



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO



“Algoritmo de control difuso para el ajuste de polarización de un proceso de
maquinado electroquímico pulsado”

T E S I S

Que para obtener el Grado Académico de:

Maestro en Ciencias de la Computación

Presenta:

Irvin Uriel Nopalera Angeles

Director de Tesis:

Dr. Everardo Efrén Granda Gutiérrez

Tutores adjuntos:

Dr. José Arturo Pérez Martínez

Dr. Allan Antonio Flores Fuentes

Octubre de 2021

PUBLICACIONES

Nopalera, I., Granda, E., Pérez, J., García, J. & Flores, A., 2020. Control difuso para la regulación de flujo de electrolito en un proceso no convencional de Micro-Manufactura. Journal CIM, Vol. 8, N° 1. pp. 1086-1093. ISSN: 2007-8102

Abstract

Fuzzy Logic emulate the approximate reasoning from the human cognitive process. Thus, it is applied in the industry for the design of intelligent control systems. Z, S and Gaussian functions were used for the design of a multiple inputs – one output Fuzzy Logic controller in conjunction with a Mamdani inference system to regulate the electrolyte flow in a non-conventional Micro-Manufacturing process. It is shown that, by considering the flow error signal and the rate of change in the flow with respect to the time, it is possible to resemble the response time of a robust control technique such as Proportional Integral Derivative, with a difference as little as 0.4 s. Furthermore, the over-shoot observed in the diffuse technique is less than 50 % and a shorter establishment time 3 seconds.

Nopalera, I., Granda, E., Pérez, J., & Flores, A., 2021. Multiple input multiple output fuzzy control for pulsed electrochemical micro machining. IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2021). Ixtapa, México. Aceptado.

Abstract

With the development of the industry in the field of modern manufacturing, the process of electrochemical micro-machining by pulses is distinguished, which allows the removal of material in parts with conductive properties by means of anodic dissolution. However, due to the number of variables involved and the physical characteristics, it presents a non-linear behavior, making it difficult to apply conventional control methods through the development of a mathematical model. In this sense, fuzzy logic with the Mamdani method is adopted as an alternative to solve the nonlinearity through the assessment of the current slope error and the electrode exposure area through linguistic labels, thus delimiting the inter electrode gap and the polarization voltage to ensure the controlled material removal. Finally, by contrasting with a fuzzy technique of one input and one output identified in the literature, a 21% reduction in the average lateral over-cutting effect is obtained, demonstrating the benefits of considering the voltage variable as a relevant factor for the decrease of excess material wear.

RESUMEN

Dentro del campo de la industria moderna existe el método denominado micro maquinado electroquímico por pulsos. En términos generales, es un proceso empleado para realizar el desgaste controlado de material en componentes metálicos con propiedades conductoras, mediante el proceso de disolución anódica. Dicho proceso ocurre cuando se aplica un voltaje de polarización (en forma de pulsos eléctricos) entre las herramientas empleadas, denominadas ánodo y cátodo, existiendo entre ambos una separación micrométrica, mientras se encuentran inmersos en un electrolito. Sin embargo, para cada uno de estos elementos pueden existir diferentes configuraciones o condiciones de operación, lo que resulta en un proceso relativamente completo y multivariado. A pesar de ser una técnica relativamente sencilla a simple vista, existe un parámetro de error comúnmente conocido como efecto de sobre corte, el cual describe la relación de las dimensiones de la herramienta en comparación con las mediciones que presenta el producto terminado. En consecuencia, este error se convierte en uno de los principales indicadores de la precisión del maquinado, y por ello es de relevancia para este proceso.

Con base en este criterio, y en consideración con el desarrollo de las técnicas de cómputo inteligente continuamente a la vanguardia aplicadas en los problemas de control, fue seleccionada la técnica conocida como Lógica Difusa, para realizar la estimación de los parámetros con mayor relevancia en relación con el efecto de sobre corte. En este sentido, según el análisis de la literatura, fueron seleccionadas el área de exposición y el error en la pendiente de la corriente de maquinado, como los parámetros de evaluación de un sistema tipo Mamdani, cuyas salidas son la distancia inter-electrodos y el voltaje de polarización, convirtiendo este enfoque de control de un proceso de manufactura no convencional en un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas.

Derivado del criterio difuso adoptado, fueron realizados una serie de experimentos para establecer la frecuencia de operación de la fuente pulsada, así como el conjunto de restricciones delimitadas por una serie de reglas difusas que proporcionan al sistema de inferencia una base de conocimiento suficiente para determinar los parámetros de operación, y así promover una reducción en la remoción en exceso del material lateral de la pieza de trabajo.

Finalmente, mediante el análisis de los avances descritos en la literatura, se presentan como referencia los resultados reportados por un sistema difuso de una entrada y una salida, destacando un efecto de sobre corte equivalente al 62 %. En este sentido, como resultado la aplicación de un total de 18 reglas y tres conjuntos difusos para cada variable delimitados por funciones Z, S y Gaussianas en el sistema de múltiples entradas y múltiples salidas, se reporta en la presente investigación que el porcentaje promedio de efecto de sobre corte fue de 39 %, logrando decrementar este fenómeno en un estimado del 23 %. De este modo también se validó la significancia de la consideración del área de exposición y la corriente de maquinado para aproximar de manera indirecta la distancia entre electrodos y el voltaje adecuado de polarización de un proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos.

Palabras Clave: Manufactura, no convencional, sobre-corte, Lógica difusa.

ABSTRACT

Pulsed electrochemical micro machining is a method in the field of modern industry which is a process used to perform controlled material wear on metallic components with conductive properties by anodic dissolution. This process occurs when a polarization voltage (pulsed waveform) is applied between the tools used, called anode and cathode, with a micrometric separation between them, while they are immersed in an electrolyte. It is considered a complete and multivariate process due to the number of configurations or operating conditions that can exist for each of these elements. Although it is a relatively simple technique, there is an error parameter commonly known as the overcut effect, which describes the relationship of the tool dimensions compared to the measurements of the finished product. Consequently, this error becomes one of the main indicators of machining accuracy and is therefore of relevance to this process.

Based on this criterion, and in consideration of the development of intelligent computing techniques continuously at the forefront applied to control problems, the technique known as Fuzzy Logic was selected to estimate the most relevant parameters in relation to the over-cutting effect. In this sense, according to the literature analysis, the exposure area, and the error in the slope of the machining current were selected as the evaluation parameters of a Mamdani type system, where outputs are the inter-electrode distance and the bias voltage, transforming this control approach of a non-conventional manufacturing process into a multi-input, multi-output system.

Derived from the adopted fuzzy criterion, a series of experiments were performed to establish the operating frequency of the pulsed source, as well as the set of constraints bounded by fuzzy rules to provide the inference system with a knowledge base to determine the operating parameters, thus promoting the reduction of excess material on the side of the workpiece.

Finally, by analyzing the advances described in the literature, the results reported for a fuzzy system with one input and one output are presented as a reference, highlighting an over-cutting effect equivalent to 62 %. In this sense, as a result of the application of a total of 18 rules and three fuzzy sets for each variable delimited by Z, S and Gaussian functions in the system of multiple inputs and multiple outputs, it is reported in this research that the average percentage of over-cutting effect was 39%, decreasing this phenomenon by 23%. Therefore, the significance of considering the exposure area and the machining current to indirectly approximate the distance between electrodes and the appropriate bias voltage of a pulsed electrochemical micromachining process was also validated.

Keywords: Manufacturing, non-conventional, over-cutting, fuzzy logic.

ÍNDICE

DEDICATORIAS	1
PUBLICACