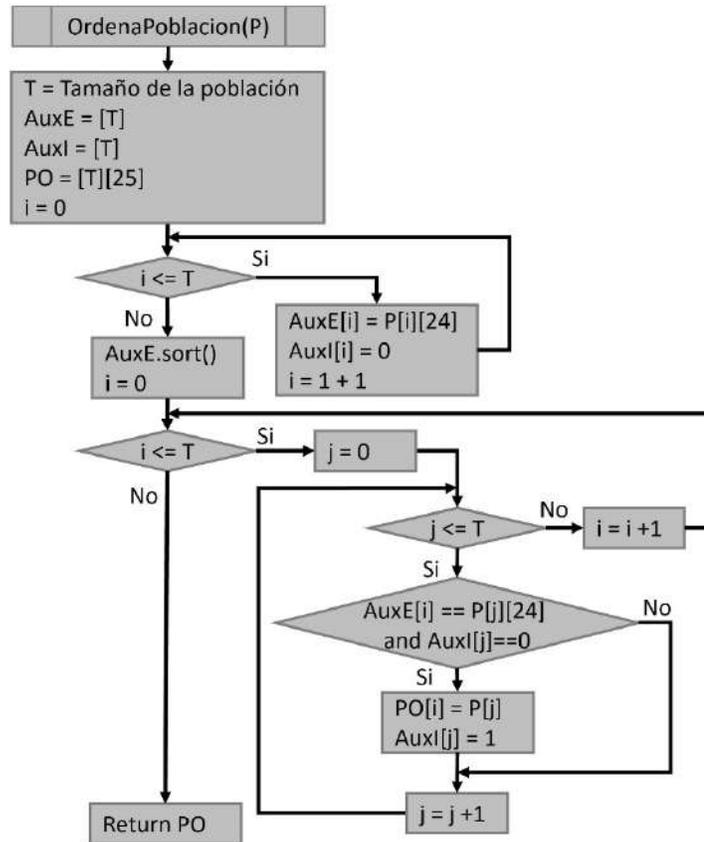


Figura 4.37: Diagrama de flujo de la función para ordenar a la población.

La primera parte extrae y almacena el valor del gen 24 de cada uno de los cromosomas para después ordenar este vector. Mientras i sea menor a T se le asigna el valor del gen 24 del cromosoma i de la población al vector $AuxE$ en la posición i , se le asigna un valor de 0 al vector $AuxI$ en la posición i y se incrementa en uno a la variable i . Cuando i es mayor a T , se usa una función de ordenamiento ascendente en el vector $AuxE$ y se inicializa en cero la variable de iteración i .

La segunda parte del algoritmo llena el arreglo PO al comparar los valores de $AuxE$ con los valores del gen 24 de cada uno de los cromosomas de la población. Si i es mayor a T entonces significa que todos los cromosomas fueron ordenados y la función termina al retornar a la población ordenada PO . Si i es menor o igual a T se inicializa la variable j en

cero; si j es mayor a T se incrementa i en uno. Si j es menor o igual a T se compara al vector $AuxE$ en la posición i con el cromosoma i de la población P y se compara al valor de $AuxI$ en la posición j con cero, si ambas comparaciones son falsas se incrementa a j en uno; si ambas comparaciones son verdaderas al arreglo PO en la posición i se le asigna el cromosoma j de la población P , en seguida se al vector $AuxI$ en la posición j se le asigna uno y posteriormente se incrementa la variable i en uno.

Una vez ordenada la población de padres, así como la de los hijos de manera ascendente, es decir los cromosomas mejor adaptados están al inicio de la población. Se escribió una función que permite realizar el remplazo del 80% de la población de padres con el 80% de la población de hijos, la función recibe como parámetros tres argumentos: P la población de padres, H la población de hijos y r el porcentaje de la población de padres que será reemplazado. Se inicializa la variable T con el tamaño de la población, ph es igual a la cantidad de cromosomas hijos equivalente al porcentaje de padres que serán reemplazados, Np es un arreglo de T filas con 25 columnas para almacenar a la nueva población de padres e hijos y la variable de iteración i se inicializa en cero. Si i es menor o igual a ph en el arreglo Np en la posición i se le asigna el cromosoma padre en la posición i de P y se incrementa en uno a i . Si i es mayor a ph entonces mientras que i sea menor o igual a T , se le asigna el cromosoma hijo en la posición i menos ph al arreglo Np en la posición i . Si i es mayor a T entonces se han reemplazado a todos los padres y la función termina y retorna a la nueva población Np de cromosomas padres e hijos, todo el proceso anterior se puede apreciar en la Figura 4.38.

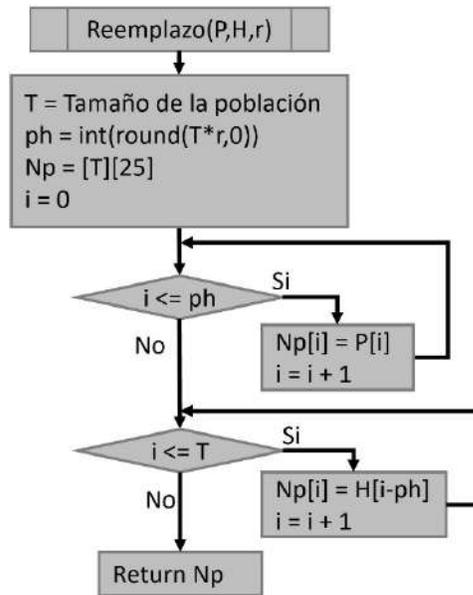


Figura 4.38: Diagrama de flujo para el reemplazo de la población del algoritmo genético.

Integración de las etapas del algoritmo genético

Una vez desarrolladas cada una de las etapas del algoritmo genético a manera de funciones, se realizó la integración de todas las etapas. En la Figura 4.39, se aprecia el diagrama de flujo del algoritmo genético con todas sus etapas; se inicia al crear una población inicial P la cual es los datos del archivo CSV, luego, a la población P se evalúa mediante el error $MAPE$, se crea una variable de tipo vector llamada *Desempeño* en el cual se guarda el error $MAPE$ de la población P . Se inicializa una variable G en cero para llevar el indicador de la generación; mientras G sea menor o igual a 40 tal como lo propone García Mejía et al. (2022), se crea una variable PS para almacenar a la población seleccionada de P , se crea una variable H donde se almacenan a los hijos creados P , se crea una variable P para almacenar a la población de padres PS ordenados y se reescribe la variable H con la población ordenada de hijos, se crea una variable nP que es una población con los mejores padres y mejores hijos, debido a que nP es una población ordenada de menor a mayor en dos segmentos se emplea una función propia del lenguaje Python para reorganizar aleatoriamente a los elementos de la población nP , se reescribe a la variable P con el contenido de nP para la siguiente generación, se almacena en el vector

Desempeño en la posición G el error MAPE de P , se incrementa G en uno. Si G es mayor a 40 se grafica el vector *Desempeño* el cual contiene la evolución del error MAPE de la población P durante cada generación y el algoritmo genético finaliza.

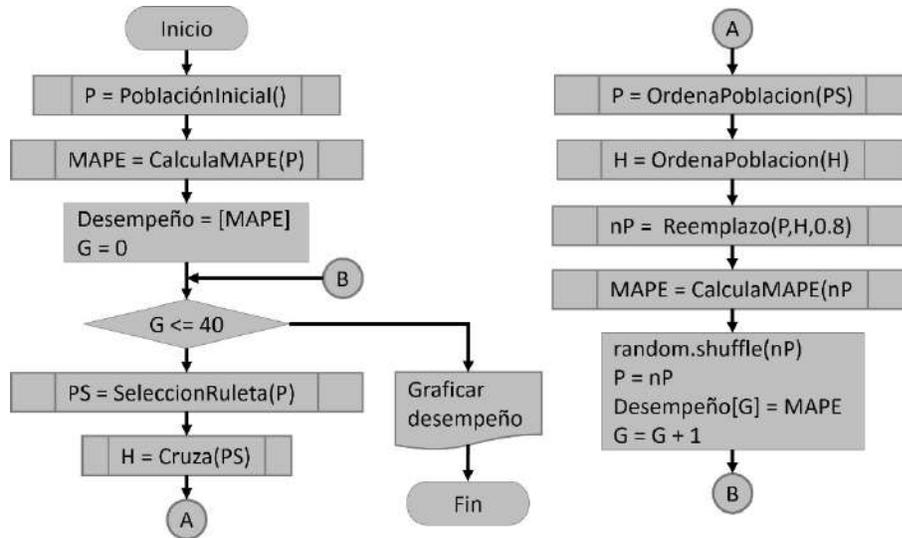


Figura 4.39: Diagrama de flujo general de la integración de las etapas del algoritmo genético.

Para la validación del controlador difuso con sintonización basado en algoritmo genético, primero se requiere datos para que el algoritmo genético ajuste al controlador, por lo tanto la secuencia es realizar maquinados con diferentes condiciones de voltaje de polarización, error en la pendiente de corriente y ajuste en la IEG para obtener los errores en la profundidad, con estos datos se genera la población inicial del algoritmo genético que en etapas posteriores generan los intervalos en los conjuntos difusos para minimizar el error en la profundidad de los próximos maquinados. Luengo se procede a realizar una nueva serie experimental para validar al controlador con ajuste genético, el cual por lógica debe obtener un menor error en la profundidad.

4.3 Experimentación

En este apartado se describen los objetivos de cada una de las pruebas realizadas, así como de las condiciones necesarias y las variables empleadas para llevar a cabo cada uno de los experimentos con el fin de probar cada uno de los módulos y los algoritmos desarrollados y verificar su correcto funcionamiento.

4.3.1 Identificación de la resolución de movimiento del sistema mecánico

El sistema mecánico que se construyó permite establecer la IEG inicial y realizar un continuo ajuste de la IEG para garantizar que la MRR se mantenga constante, por lo tanto, se realizaron las pruebas de desplazamiento, las cuales consistieron en identificar la distancia recorrida en cada una de las configuraciones (paso completo, medio paso, octavo de paso y dieciseisavo de paso), para poder identificar la distancia desplazada se empleó un indicador de dial acoplado al cabezal del eje Z del sistema mecánico. El indicador de dial empleado está graduado para medir en milésimas de pulgadas, es decir cada graduación del indicador de dial establece segmentos de $25.4 \mu\text{m}$, debido a que el sistema mecánico alcanza un desplazamiento de $20 \mu\text{m}$ por pulso en una configuración de paso completo, la distancia de desplazamiento a fracción de pasos será menor y para poder hacer una medición en estas escalas se recurre a realizar desplazamientos de 10, 100 y 1000 pulsos en las dos configuraciones de dirección de giro de los motores a pasos por lo tanto se tiene desplazamiento positivo como negativo lo que se traduce en el eje Z como elevar y descender la herramienta de trabajo.

Para garantizar que el desplazamiento del eje Z en una configuración dada es uniforme, se planteó realizar desplazamientos de 10, 25, 50 75 y 100 pulsos en ambas direcciones y registrar las distancias desplazadas y posteriormente repetir las pruebas de desplazamiento para analizar el error en la distancia alcanzada conforme a la media de repeticiones en las pruebas realizadas. Otra prueba pertinente consiste en comparar la recta de la distancia desplazada con la distancia calculada.

4.3.2 Ajuste de forma de onda y el valor de voltaje de la fuente de alimentación

La señal producida por los generadores de funciones (Sinusoidal, Cuadrada y Triangular) es seleccionada mediante un multiplexor analógico de cuatro canales, donde el cuarto canal está conectado a GND o referencia a tierra, lo que permite que sea una señal nula, para ser empleada como punto inicial en donde los electrodos no están energizados y por lo tanto no se producirá el desgaste de la pieza de trabajo. Se realizó un algoritmo que permite realizar la selección de la señal deseada, a través de una función, se establecen las 4 combinaciones binarias de los pines de selección del multiplexor analógico. Por lo tanto, la función escrita en lenguaje de programación Python permite realizar el cambio de la señal empleada en cualquier momento que así se requiera.

Para establecer el voltaje pico de la señal de salida se realiza a partir del valor de ganancia del amplificador operacional, donde la ganancia se modifica de acuerdo con el valor de resistencia de un potenciómetro digital, el cual puede aumentar o disminuir su valor resistivo mediante una función que permite controlar los pines de funcionamiento del potenciómetro digital.

4.3.3 Validación del sensor de voltaje y corriente

El sensor de voltaje y corriente que se construyó permite realizar las mediciones de dichas variables para conocer el comportamiento de la planta. En ese sentido, es indispensable que el sensor realice las mediciones de ambas variables de la forma más precisa posible. Debido a que el voltaje máximo que es capaz de medir el ADC son 5 V se empleó un divisor de voltaje para medir solo una fracción del voltaje total; por lo tanto, se requiere calcular el voltaje total.

Para calcular el voltaje total que existe entre la pieza (ánodo) y la herramienta (cátodo) y además verificar que las mediciones son precisas, se realizó el siguiente experimento: se midió el voltaje RMS total y el voltaje RMS en la resistencia del divisor de tensión con ayuda de un osciloscopio, además se midió y se registró el voltaje en el divisor de voltaje mediante el sensor construido y la Raspberry Pi. Luego, se realizaron mediciones de voltaje variando el voltaje pico de los generadores de funciones desde 0.5 a 1.5 V de pico a pico con una variación de 10 mV por lo tanto resultó en 50 mediciones de voltaje.

Posteriormente, se compararon las mediciones del voltaje RMS en el divisor de tensión obtenidos con el sensor y los obtenidos con el osciloscopio digital para contrastar los resultados.

Para calcular y registrar el voltaje total entre los electrodos de forma automática, se requiere encontrar la fracción complementaria del voltaje medido en el divisor de tensión y se calcula la porción que corresponde al valor medido del voltaje total. Se divide el voltaje medido en el divisor de tensión entre el voltaje total y posteriormente se calcula el inverso para obtener el factor de multiplicación.

4.3.4 Identificación de parámetros para el maquinado electroquímico

Voltaje de polarización

La fuente de energización que se desarrolló para emplearse en el proceso de maquinado electroquímico permite modificar el voltaje de polarización en la celda electrolítica mediante el factor de ganancia de la celda electrolítica. El voltaje de polarización influye de manera significativa en las dimensiones del maquinado realizado, tal como se observó en trabajos previos reportados por Segundo Lovera, et al. (2022). Debido a la corriente que fluye entre los electrodos está ligada al voltaje de polarización, se consideró ampliar el intervalo de voltaje de polarización en los intervalos: 3, 5, 7 y 9 V. El tiempo de maquinado se consideró fue de 60 s. El objetivo principal de esta serie experimental es determinar el voltaje de polarización que minimice el sobre corte y maximice la profundidad de la perforación en las tres formas de onda estudiadas. El sobre corte es una medida crítica para la precisión del proceso. A su vez, la profundidad de la perforación es esencial para evaluar la capacidad de remoción de material. Para cada combinación de forma de onda y voltaje de polarización, se realizó una serie experimental con dos repeticiones.

Frecuencia

Una desventaja de usar generadores de funciones externos se presenta debido a que no se puede modificar la frecuencia durante el proceso de desbaste de material; por lo tanto,

resulta conveniente realizar un estudio para seleccionar la frecuencia de trabajo que genere los mejores resultados (menor sobre corte mayor profundidad), para esto se consideran las tres formas de onda: cuadrada, sinusoidal y triangular. Se evaluaron cuatro frecuencias distintas: 1 kHz, 20 kHz, 40 kHz y 60 kHz, manteniendo un voltaje constante para cada combinación de forma de onda y frecuencia. El tiempo de exposición para esta serie fue de 180 segundos.

Una vez concluida la experimentación, se determina el sobre corte y la profundidad de la perforación en cada caso, y se registran estos valores para su análisis. Se comparan los resultados obtenidos para identificar la frecuencia que presente el menor sobre corte y la mayor profundidad en las tres formas de onda. Adicionalmente, se analiza la corriente inicial en cada combinación de frecuencia y forma de onda. La corriente es una variable importante que refleja la eficiencia del proceso y tiene un impacto en el desgaste de la herramienta y la calidad del maquinado. Los hallazgos de esta serie experimental proporcionan una guía para seleccionar la frecuencia de trabajo más adecuada en el maquinado electroquímico, considerando las distintas formas de onda. Además, se pretende una comprensión más profunda de cómo las variables de frecuencia y forma de onda afectan el rendimiento del proceso.

4.3.5 Ajuste genético del controlador difuso

Para poder realizar el ajuste de los conjuntos difusos del controlador mediante un algoritmo genético se requiere partir de los resultados de una serie experimental de la cual se obtiene el error de cada perforación para calcular el error MAPE en la profundidad de las perforaciones de toda la serie experimental. Posteriormente se requiere generar a la población inicial para que el algoritmo genético realice la búsqueda de los intervalos en los conjuntos difusos.

Selección de intervalos de los conjuntos difusos para generar a la población inicial

El número de perforaciones en la serie experimental para encontrar la mejor combinación en los 6 límites de los intervalos de los conjuntos difusos de las tres variables (error en la

pendiente de corriente, ajuste de voltaje y ajuste de IEG) y restringiendo cada límite a dos posibles valores; el número de combinaciones dadas las características se define mediante la ecuación (37).

$$NC = 2^n = 2^6 = 64 \quad (37)$$

Donde:

NC = Número de combinaciones.

n = Número de límites.

El resultado de la ecuación (37) es de 64 experimentos los cuales son una cantidad considerable. Para reducir el número de combinaciones de manera metódica se propuso hacerlo considerando las variables que tienen un efecto directo en el maquinado electroquímico y que pueden ser manipulados en su magnitud. Las variables seleccionadas fueron tres: el voltaje de polarización, la pendiente de corriente y el ajuste en la distancia entre electrodos y el número de conjuntos por variable. Así el número experimentos en la serie experimental que conforman a la población inicial está dado por la ecuación (38).

$$Ne = Nv^{Nc} = 3^3 = 27 \quad (38)$$

Donde:

Ne = Número de experimentos.

Nv = Número de variables.

Nc = Número de conjuntos por cada variable.

El resultado de la ecuación (38), es de 27 perforaciones; entonces se realizó un listado de las 64 combinaciones diferentes de las cuales se seleccionó 27 combinaciones de manera aleatoria las cuales se encuentran en la Tabla 4.6. Estas 27 perforaciones conforman la serie experimental para cuantificar el error individual de cada uno de los barrenos, para posteriormente registrar los resultados tal como se observa posteriormente en la Tabla 5.7, donde cada combinación representa un cromosoma compuesto por 24 genes más el gen 25 el cual es el error en la profundidad. El listado de 27 combinaciones se guarda en

formato CSV para su posterior tratamiento mediante el algoritmo genético descrito por la Figura 4.39.

Tabla 4.6: Listado de las 27 combinaciones diferentes en los límites de los conjuntos difusos del controlador.

N	Z1	Z2	G	m	S1	S2	Z1	Z2	G	m	S1	S2	Z1	Z2	G	m	S1	S2	Z1	Z2	G	m	S1	S2
1	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.8	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
2	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
3	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
4	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
5	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
6	-0.9	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
7	-0.9	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.8	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
8	-0.9	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
9	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
10	-0.9	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
11	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
12	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
13	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
14	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
15	-0.9	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
16	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
17	-0.9	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
18	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
19	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
20	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
21	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
22	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
23	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6
24	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
25	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
26	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9
27	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6

Parámetros del algoritmo genético

Para seleccionar los parámetros críticos de un algoritmo genético, es esencial llevar a cabo un modelo experimental cuidadosamente diseñado con un enfoque sistemático que implica la variación de dos parámetros clave: el nivel de repetibilidad y el número de generaciones. Establecemos un rango adecuado para el número de generaciones que se

evaluarán, en un rango de 20 a 80 generaciones para abordar tanto la convergencia prematura como la convergencia tardía del algoritmo (Civelek, 2020). Asimismo, se definió el número de iteraciones en 40 tal como lo propone la teoría del límite central retomado del trabajo de García Mejía , et al. (2022), para evaluar la repetibilidad del algoritmo y de esta manera asegurar la estabilidad del algoritmo. Mediante una gráfica de cajas y bigotes se evaluó la variación de las métricas de rendimiento en función del número de generaciones y la repetibilidad del algoritmo genético propuesto.

4.3.6 Validación del ajuste genético del controlador difuso

Después de ejecutar al algoritmo genético con los datos de los maquinados previos mostrados en la Tabla 5.7 para encontrar los intervalos en los conjuntos difusos de las variables, error en la pendiente de corriente, ajuste de voltaje y ajuste de IEG; el resultado es una lista ordenada de los cromosomas, donde la primera posición es la mejor solución. Se realizó el ajuste de los intervalos de los conjuntos difusos con la información generada mediante el algoritmo genético, donde la combinación generada por el algoritmo genético reduce el error MAPE en la profundidad. Por esta razón se realizó una serie experimental para evaluar los resultados de la sintonización genética en los límites de los conjuntos difusos. La serie experimental propuesta consiste en realizar perforaciones con una profundidad de 290, 340 y 390 μm de profundidad empleando las tres formas de onda.

La Figura 4.40 proporciona una visión detallada del diseño experimental para realizar perforaciones de 290, 340 y 390 μm propuestos para la evaluación del controlador difuso ajustado mediante el algoritmo genético, mostrando las condiciones y posiciones clave de la herramienta de trabajo durante el proceso de maquinado electroquímico. En la Figura 4.40 a), se destacan las condiciones iniciales con la herramienta de trabajo situada en el punto PH, a una distancia de 240 μm sobre la superficie de la pieza de trabajo, representada por el punto S. En la Figura 4.40 b), se presenta el descenso de la herramienta de trabajo para realizar una perforación de 290 μm , ubicándose en el punto PH a 50 μm por debajo de la superficie de la pieza de trabajo. La Figura 4.40 c), ilustra el descenso para una perforación de 340 μm , con la posición de la herramienta de trabajo en el punto PH igual a -100 μm , con referencia al punto S. Por último, en la Figura 4.40 d), se visualiza

la posición final para una perforación de $390\ \mu\text{m}$, donde la herramienta de trabajo descende hasta llegar al punto PH igual a $-150\ \mu\text{m}$ con respecto al punto S. Conocer la posición del electrodo permite obtener un parámetro fundamental para el cálculo del área de exposición que se realiza mediante la función descrita por la Figura 4.17.

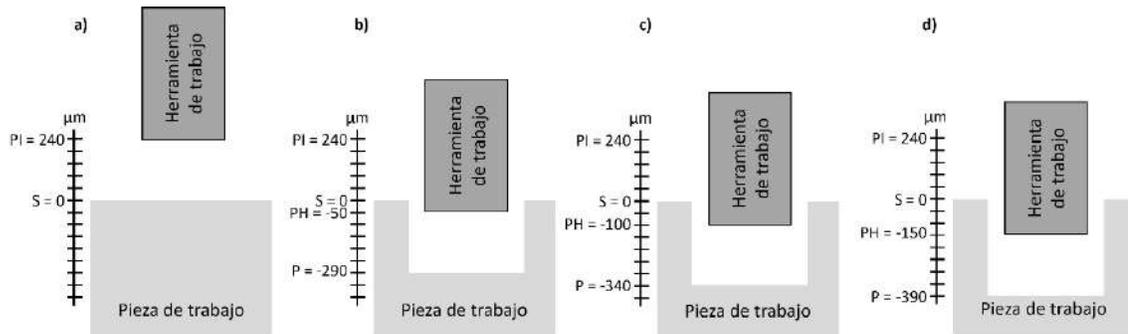


Figura 4.40: a) Posición inicial de la herramienta de trabajo. Descenso de la herramienta de trabajo hasta el punto PH para realizar un maquinado de a) $290\ \mu\text{m}$, b) $340\ \mu\text{m}$ y c) $390\ \mu\text{m}$.

4.4 Conclusión de la metodología

Se describieron los detalles del desarrollo y la construcción del sistema embebido (circuitos electrónicos y algoritmos) para el maquinado electroquímico construido con un sistema mecánico, fuente de alimentación, sistema de monitoreo de corriente y voltaje, sistema para establecer la IEG inicial, sistema de bombeo y filtración del electrolito, así como los algoritmos para el cálculo de la IEG, el error en la pendiente y el área de exposición que son empleados en un controlador difuso de múltiples entradas (error en la pendiente de corriente y cálculo del área de exposición) y múltiples salidas (ajuste en la IEG y voltaje) para la remoción controlada de material. También se describieron las etapas de un algoritmo genético, así como el desarrollo de estas y su implementación para el ajuste de los intervalos en los conjuntos difusos de las variables de entrada y salida del controlador difuso. Los algoritmos empleados se encuentran en un repositorio de GitHub disponible en el enlace siguiente: <https://github.com/FelixSegundo/Algoritmos-sintonizacion-de-controlador-difuso-mediante-AG>.

Con el objetivo de validar el funcionamiento de cada uno de los módulos del sistema embebido se describió las pruebas que consisten en la identificación de la resolución de

movimiento del sistema mecánico, así como de su estabilidad; la conmutación entre formas de onda y ajuste del voltaje en la fuente de alimentación; la validación del sensor de corriente y voltaje al comparar las mediciones realizadas con este sensor y las realizadas con un osciloscopio digital. También se describió las series experimentales que tienen como objetivo la elección del voltaje de polarización inicial en la celda electrolítica, así como el rango de frecuencia al evaluar los resultados de las perforaciones mediante el parámetro de sobre corte y profundidad. De manera similar se enuncian las combinaciones en los intervalos en los conjuntos difusos del controlador y la selección de una cantidad representativa que actúa como población inicial del algoritmo genético y obtener los intervalos que produzcan un menor error en la profundidad de las perforaciones.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Sistema embebido

El sistema embebido para el proceso de maquinado electroquímico desarrollado está conformado por diversos componentes, en la *Figura 5.1* se observan los elementos que lo integran mientras los elementos se enuncian a continuación.

1. Sistema mecánico.
2. Fuente de alimentación de los controladores del sistema mecánico.
3. Controladores del sistema mecánico.
4. Generadores de funciones (formas cuadrada, sinusoidal y triangular).
5. Amplificador aislado.
6. Módulo de 4 relevadores.
7. PCB desarrollada.
8. Raspberry Pi 3 B.
9. Fuentes de alimentación de la PCB.
10. Filtro y bombas del electrolito.
11. Interfaz por consola para el control del sistema.
12. Osciloscopio.

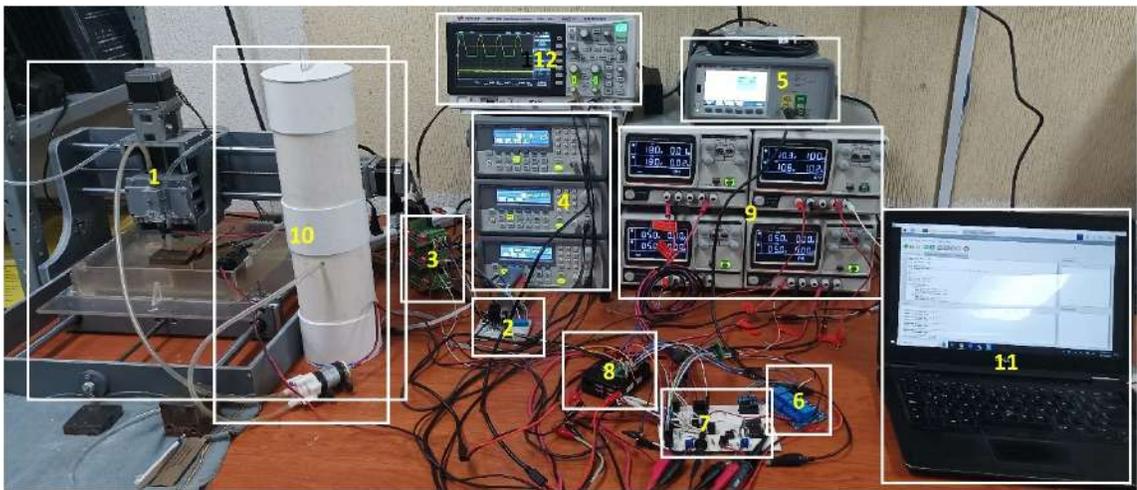


Figura 5.1: Componentes del sistema de maquinado electroquímico desarrollado.

Los circuitos de selección de la forma de onda, de amplificación (etapa de señal); de rectificación; de monitoreo de corriente y voltaje; de la fuente de alimentación; del establecimiento de la IEG fueron integrados en una tarjeta de circuito impreso (PCB) que se empleó en el proceso de maquinado electroquímico la cual se conecta a las fuentes de alimentación, los controladores de los motores a pasos, el módulo relé, los generadores de funciones, el amplificador aislado y la Raspberry Pi que son componentes externos. En la Figura 5.2 se aprecia ambos lados de la PCB desarrollada, en la Figura 5.2 a), se muestran los componentes electrónicos, mientras que en la Figura 5.2 b) se aprecian las pistas. La PCB está integrada con diferentes módulos, cada módulo es evaluado individualmente en los siguientes apartados para garantizar que su funcionamiento es el adecuado y evitar problemas durante el proceso de maquinado.

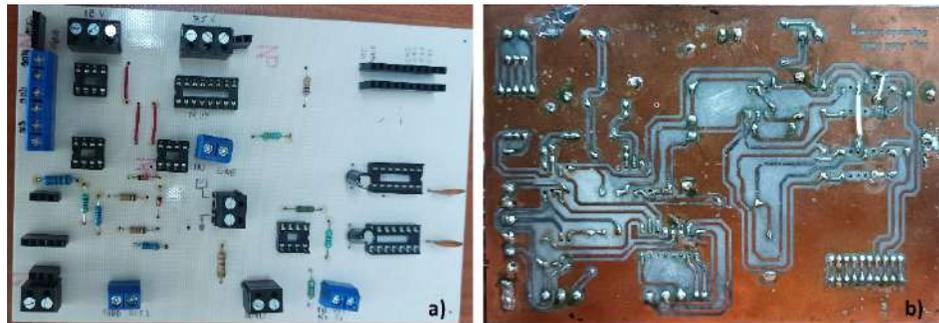


Figura 5.2: Vista de la PCB, a) componentes, b) pistas.

5.2 Estabilidad en el desplazamiento del eje Z

El eje Z del CNC permite acercar y alejar a la herramienta de la pieza de trabajo, acciones necesarias para establecer la IEG inicial y el posterior ajuste en la misma, por lo tanto, se requirió identificar la resolución de desplazamiento en este eje. Con ayuda del indicador de dial se logró medir las distancias desplazadas con una configuración de paso completo, medio paso, octavo de paso y dieciseisavo de paso las cuales fueron: 20, 10, 5 y 2.5 μm por pulso respectivamente. En la Tabla 5.1, se puede observar la distancia de desplazamiento acorde a cada configuración.

Tabla 5.1: Distancia desplazada por cada configuración del motor a pasos NEMA 23.

Configuración	Distancia desplazada (μm)
Paso completo	20
Medio paso	10
Octavo de paso	5
Dieciseisavo de paso	2.5

Se seleccionó la mínima distancia de desplazamiento debido a que con esta resolución se asegura un menor umbral para el ajuste de la IEG. Por otro lado, se realizaron tres pruebas de desplazamiento a dieciseisavo de paso con el fin de asegurarse que el desplazamiento es uniforme. Para verificar el desplazamiento del sistema mecánico con una configuración de un dieciseisavo de paso, es decir a una resolución de $2.5 \mu\text{m}$ por pulso de 0 a 100 pulsos en ambas direcciones, se graficó el error en la distancia desplazada conforme a la media de las tres repeticiones realizadas, tal como se observa en la Figura 5.3, donde el error entre repeticiones esta entre un intervalo de 0 y $0.12 \mu\text{m}$ por lo tanto, es imperceptible lo que indica que el desplazamiento acorde a los pulsos es estable.

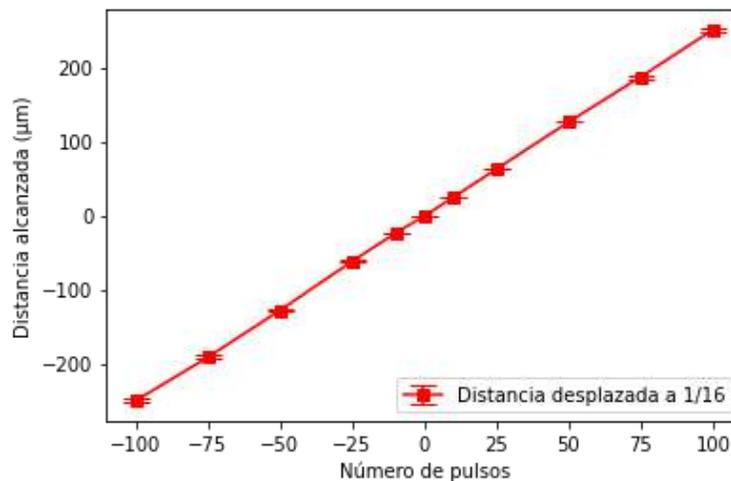


Figura 5.3: Error en la distancia desplazada con respecto a la media de las repeticiones en las dos configuraciones de dirección de giro de motor a pasos.

Por otro lado, también se graficó la distancia alcanzada y la distancia esperada (ver Figura 5.4); se puede observar que la distancia esperada y la distancia alcanzada es muy similar,

solo existe un error de 2.5 μm debido al efecto de histéresis, es decir debido al juego de engranes en el tornillo helicoidal que permite realizar el desplazamiento tiende a perder un paso cuando cambia de dirección, este fenómeno no es un impedimento debido a que en el segundo cambio de dirección se compensa el pulso perdido.

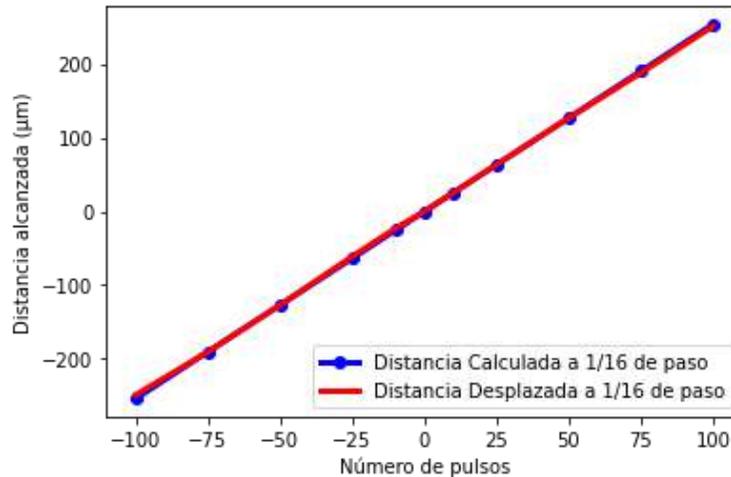


Figura 5.4: Comparación entre la distancia desplazada esperada y la distancia medida en las dos configuraciones de dirección de giro del motor a pasos.

5.3 Fuente de alimentación

Se realizó la selección de las formas de onda en diferentes instantes, entre sinusoidal, triangular y cuadrada, además, se verificó que la señal con referencia a tierra fuera una señal nula. También, se realizó la correcta amplificación y atenuación de la señal seleccionada mediante el factor de ganancia dado por el potenciómetro digital. En la Figura 5.5, se puede apreciar que las tres señales han sido rectificadas a media onda y además se observa que tienen diferentes amplitudes entre la señal original rectificada y la señal original rectificada y amplificada mediante amplificador aislado, la señal superior es la señal original rectificada que tiene una amplitud de 1 V pico, mientras que la inferior es la señal amplificada que en este caso tiene una amplitud de 5 V pico, por lo que el factor de ganancia del amplificador aislado es de 5.

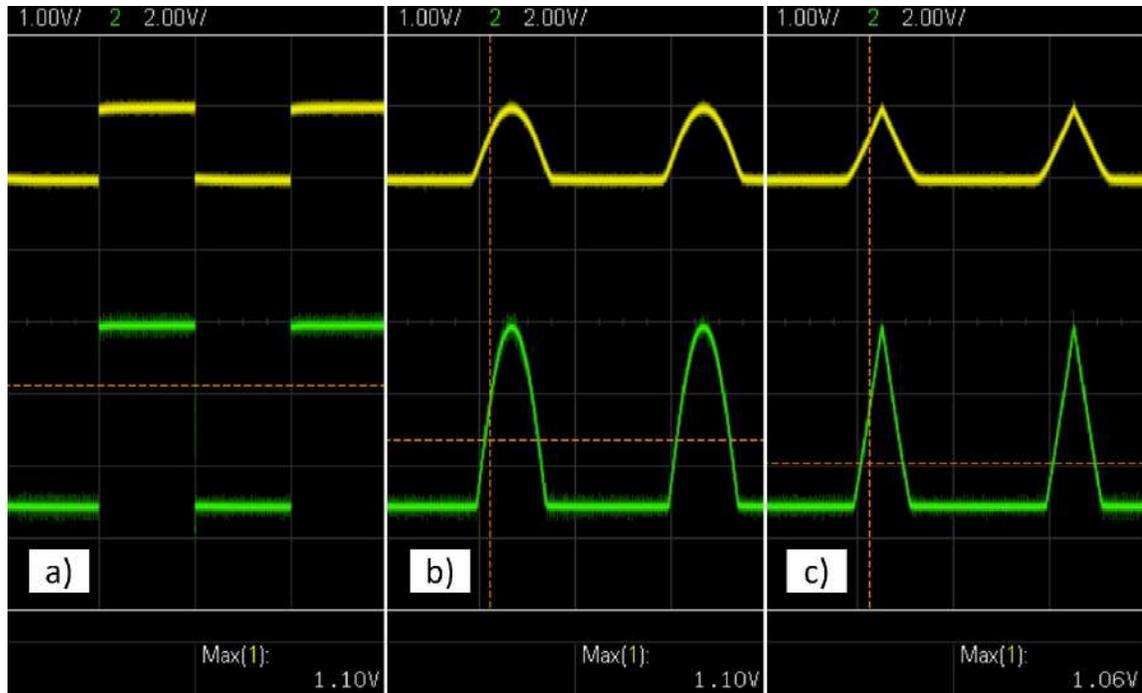


Figura 5.5: Señal rectificada y amplificada de: a) onda cuadrada, b) onda sinusoidal y c) onda triangular.

5.4 Sensor de voltaje y corriente

Después de realizar las 50 mediciones (en un rango de 0.5 a 1.5 V de pico a pico con una variación de 10 mV en los generadores de funciones) de los voltajes RMS total, así como en el divisor de tensión con ayuda del osciloscopio digital y mediante el sensor de corriente y voltaje desarrollado, se comparó las magnitudes de tensión eléctrica registradas en el divisor de tensión en ambos casos. En la Figura 5.6 a), se observa que los valores de voltaje en el divisor de tensión medidos con el osciloscopio y los medidos con el sensor de voltaje tienen una variación imperceptible, esto indica que el sensor de voltaje en el divisor de tensión del circuito de monitoreo de corriente y voltaje no tiene diferencias significativas con respecto al valor medido con el osciloscopio.

Debido a que se requiere calcular el voltaje total que energiza a la celda electrolítica a partir del voltaje presente en el divisor de tensión medido con el sensor, se realizó el cálculo del factor de multiplicación, después de encontrar dicho factor se procedió con el cálculo del voltaje total. Se comparó el voltaje total medido con el osciloscopio y el voltaje

total calculado, tal como se muestra en la Figura 5.6 b), en ambos casos se observa que los datos obtenidos son muy similares, lo que indica que el sensor realiza las lecturas de forma correcta y que el factor de multiplicación es correcto.

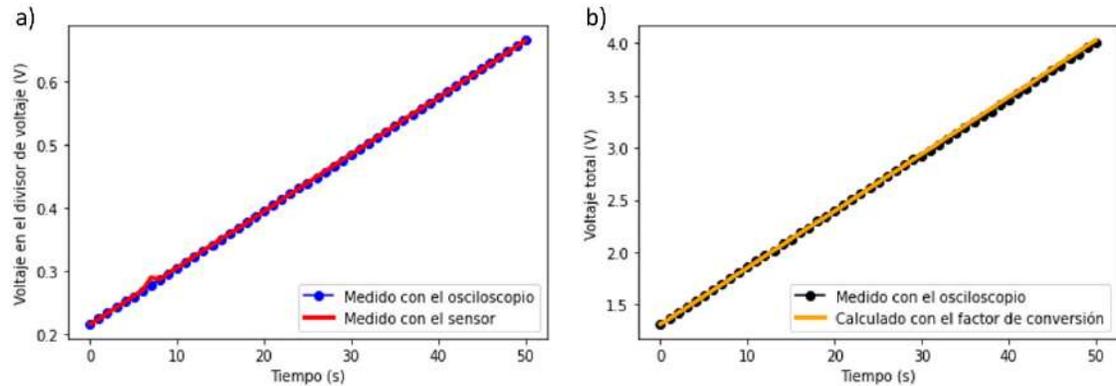


Figura 5.6: a) Comparación del voltaje RMS en el divisor de tensión medidos con el osciloscopio y con el sensor, b) Comparación del voltaje RMS total medido con el osciloscopio y con el sensor.

En relación con lo antes expuesto y tras llevar a cabo las meticulosas mediciones de voltajes RMS tanto en el divisor de tensión y como en la celda electrolítica mediante el osciloscopio digital junto con el sensor de corriente y voltaje desarrollado, se pudo establecer una comparación exhaustiva entre las magnitudes de tensión eléctrica registradas. Los resultados obtenidos revelaron una variación prácticamente imperceptible entre los valores de voltaje medidos tanto con el osciloscopio como con el sensor de voltaje. Además, al calcular el factor de multiplicación y determinar el voltaje total para energizar la celda electrolítica, se realizó una comparación detallada entre el voltaje total medido con el osciloscopio y el voltaje total calculado; esta consistencia demuestra la precisión del sensor en el divisor de tensión del circuito de monitoreo de corriente y voltaje validando su capacidad para realizar lecturas precisas y para ser utilizado como una herramienta confiable en el monitoreo de la corriente y voltaje en la celda electrolítica.

5.5 Parámetros del maquinado electroquímico

5.5.1 Selección del voltaje de polarización inicial de la celda electrolítica

La serie experimental se realizó tomando en cuenta los parámetros de la Tabla 5.2, consta de las combinaciones de cuatro niveles de voltaje de polarización y tres formas de onda, se realizó tres maquinados de cada combinación de acuerdo con lo descrito en el apartado 4.3.4. Los resultados de esta serie experimental aportan información para la selección del voltaje de polarización en la celda electrolítica

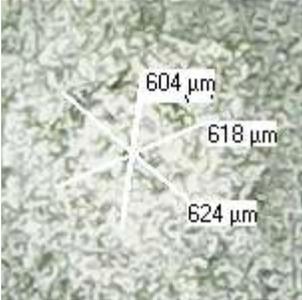
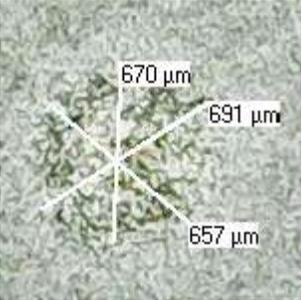
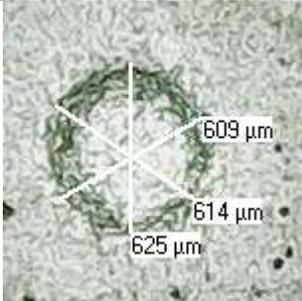
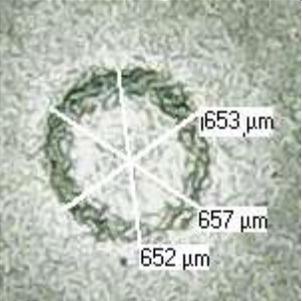
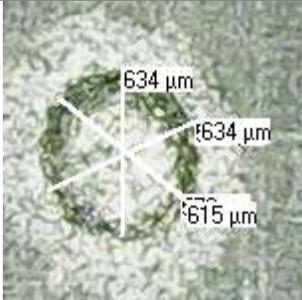
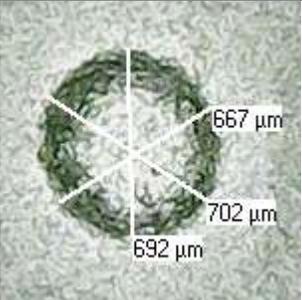
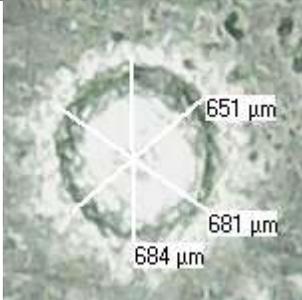
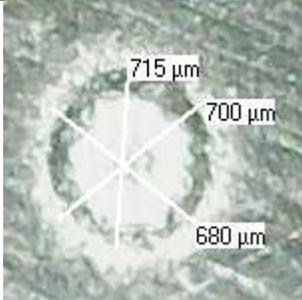
Tabla 5.2: Parámetros de la serie experimental enfocados en el voltaje de polarización.

Fuente de voltaje	Formas de onda	Sinusoidal, cuadrada, triangular
	Voltaje pico	3, 5, 7, 9 V
	Frecuencia	1 kHz
Electrolito	Composición	Solución $H_2O + NaCl$ a 3.2 molar
	Resistividad	46.51 $\Omega \cdot mm$
	Conductividad	215 mS/cm
	Flujo	0.75 ml/s
Herramienta de trabajo (Cilindro hueco)	Material	Acero inoxidable
	Dimensiones	Diámetro externo 600 μm
		Diámetro interno 380 μm Longitud útil 10 mm
Pieza de trabajo	Material	Acero AISI 1018
	Composición	0.14 - 0.2 C, 0.6 - 0.9 Mn, Fe % balance peso (IIRSACERO, 2023)
IEG inicial		240 μm
Tiempo de maquinado		60 s

Con ayuda de un microscopio óptico digital se realizaron las mediciones del diámetro de las perforaciones resultantes para calcular el sobre corte de cada una de las perforaciones, así mismo mediante un vernier digital de altura se midió la profundidad de las perforaciones. En la Tabla 5.3, se observan las perforaciones efectuadas bajo distintos niveles de voltaje, específicamente a 3, 5, 7 y 9 volts. Estas variaciones en el voltaje de polarización son fundamentales para entender el efecto que tienen en el proceso de maquinado electroquímico, específicamente en las dimensiones de la perforación resultante que en este caso es el sobre corte y la profundidad. De manera general se

observa que a medida que incrementa el voltaje la perforación se observa con mayor claridad.

Tabla 5.3: Vista de los maquinados realizados con las tres formas de onda y 4 niveles de frecuencias.

	Triangular	Sinusoidal	Cuadrada
3 V			
5 V			
7 V			
9 V			

En el análisis de los resultados de las perforaciones, el primer parámetro de interés examinado fue el sobre corte, definido por la ecuación (16). Como se muestra en la Figura

5.7, el sobre corte tiende a aumentar a medida que se incrementa el voltaje de la fuente, este patrón es consistente en las tres formas de onda consideradas: cuadrada, sinusoidal y triangular. Al analizar los datos con mayor detalle, se encontró que el error con respecto a la media de las tres repeticiones realizadas varía en un intervalo de 0.81 a 15.5 μm , con un error promedio de 5.98 μm . Es crucial destacar que a medida que el voltaje aumenta, el sobre corte tiende a incrementar, lo que sugiere una relación directa entre la energía suministrada y el sobre corte resultante.

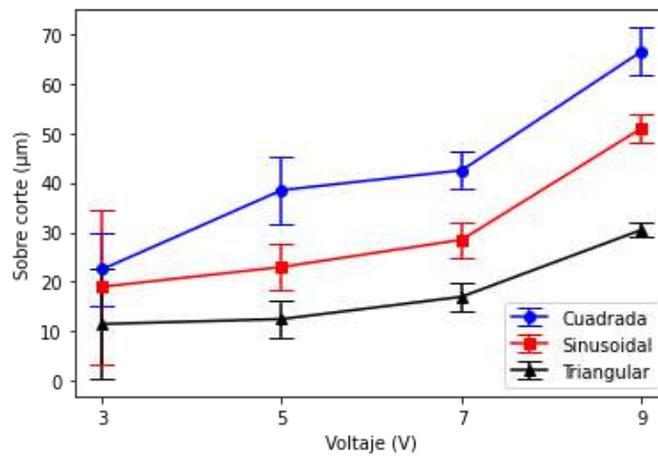


Figura 5.7: Error en el sobre corte con respecto a la media de repeticiones de cada combinación de voltaje y forma de onda.

El segundo parámetro de interés es la profundidad alcanzada, los resultados revelaron una tendencia similar a la observada en el sobre corte. Como se muestra en la Figura 5.8, la profundidad del maquinado aumenta a medida que se incrementa el voltaje de la fuente de alimentación, este patrón que se mantiene para todas las combinaciones de voltaje y forma de onda consideradas en este estudio. El error con respecto a las repeticiones realizadas está en un intervalo de 1.11 a 11.1 μm y un error promedio de 4.14 μm . Es interesante observar que, al igual que en el caso del sobre corte, se puede notar un orden de magnitud ascendente en la profundidad del maquinado, con la forma de onda triangular alcanzando las menores profundidades, seguida por la sinusoidal y, finalmente, la cuadrada, esta relación entre la forma de onda y la profundidad podría deberse a las variaciones de voltaje propias de cada forma de onda durante el proceso de maquinado.

La forma de onda cuadrada, al tener una conmutación más brusca en el voltaje, podría estar generando condiciones más intensas de disolución del material, lo que resulta en el sobre corte más alto y la mayor penetración en la pieza de trabajo.

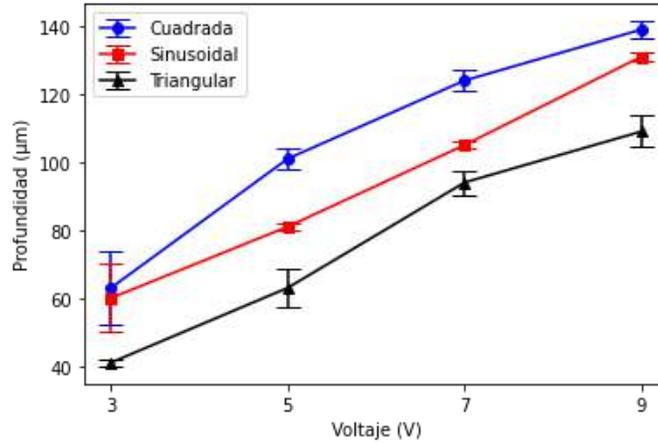


Figura 5.8: Error en la profundidad con respecto a la media de repeticiones de cada combinación de voltaje y forma de onda.

Un tercer parámetro de interés es la corriente inicial, en la Figura 5.9, en este caso también la corriente incrementa a medida que lo hace el voltaje, en el intervalo de 3 V se consigue una corriente mínima entre 6 y 10 mA la cual genera un sobre corte entre 11.5 y 22.5 µm con una profundidad que se sitúa en un rango de 41 a 63 µm, mientras que para el intervalo mayor de 9 V se alcanza un rango de 21 a 31 mA los cuales generan el máximo sobre corte y profundidad en un intervalo de 30 a 66 µm y 30 a 66 µm respectivamente. Además, al igual que en los parámetros previos, la forma de onda cuadrada lidera en términos de corriente inicial, seguida por la sinusoidal y, por último, la triangular. De manera general la corriente inicial presenta un error con respecto a la media de las repeticiones de 5.86 a 31.2 mA y un promedio de 15.6.

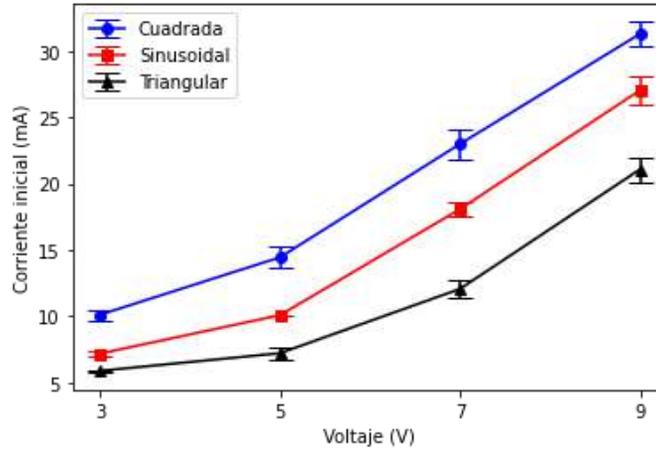


Figura 5.9: Error en la corriente de maquinado inicial con respecto a la media de repeticiones de cada combinación de voltaje y forma de onda.

Dado que el error en el sobre corte con respecto a la media de las tres repeticiones realizadas en los intervalos de 5 y 7 V son similares y mientras que la profundidad alcanzada en el intervalo de 7 V es mayor que en el de 5 V, se decidió elegir el intervalo de 7 V de polarización inicial para la celda electrolítica esto genera una profundidad de 108 μm sin afectar significativamente el sobre corte que resultó en 29.4 μm . Además, al optar por el intervalo de 7 V, se reservaron dos volts adicionales que son empleados durante las etapas posteriores del maquinado. Esta elección de voltaje no solo maximiza la profundidad del maquinado, sino que también ofrece flexibilidad para ajustes posteriores y mejoras adicionales en el proceso.

En resumen, los resultados obtenidos revelan una relación clara entre las formas de onda utilizadas y los parámetros de interés para la evaluación del proceso de maquinado electroquímico. Tanto el sobre corte como la profundidad de las perforaciones están directamente relacionados por la forma de onda de la señal aplicada tal como ya lo ha expuesto Sharma, et al. (2021). Se observa consistentemente que, independientemente del voltaje, las formas de onda triangular, sinusoidal y cuadrada siguen un patrón ascendente tanto en el sobre corte como en la profundidad. La forma de onda triangular muestra el menor sobre corte y la menor profundidad en comparación con las formas sinusoidal y cuadrada. Por otro lado, la forma de onda cuadrada genera el mayor sobre corte y la mayor

profundidad en la mayoría de los casos. En contraste, la forma de onda sinusoidal se encuentra en un punto intermedio entre la triangular y la cuadrada en términos de sobre corte y profundidad.

5.5.2 Selección de la frecuencia de maquinado

Se propuso una serie experimental con el objetivo de indagar en el efecto de la frecuencia en el maquinado electroquímico. La intención principal fue seleccionar el valor de la frecuencia de las formas de onda que generaran el menor sobre corte y la mayor profundidad en el proceso. Los detalles específicos de esta serie experimental, incluyendo los parámetros y las condiciones de las pruebas, se detallan en el apartado 4.3.4 del presente estudio. La Tabla 5.4 proporciona una visión completa de las características de esta serie experimental.

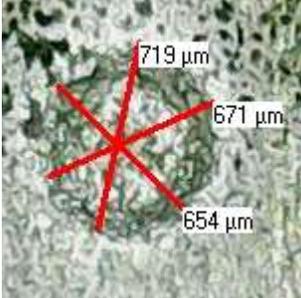
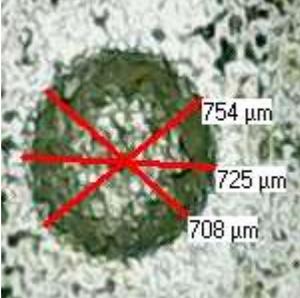
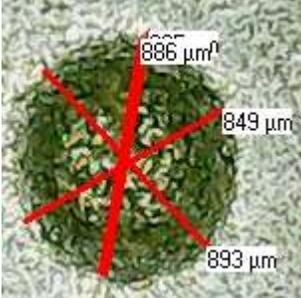
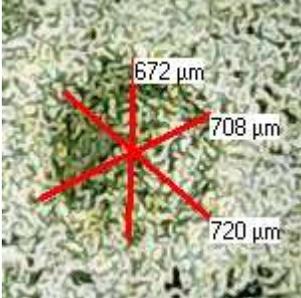
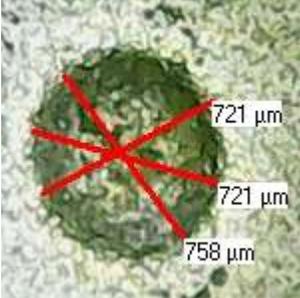
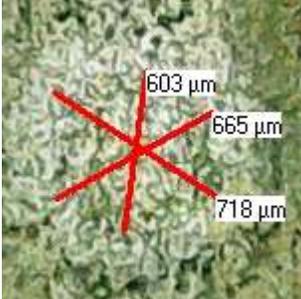
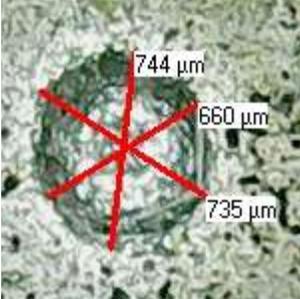
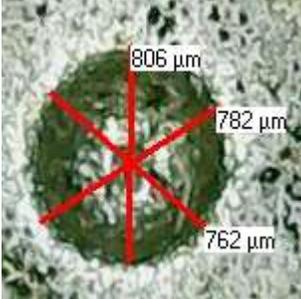
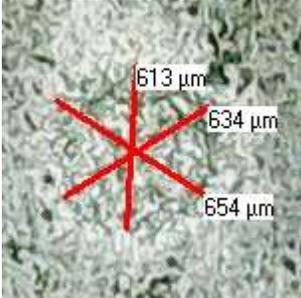
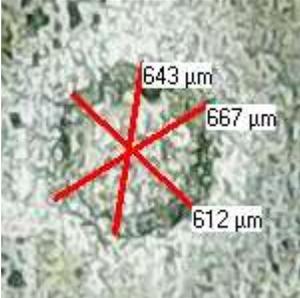
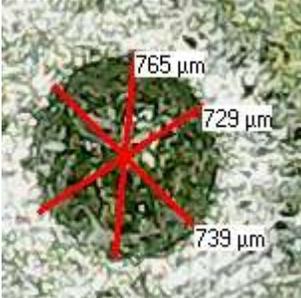
Tabla 5.4: Parámetros de la serie experimental para seleccionar la frecuencia.

Fuente de voltaje	Formas de onda	Sinusoidal, cuadrada, triangular
	Voltaje pico	7 V
	Frecuencia	1, 20, 40 y 60 kHz
Electrolito	Composición	Solución $H_2O + NaCl$ a 3.2 molar
	Resistividad	46.51 $\Omega \cdot mm$
	Conductividad	215 mS/cm
	Flujo	0.75 ml/s
Herramienta de trabajo (Cilindro hueco)	Material	Acero inoxidable
	Dimensiones	Diámetro externo 600 μm
		Diámetro interno 380 μm Longitud útil 10 mm
Pieza de trabajo	Material	Acero AISI 1018
	Composición	0.14 - 0.2 C, 0.6 - 0.9 Mn, Fe % balance peso (IIRSACERO, 2023)
IEG inicial		240 μm
Tiempo de maquinado		180 s

Después de realizar las perforaciones mediante maquinado electroquímico de las 12 combinaciones empleando las tres formas de onda (sinusoidal, cuadrada y triangular) y cuatro valores de frecuencia (1, 20, 40 y 60 k Hz) y sus dos repeticiones se procedió a

analizar los resultados. En la Tabla 5.5 se muestran los maquinados realizados de cada combinación de los niveles de frecuencia y forma de onda. Utilizando un microscopio óptico digital, se midió el diámetro de las perforaciones en cada caso. Además, se utilizó un vernier digital de altura para medir la profundidad de las perforaciones.

Tabla 5.5: Vista de los maquinados realizados con las tres formas de onda y 4 niveles de frecuencias.

	Triangular	Sinusoidal	Cuadrada
1 kHz			
20 kHz			
40 kHz			
60 kHz			

En la Figura 5.10, se observa que, en las formas de onda triangular, sinusoidal y cuadrada, a medida que incrementa la frecuencia disminuye el diámetro de la perforación y en consecuencia el sobre corte también es menor; el error con respecto a la media de repeticiones esta entre un mínimo de 0.5 μm y un error máximo de 45.15 μm mientras que el error promedio es de 13.95 μm lo que indica una repetibilidad entre experimentos. Entonces se puede presumir que el incremento de la frecuencia favorece la disminución del sobre corte al disminuir el diámetro de la perforación, pero resulta interesante cuestionar porque sucede esto, en el trabajo de Han, et al. (2018) menciona que en un maquinado a medida que incrementa la frecuencia disminuye el periodo de la señal lo que significa un menor tiempo de maquinado en el intervalo activo de la señal y además que durante la conmutación entre el estado activo e inactivo no se realice despolarización inmediata de la celda electrolítica, lo que puede traducirse en que los productos de las reacciones electroquímicas no tienen suficiente tiempo para ser arrastrados fuera del área de maquinado por el flujo del electrolito en el tiempo inactivo de la señal. Esto significa que los productos de disolución se acumulan cerca del electrodo, lo que reduce la posibilidad de que se disuelva material fuera del área deseada, por lo tanto, se obtienen perforaciones con un menor sobre corte, pero también menor profundidad.

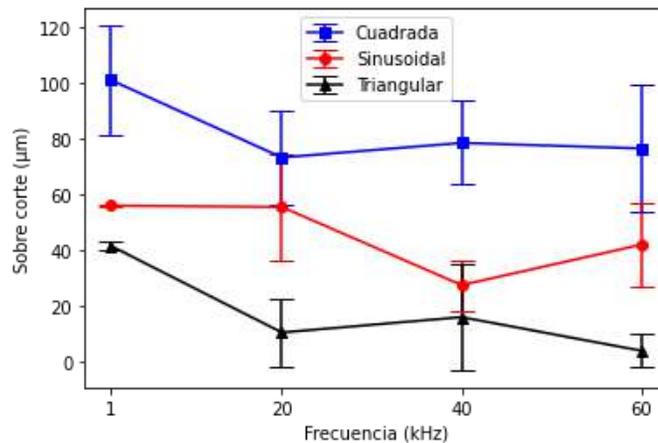


Figura 5.10: Error en el sobre corte con respecto a la media de repeticiones.

Para analizar el efecto de la frecuencia en la profundidad de la perforación, se generó la gráfica de la Figura 5.11, donde se observa una tendencia decreciente conforme

incrementa la frecuencia para las tres formas de onda. Debido a que la profundidad va decreciendo se demuestra que incrementar la frecuencia no es tan viable porque una menor profundidad resulta en un menor volumen removido. Se debe destacar que las barras de error representan el intervalo de dispersión de cada repetición, que de manera general se encuentra entre 1.65 y 11.7 μm con un promedio 4.18 μm , indicando la poca variabilidad de los resultados obtenidos en cada repetición del experimento lo que significa que los procedimientos se llevaron a cabo de manera consistente y los resultados pueden ser recreados en condiciones similares. Además de las observaciones sobre la profundidad y el sobre corte, es relevante notar que las formas de onda también siguen una tendencia específica en relación con la frecuencia. En general, se ha observado que las formas de onda tienden a ordenarse de menor a mayor profundidad en el siguiente patrón: triangular, sinusoidal y cuadrada; tal y como se ha observado en las gráficas anteriores.

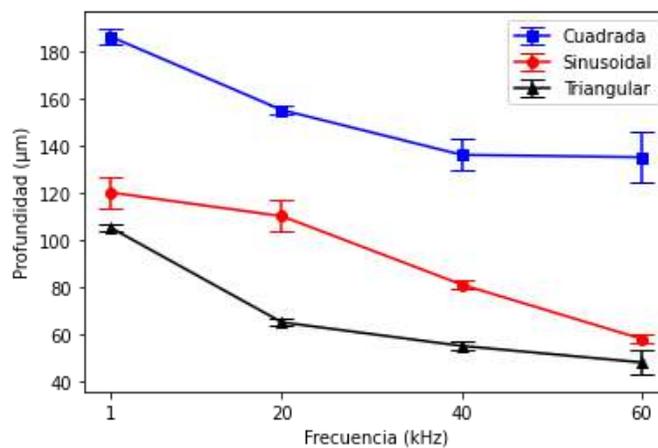


Figura 5.11. Error en la profundidad con respecto a la media de repeticiones.

Dado los resultados de la Figura 5.10 y la Figura 5.11 se obtuvieron dos aseveraciones contradictorias: el aumento de la frecuencia favorece la disminución del sobre corte mientras que la profundidad se ve afectada al disminuir su valor. Para comprender porque ocurre el fenómeno anterior se graficó la corriente inicial para cada combinación de forma de onda y frecuencia la cual se observa en la Figura 5.12, se observa que la corriente tiende a disminuir a medida que incrementa la frecuencia para las tres formas de onda, esto explica porque a menor frecuencia se obtiene mayor sobre corte y mayor profundidad. El

error con respecto a las repeticiones realizadas está en un rango de 0.7 y 3.1 μm y un promedio de 1.65 μm datos que validan una repetibilidad del experimento. También se refuerza la hipótesis mencionada anteriormente, que a medida que la frecuencia incrementa el periodo de la señal disminuye y el ciclo de limpieza correspondiente al estado inactivo del pulso no es suficiente para limpiar el área del maquinado por lo tanto se sugiere evitar altas frecuencias o usar una fuente bipolar para integrar un ciclo de limpieza como lo realizó Nopalera Angeles (2021).

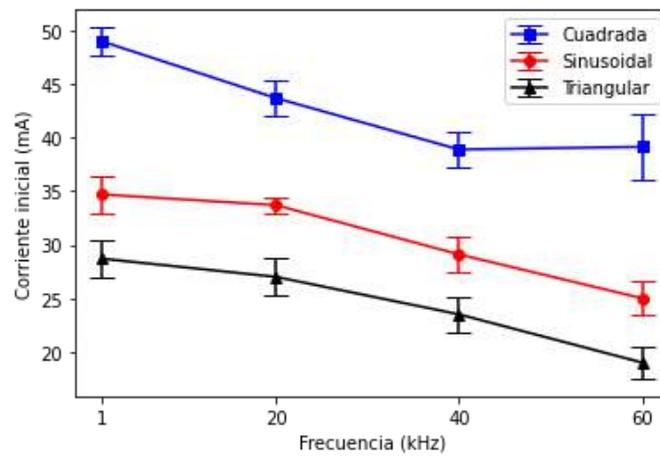


Figura 5.12: Error en la corriente inicial con respecto a la media de repeticiones.

Debido a que la profundidad y la corriente de maquinado inicial mantiene la relación de a mayor frecuencia menor profundidad y menor corriente y que el error en el sobre corte es similar cuando se empleó una frecuencia de 20 y 40 kHz y además según las imágenes de la Tabla 5.5 las perforaciones realizadas se distinguen mejor cuando se emplea una frecuencia de 20 kHz, por lo tanto, se seleccionó dicha frecuencia para los maquinados posteriores.

Al analizar los datos de la Figura 5.9, en el intervalo de 7 V se alcanza un intervalo de corriente inicial entre 12 a 22 mA recordando que se encuentra a una frecuencia de 1 kHz, mientras que los datos de la Figura 5.12, donde el voltaje de polarización fue de 7 V, en el punto de 1 kHz se alcanza un intervalo de corriente inicial fue de 28 a 49 mA, al revisar las condiciones de los maquinados y descartando las posibles fallas se observó que a medida que el electrolito se usa y a pesar de que se filtra, el electrolito va adquiriendo una

tonalidad amarilla. Se tomo una muestra de un electrolito de varios ciclos de maquinado que presentaba una tonalidad amarilla a la cual se le midió su conductividad la cual fue de 202 mS/cm una conductividad de 6.04% menos que su valor inicial de 215 mS/cm , si bien no es una cifra considerable se tiene la sospecha que las partículas diminutas que dan la tonalidad amarilla al electrolito interfieren en el flujo de la corriente entre los electrodos. Para minimizar este problema se sugiere emplear un filtro basado en tela adicional al de esponja y/o usar un electrolito nuevo en cada serie experimental.

5.6 Sintonización genética del controlador

En esta investigación, se ha seguido un enfoque metodológico para abordar la sintonización mediante un algoritmo genético de los intervalos de los conjuntos difusos del controlador aplicado en un proceso de maquinado electroquímico. En una primera fase, se llevó a cabo una serie de maquinados experimentales con diversas variaciones en los límites difusos del controlador. Estos maquinados fueron analizados minuciosamente, generando así un conjunto de datos representativo que sirvió como población inicial para nuestro posterior enfoque de optimización. En una segunda fase, se empleó un algoritmo genético para la reducción en el error MAPE de las perforaciones realizadas. Este proceso propuesto, donde primero se realizan los maquinados y se analizan sus resultados para generar la población inicial y luego se aplica el algoritmo genético para sintonizar los límites en los conjuntos difusos ha sido fundamental para obtener resultados significativos y confiables en este estudio.

5.6.1 Fase 1: Datos representativos para generar a la población inicial

En la fase crucial de sintonización de los límites en los conjuntos difusos del controlador, se llevó a cabo una serie experimental exhaustiva que implicó la realización de las 27 perforaciones de la Tabla 4.6. Cada una de estas perforaciones se caracterizó por una combinación única en los 6 límites de los conjuntos difusos, lo que implicó una diversidad en las condiciones del maquinado. Los detalles de esta serie experimental se encuentran detallados en el apartado 4.3.5. Estos experimentos proporcionaron un conjunto de datos

esencial para la afinación óptima de los límites difusos en el controlador. Los detalles de los parámetros generales del maquinado se encuentran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Parámetros de la serie experimental para generar los cromosomas de la población inicial del algoritmo genético.

Fuente de voltaje	Formas de onda	Cuadrada, sinusoidal y triangular
	Voltaje pico	7 V
	Frecuencia	20 kHz
Electrolito	Composición	Solución $H_2O + NaCl$ a 3.2 molar
	Resistividad	46.51 $\Omega \cdot mm$
	Conductividad	215 mS/cm
	Flujo	0.78125 ml/s
Herramienta de trabajo (Cilindro hueco)	Material	Acero inoxidable
	Dimensiones	Diámetro externo 600 μm
		Diámetro interno 380 μm Longitud útil 10 mm
Pieza de trabajo	Material	Acero AISI 1018
	Composición	0.14 - 0.2 C, 0.6 - 0.9 Mn, Fe % balance peso (IIRSACERO, 2023)
IEG inicial		240 μm

Después de realizar los maquinados y medir el error en la profundidad de las 27 combinaciones seleccionadas se calculó el error porcentual absoluto el cual se puede observar en Tabla 5.7, donde se enlistan cada una de las combinaciones en los intervalos de los conjuntos difusos y en la última columna se registró el error en la profundidad del maquinado realizado, cabe resaltar que el error MAPE de este conjunto de combinaciones fue de 25.24 %.

Tabla 5.7: Resultados de las 27 combinaciones seleccionadas.

N	Z1	Z2	G	m	S1	S2	Z1	Z2	G	m	S1	S2	Z1	Z2	G	m	S1	S2	Z1	Z2	G	m	S1	S2	E
1	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.8	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.267
2	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.213
3	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.167
4	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.267
5	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.23
6	-0.9	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.2125

7	-0.9	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.8	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.2188
8	-0.9	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.36
9	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.119
10	-0.9	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.167
11	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.036
12	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.23
13	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.45
14	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.399
15	-0.9	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.281
16	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.12
17	-0.9	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.55
18	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.56
19	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.095
20	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.229
21	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.167
22	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.267
23	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.13
24	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.28
25	-0.3	0	0	0.1	0	0.3	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.3	0	0	0.1	0	0.8	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.22
26	-0.3	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.1	0.5	0.9	0.39
27	-0.9	0	0	0.1	0	0.9	0.45	0.5	0.8	0.1	0.8	1	-0.8	0	0	0.1	0	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.5	0.6	0.19

Suma de errores 6.8153

Muestras 27

Error MAPE 0.2524

Los datos de la Tabla 5.7, específicamente el error en la profundidad de las perforaciones, han sido representados de manera gráfica en la Figura 5.13, esta visualización proporciona una perspectiva más clara y accesible de las variaciones del error en la profundidad.

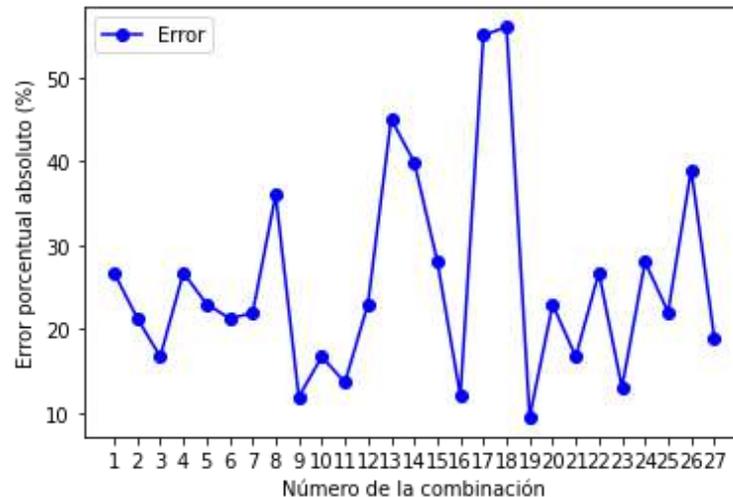


Figura 5.13: Errores porcentuales absolutos en la profundidad de la perforación de las 27 combinaciones elegidas que conforman a la población inicial.

5.6.2 Fase 2: Resultados del algoritmo genético

En este estudio, se llevó a cabo una evaluación de la repetibilidad del algoritmo genético mediante la realización de 40 iteraciones con diferentes configuraciones de generaciones, específicamente 20, 40, 60 y 80 generaciones respectivamente. La evaluación se centró en la minimización del error MAPE en la profundidad de los maquinados. Los resultados obtenidos se han representado en la Figura 5.14, que utiliza un gráfico de cajas y bigotes para mostrar la variabilidad en los datos. En cada uno de los cuatro niveles de generaciones propuestos, se observaron datos atípicos, lo que indica cierta variabilidad en el rendimiento del algoritmo dentro del rango de las 40 ejecuciones realizadas. Al analizar las medianas de las gráficas, se evidencia un ligero incremento en el error MAPE de la población a medida que aumenta el número de generaciones. Específicamente, la mediana del error MAPE para 20 generaciones es de 10.735 %, para 40 generaciones es de 10.775 %, para 60 generaciones es de 10.86 % y para 80 generaciones es de 10.85 %. Estos resultados sugieren que, aunque se observan datos atípicos, el aumento en el número de generaciones parece estar asociado a un incremento en el error MAPE en la profundidad,

en otras palabras, lejos de mejorar se empeora el desempeño. Dado que el intervalo de 20 generaciones tiene el menor error MAPE con 10.735 %, se optó por acotar el algoritmo a 20 generaciones.

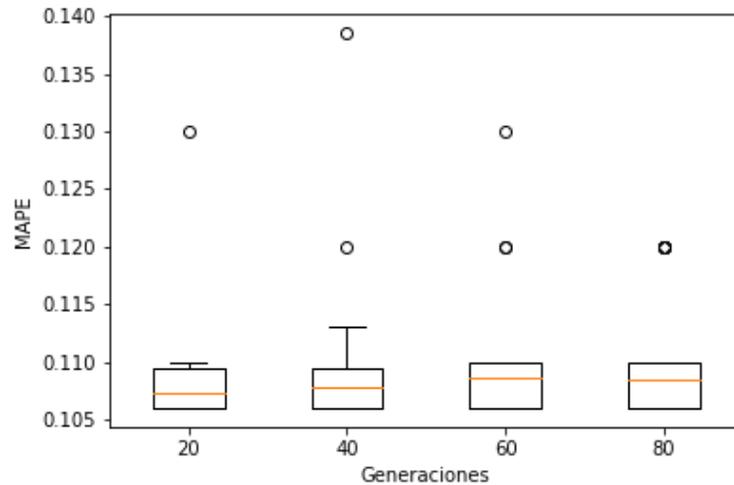


Figura 5.14: Repetibilidad del algoritmo genético al evaluar el error MAPE en la profundidad iterando 40 veces y 20, 40 60 y 80 generaciones por iteración.

En la Figura 5.15, se presenta de manera visual el rendimiento de las 40 iteraciones del algoritmo genético, cada una con 20 generaciones. Es notable observar que el algoritmo muestra una convergencia clara a partir de la séptima iteración, indicando que las soluciones encontradas tienden a estabilizarse y aproximarse a un óptimo general evaluado por la moda que en este caso fue de 10.6 %. Sin embargo, se señala que el dato atípico que se aparta significativamente de la tendencia general observado en la Figura 5.14, no logra alcanzar el nivel de convergencia observado en las otras iteraciones, lo que sugiere la presencia de ciertas condiciones o configuraciones particulares como la aleatoriedad en los algoritmos genéticos.

Una vez obtenido los intervalos en los conjuntos difusos que presentan el menor error en la profundidad se procedió a verificar los intervalos resultantes. La primera posición de la población de la última generación es el mejor cromosoma de la población. Los límites en los conjuntos difusos para la variable de error en la pendiente de corriente se encuentran la Tabla 5.8, asimismo, los límites correspondientes a la variable de ajuste en la IEG se

detallan en la Tabla 5.9, mientras que los límites para la variable de ajuste de voltaje se presentan en la Tabla 5.10. Estas tablas proporcionan la base fundamental para la configuración precisa de los conjuntos difusos.

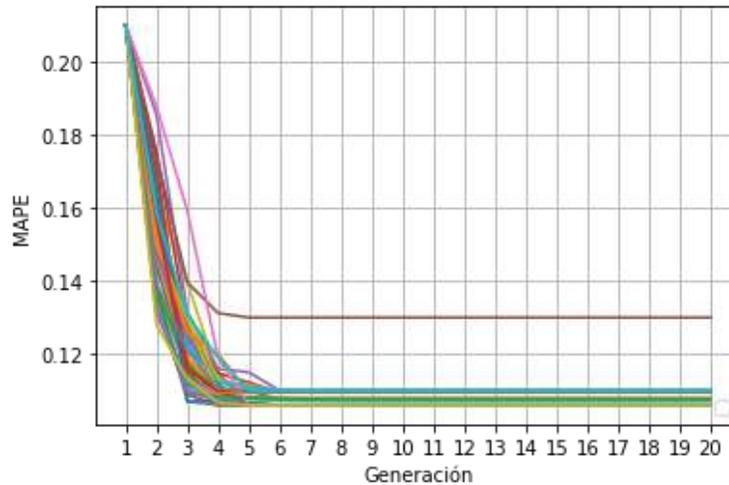


Figura 5.15: Repetibilidad del algoritmo genético al evaluar 40 iteraciones con 20 generaciones por iteración.

Tabla 5.8: Límites de los conjuntos difusos del error en la pendiente de corriente generados mediante el algoritmo genético.

Derivada de corriente (dI)					
z1	z2	g	m	s1	s2
-0.356	0	0	0.1	0	0.493

Tabla 5.9: Límites de los conjuntos difusos del ajuste en la IEG generados mediante el algoritmo genético.

Ajuste en la IEG (IEG)					
z1	z2	g	m	s1	s2
-0.436	0	0	0.1	0	0.375

Tabla 5.10: Límites en los conjuntos difusos del error en la pendiente de corriente generados mediante el algoritmo genético.

Ajuste de voltaje (V)					
z1	z2	g	m	s1	s2
0.206	0.5	0.5	0.1	0.5	0.739

Para poder visualizar de manera gráfica el resultado del algoritmo genético en la sintonización de los límites de los conjuntos difusos mostrados en las tablas anteriores, se generó la Figura 5.16 donde se observa el resultado de la variable error en la pendiente de corriente. De manera general el conjunto *Negativa* está más cerca del conjunto *Cero* que el conjunto *Positiva* dado que z1 tiene un valor de -0.356 mientras que s2 tiene un valor de 0.493, esto puede indicar que se requiere actuar más rápido cuando el error en la pendiente es menor a la referencia.

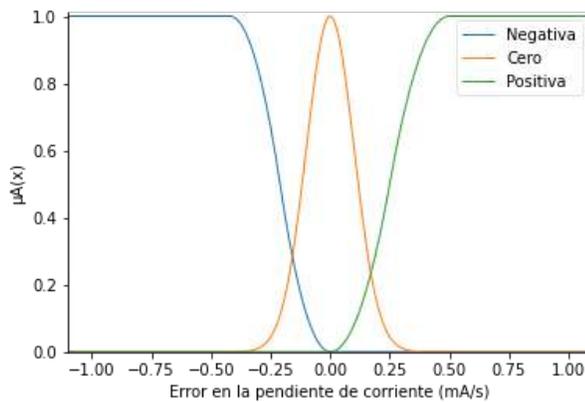


Figura 5.16: Visualización de los límites de los conjuntos difusos de la variable error en la pendiente de corriente generados mediante el algoritmo genético.

En la Figura 5.17 se observa de manera gráfica los resultados de la sintonización genética en los conjuntos difusos de la variable ajuste en la IEG. En este caso se observa que el conjunto *Cerca* está ligeramente más separado del conjunto *Estándar* que el conjunto *Lejos* esto debido a que z1 tiene un valor de -0.436 y s2 tiene un valor de 0.375. Esto puede indicar que se le da prioridad a la acción de separar a los electrodos cuando la estimación en la IEG sea menor a la IEG inicial.

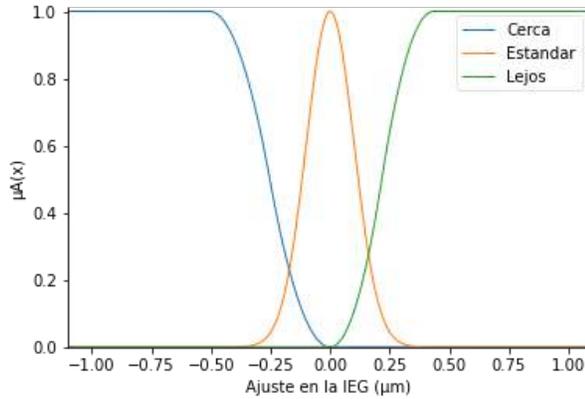


Figura 5.17: Visualización de los límites de los conjuntos difusos de la variable ajuste en la IEG generados mediante el algoritmo genético.

En la Figura 5.18, se observa los conjuntos difusos de la variable ajuste de voltaje generados mediante el algoritmo genético. El conjunto *Bajo* se encuentra muy alejado del conjunto *Normal*, que, del conjunto *Alto*, esto se debe a que el valor del límite z_1 del conjunto *Bajo* es de 0.206 mientras que el límite s_2 del conjunto *Alto* tiene un valor de 0.739, esto puede indicar que se le da prioridad a incrementar el voltaje que disminuirlo.

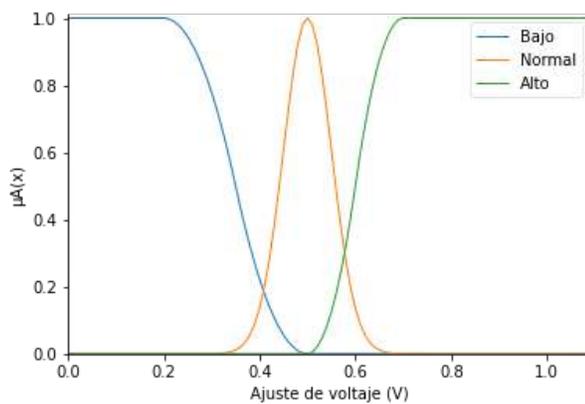


Figura 5.18: Visualización de los límites de los conjuntos difusos de la variable ajuste de voltaje generados mediante el algoritmo genético.

La sintonización del controlador difuso mediante un algoritmo genético aplicado a un proceso de maquinado electroquímico se presenta como una alternativa viable en esta investigación. Las gráficas de las tres variables (error en la pendiente de corriente, ajuste

de voltaje y ajuste de IEG) generadas a partir de los límites hallados mediante el algoritmo genético reflejan de manera unánime que sus conjuntos difusos presentan un solapamiento entre dos conjuntos difusos cumpliendo un punto clave en la lógica difusa. Este solapamiento es esencial en la lógica difusa, ya que permite una transición suave y continua entre diferentes conjuntos, brindando flexibilidad y adaptabilidad al controlador tal como lo señala Rodríguez Franco, et al. (2020).

5.7 Evaluación del controlador

Para realizar la evaluación del controlador con ajuste de sus intervalos de los conjuntos difusos de las variables error en la pendiente de corriente, ajuste de IEG y ajuste de voltaje que se realizó mediante un algoritmo genético se realizó una serie de maquinados con las combinaciones de las tres formas de onda y 3 profundidades de perforaciones, los detalles de los parámetros para esta serie experimental se encuentran en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11: Parámetros de la serie experimental para evaluar el controlador sintonizado genéticamente.

Fuente de voltaje	Formas de onda	Cuadrada, sinusoidal y triangular
	Voltaje pico inicial	7 V
	Frecuencia	20 kHz
Electrolito	Composición	Solución $H_2O + NaCl$ a 3.2 molar
	Resistividad	46.51 $\Omega \cdot mm$
	Conductividad	215 mS/cm
	Flujo	0.78125 ml/s
Herramienta de trabajo (Cilindro hueco)	Material	Acero inoxidable
	Dimensiones	Diámetro externo 600 μm
		Diámetro interno 380 μm Longitud útil 10 mm
Pieza de trabajo	Material	Acero AISI 1018
	Composición	0.14 - 0.2 C, 0.6 - 0.9 Mn, Fe % balance peso (IIRSACERO, 2023)
IEG inicial		240 μm
Profundidad estipulada		290, 340 y 390 μm

Luego de llevar a cabo la serie experimental que comprende las 9 combinaciones de las tres formas de onda y las tres profundidades de maquinado, se procedió a analizar los resultados para calcular el porcentaje de sobre corte en relación con el diámetro de la herramienta de trabajo (600 μm), esto con respecto a la media de las tres repeticiones realizadas. La Figura 5.19. muestra estos porcentajes para cada configuración. Se destaca que el porcentaje de sobre corte varía entre las diferentes combinaciones, con un rango que va desde un mínimo de 17.98% hasta un máximo de 33.74%, y un promedio general de 25.83%, además el porcentaje de error incrementa a medida que incrementa la profundidad, este fenómeno es normal debido a que el tiempo de maquinado también incrementa. Para evaluar la consistencia de estos resultados, se calculó el error en el porcentaje con respecto a las repeticiones realizadas que se visualizan como las rayas diagonales en cada punto, obteniendo valores de 1.07%, 6.07%, y 3.4%, respectivamente, para el mínimo, máximo y promedio de sobre corte. Se observa una disminución de las barras de error entre repeticiones a medida que la profundidad estipulada incrementa, este fenómeno puede estar asociado a la distribución del universo de discurso en la variable área de exposición, a medida que incrementa la profundidad, el área de exposición inicial disminuye con respecto al área de exposición total.

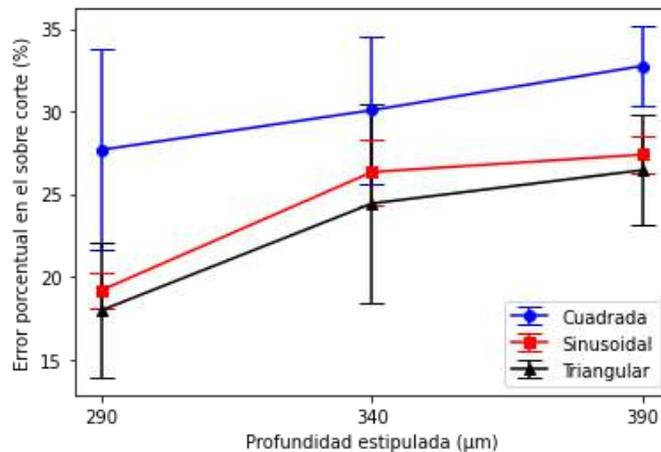


Figura 5.19: Error porcentual en el sobre corte de la serie experimental.

El principal objetivo establecido fue disminuir el error MAPE en la profundidad del maquinado, en la Figura 5.20, se observa el error porcentual en los maquinados realizados

los cuales oscilan entre 5 y 27 %, mientras que el cálculo del error MAPE en la profundidad estipulada fue de 12.2 %, este resultado es 1.5% mayor a lo alcanzado mediante el algoritmo genético que fue de 10.7%.

La tendencia observada, donde a mayor profundidad el error en la profundidad estipulada disminuye que se traduce como una mejora, se puede atribuir a una consideración del diseño del controlador difuso. Al proponer profundidades específicas de 50, 100 y 150 μm , se establecieron descensos de la herramienta de 290, 340 y 390 μm respectivamente. Esta diferencia en los niveles de descenso implica que, a mayores profundidades, el área de exposición inicial del electrodo ocupa un porcentaje menor del área de exposición total. En otras palabras, a medida que la herramienta desciende más profundamente en la pieza de trabajo, el área de impacto inicial se reduce. Esta relación entre el área de exposición inicial y el área de exposición total determinada por la profundidad estipulada de la perforación proporciona una explicación lógica de por qué a mayores profundidades, el error en la medición de la profundidad tiende a disminuir.

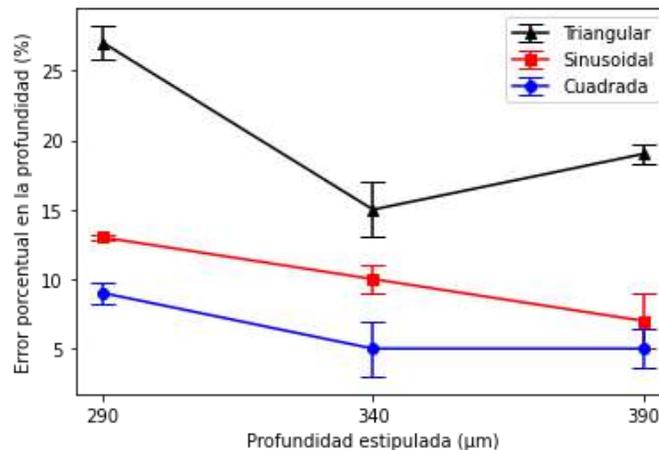


Figura 5.20: Error porcentual en la profundidad estipulada.

Para verificar que el controlador difuso ajusta la IEG de manera controlada, se grafica la posición del electrodo. La Figura 5.21 presenta la posición de la herramienta de trabajo al realizar un maquinado de 340 μm de profundidad; la herramienta de trabajo empieza en una posición de 240 sobre la pieza de trabajo es decir la IEG inicial, a medida que se desgasta a la pieza de trabajo se ajusta la posición de la herramienta de trabajo hasta llegar

a una posición de $-100 \mu\text{m}$ y considerando la separación de $240 \mu\text{m}$ entonces el maquinado final tiene una profundidad cercana a los $340 \mu\text{m}$.

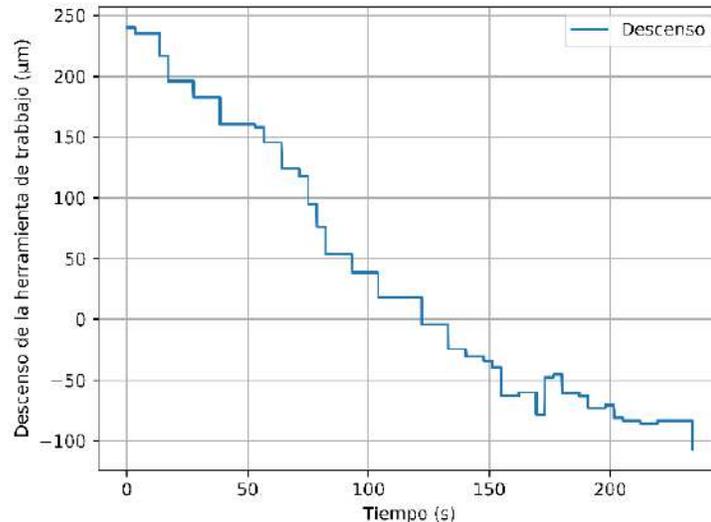


Figura 5.21: Posición del electrodo para un maquinado de $340 \mu\text{m}$ de profundidad.

En resumen, la aplicación del algoritmo genético para ajustar los intervalos en los conjuntos difusos del controlador difuso ha demostrado ser una estrategia eficaz y prometedora. Gracias a esta técnica, se logró identificar los límites en los conjuntos difusos del controlador para reducir significativamente el error MAPE en la profundidad del maquinado de 25.24% a un 10.7% teórico y un resultado real de 12.2% el cual solo tiene un 1.5% de diferencia. Este enfoque de optimización no solo ha mejorado la precisión del proceso al evaluar el porcentaje de sobre corte y el error en la profundidad, sino que también ha permitido una adaptación dinámica a las variaciones en las condiciones de maquinado. Un hallazgo notable fue la relación entre el porcentaje del área de exposición inicial con respecto al área de exposición total y la disminución del error en la profundidad. A medida que este porcentaje del área de exposición inicial disminuye, el error también se reduce, lo que indica una clara correlación entre la optimización del área de exposición y la precisión del maquinado. Estos resultados respaldan la utilidad y la relevancia de los algoritmos genéticos en la mejora de los sistemas de control difuso en aplicaciones de maquinado electroquímico y sientan las bases para investigaciones futuras en la búsqueda de un control más preciso y adaptable en este campo.

6 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una fuente de alimentación para el proceso de maquinado electroquímico basada en la selección, rectificación y amplificación de señales provenientes de tres generadores de funciones. También el sistema de monitoreo de voltaje y corriente, mediante una resistencia de muestreo, divisor de voltaje y conversores de voltaje RMS a DC, funcionó de manera precisa al tener una mínima discrepancia al comparar las lecturas realizadas con el sistema de monitoreo y las realizadas con ayuda de un osciloscopio. Se logró identificar la distancia entre electrodos (IEG) y realizar el ajuste de la misma variable mediante el monitoreo de la corriente de maquinado y voltaje de polarización además de la estimación del área de exposición del electrodo. El controlador difuso desarrollado permitió el ajuste de la IEG, así como del voltaje de polarización mediante la evaluación de la pendiente de corriente de maquinado y la estimación del área de exposición.

Al incorporar la selección de forma de onda entre triangular, sinusoidal y cuadrada, se evidencia que, maquinados con los mismos parámetros, pero con diferente forma de onda producen diferentes niveles de sobre corte, pero siguen patrones distintivos. En términos de sobre corte, se observa que la forma triangular exhibe consistentemente el menor porcentaje, seguida por la sinusoidal, mientras que la cuadrada presenta el mayor sobre corte. Esta tendencia se atribuye a la magnitud de corriente que fluye en la celda electrolítica, donde la forma triangular tiene la menor corriente RMS de maquinado; contrariamente, la forma cuadrada tiene la mayor corriente RMS de maquinado y la forma sinusoidal obtiene una corriente RMS media entre la generada por una forma triangular y una forma cuadrada. Este comportamiento se refleja también en la profundidad de la perforación, donde se mantiene el orden de menor a mayor: triangular, sinusoidal y cuadrada. Estas observaciones subrayan la influencia crucial de la forma de onda en el proceso de maquinado electroquímico.

El controlador difuso de múltiples entradas y salidas para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico se destaca como parte central de este trabajo. Al realizar la identificación de parámetros al evaluar un voltaje de polarización en rango de 3 a 9 V, se encontró que una polarización de 7 V obtuvo una buena relación

de diámetro de sobre corte de 29.4 μm y profundidad con 108 μm , mientras que la frecuencia fue explorada en un rango de 1 a 60 kHz dando como resultado una frecuencia de 20 kHz con un sobre corte aceptable de 40.8 μm sin sacrificar la profundidad con 91.1 μm . La implementación de este controlador se basó en un exhaustivo análisis de 64 combinaciones en los límites difusos, considerando seis conjuntos difusos para tres variables clave del controlador, con dos posibles valores por cada variable. De estas combinaciones, se seleccionaron aleatoriamente 27 controladores, los cuales fueron evaluados mediante perforaciones con el objetivo de optimizar el porcentaje de error en la profundidad. Este indicador fue crucial para calcular el error porcentual medio absoluto (MAPE), que para el conjunto de los 27 controladores seleccionados fue de 25.24%

Se logró identificar una combinación de límites de los conjuntos difusos de las variables del controlador que produce un menor error MAPE en la profundidad de los maquinados realizados al emplear un algoritmo genético como método de optimización y búsqueda a partir de una población inicial 27 controladores que fueron probados. El algoritmo genético redujo el error MAPE de 25.24 % general a un teórico de 10.7 %.

Se validó el controlador difuso generado por el algoritmo genético realizando maquinados con una profundidad de 290, 340 y 390 μm y las tres formas de onda, el resultado fue un diámetro de sobre corte de 25.83 % y un error MAPE en la profundidad de 12.2 % apenas 1.5 % más que el resultado teórico del algoritmo genético.

De manera general, la sintonización del controlador difuso mediante el algoritmo genético alcanzó resultados satisfactorios con respecto a la hipótesis, al generar un diámetro de sobre corte de 25.83 %, en comparación al controlador ajustado de manera empírica de (Nopalera Angeles, 2021) de 39 %. Entonces, se logró reducir en 13.17 %. Por otro lado, el error en la profundidad fue de 12.2 % mientras que el error reportado por (Nopalera Angeles, 2021) es de 6.7 %, esto indica un 5.5 % más.

Como trabajo a futuro se propone mejorar el control difuso hasta obtener un error en la profundidad menor al 6.7 % y el desarrollo de un sistema basado en visión artificial para la calibración y medición automática de diámetro de sobre corte y la profundidad.

REFERENCIAS

- Abdel, H. & El-Hofy, G., 2005. Electrochemical Processes. En: *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. Alejandria, Egipto: McGraw Hill Professional, p. 77–112.
- Almache Cabrera, J., 2013. Lógica clásica y lógica difusa: Facetas que las caracterizan. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 2(2), pp. 91-101.
- Avelar Uribe, H., Gutiérrez Torres¹, L., Zúñiga Félix, I. & Sánchez Hernández, Z., 2019. Diseño e implementación de un algoritmo genético para la predicción de una variable. *Research in Computing Science*, 148(8), pp. 187-197.
- Ballesteros Ricaurte, J. A., 2010. Metodología de clonación artificial basada en técnicas de inteligencia artificial, aplicada en industria de níquel y cobalto. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, 2(4), pp. 27 - 38.
- Catarino Aguilar, O., 2017. *Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico*, Atlacomulco, México: Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis de maestría en Ciencias de la Computación, Centro Universitario UAEM Atlacomulco.
- Civelek, Z., 2020. Optimization of fuzzy logic (Takagi-Sugeno) blade pitch angle controller in wind turbines by genetic algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(1), pp. 1-9.
- Feltan, C. & Luis Caballero, A., 2016. Principios de lógica difusa. En: *Lógica difusa*. Primera ed. Argentina: Oberá, Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería.
- Gallegos Miranda, I., 2019. *Sistema Computacional para la remoción controlada de Material en un proceso de Maquinado Electroquímico Pulsado*, Atlacomulco, México: Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis de maestría en Ciencias de la Computación, Centro Universitario UAEM Atlacomulco.

García Mejía , J. F. y otros, 2022. Modelado de un sistema de manufactura no convencional usando lógica difusa y algoritmos genéticos. *Programación Matemática y Software*, 14(3), pp. 47-56.

Grover, M. P., 2007. Procesos de maquinado electroquímico. En: *Fundamentos de manufactura moderna*. México: McGRAW-HILL, pp. 623-626.

Gutiérrez Reina, D., Tapia Córdoba, A. & Rodríguez del Nozal, Á., 2020. Introducción a los algoritmos genéticos. En: *Algoritmos Genéticos con Python: Un enfoque práctico para resolver problemas de ingeniería*. s.l.:Marcombo, pp. 17-47.

Han, F., Chen, W., Ying, W. & Zhang, J., 2018. Effects of a polarization on a machining accuracy in pulse electrochemical machining. *Procedia Cirp*, Volumen 68, p. 493–498.

IIRSACERO, 2023. *Ficha Técnica Acero 1018 - iirsacero*. [En línea] Available at: <https://iirsacero.com.mx/wp-content/uploads/2019/08/Ficha-T%C3%A9cnica-Acero-1018-iirsacero.pdf> [Último acceso: 25 octubre 2023].

Lau, H. C., Nakandala, D. & Zhao, L., 2015. Development of a hybrid fuzzy genetic algorithm model for solving transportation scheduling problem. *JISTEM-Journal of Information Systems and Technology Management*, 12(3), pp. 505-524.

Leyva Bravo, J., 2018. *Modelado del proceso de maquinado ECDM mediante lógica difusa*, Saltillo, Coahuila: COMIMSA, Tesis de maestría en Ciencia y Tecnología en Manufactura Avanzada, Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología COMIMSA.

Mole, T. y otros, 2016. The Development of a Pulsed Power Supply for μ ECM. *Procedia CIRP*, Volumen 42, pp. 809-814.

MPJA, 2023. *Tb6560 stepping motor driver*. [En línea] Available at: <https://www.mpja.com/download/31306ms.pdf> [Último acceso: 11 octubre 2023].

Nopalera Angeles, I. U., 2021. *Algoritmo de control difuso para el ajuste de polarización de un proceso de maquinado electroquímico pulsado*, Atlacomulco, México: Universidad

Autónoma del Estado de México, Tesis de maestría en Ciencias de la Computación, Centro Universitario UAEM Atlacomulco.

Noshadi, T., Dadvar, M., Mirza, N. & Shamseddini, S., 2015. Adjust genetic algorithm parameter by fuzzy system. *Ciencia e Natura*, Volumen 37, pp. 190-194.

Patel, D. S., Sharma, V., Jain, V. K. & Rankumar, J., 2020. Reducing overcut in electrochemical micromachining process by altering the energy of voltage pulse using sinusoidal and triangular waveform. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volumen 151, p. 103526.

RENESAS, 2019. *X9C102, X9C103, X9C104, X9C503 Datasheet*. [En línea] Available at: <https://www.renesas.com/us/en/document/dst/x9c102-x9c103-x9c104-x9c503-datasheet> [Último acceso: 11 octubre 2023].

Rodríguez Franco, M. E., Delgado Guerrero, S. H., López Álvarez, Y. F. & Jara Ruiz, R., 2020. Sintonización genética de sistema de inferencia difuso aplicado al control de posición en un motor de corriente directa. *Revista de Innovación Sistemática*, 4(14), pp. 1-6.

Rodríguez, P., Hidalgo, D. & Labarga, J., 2018. Optimization of pulsed electrochemical micromachining in stainless steel. *Procedia Cirp*, Volumen 68, pp. 426-431.

Segundo Lovera, J. F. y otros, 2022. Sistema embebido para el monitoreo y ajuste de parámetros en un proceso de maquinado electroquímico. *Coloquio de investigación multidisciplinaria CIM*, 10(17), pp. 86-93.

Sharma, V. y otros, 2021. Investigations into machining accuracy and quality in wire electrochemical micromachining under sinusoidal and triangular voltage pulse condition. *Journal of Manufacturing Processes*, Volumen 62, pp. 348-367.

SIMAC Electronics GmbH, 2021. *tehnichni-podatki-2355879-joy-it-joy-it-cnc-krmiljenje-osi.pdf*. [En línea] Available at: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/>

</en/002355879DS00/tehnichni-podatki-2355879-joy-it-joy-it-cnc-krmiljenje-osi.pdf>

[Último acceso: 11 octubre 2023].

STMicroelectronics, 2016. *General purpose JFET dual operational amplifiers*. [En línea]

Available at: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/tl082.pdf>

[Último acceso: 11 octubre 2023].

TEXAS INSTRUMENTS, 2018. *ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs*. [En línea]

Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1114.pdf>

[Último acceso: 11 octubre 2023].

TEXAS INSTRUMENTS, 2023. *CD405xB CMOS Single 8-Channel Analog Multiplexer or Demultiplexer*. [En línea]

Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4051b.pdf>

[Último acceso: 11 octubre 2023].

Xiaolong, F., Peng, L., Yongbin, Z. & Di, Z., 2016. Research on multiple wires electrochemical micromachining with ultra-short voltage pulses. *Procedia CIRP*, Volumen 42, pp. 423-427.

Xu, L., Ning, J. & Zhao, C., 2020. Electrochemical micromachining based on time constant control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volumen 145, p. 106920.

Yong, L. y otros, 2010. Experimental investigation on complex structures machining by electrochemical micromachining technology. *Chinese Journal of Aeronautics*, 23(5), pp. 578-584.

Zhao, C. & Xu, L., 2018. Limiting current density in electrochemical micromachining. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 8(4), pp. 321-330.

Zhao, C. & Xu, L., 2020. Pulse width tuning in electrochemical micro-machining system. *IEEE Access*, Volumen 8, p. 23713–23719.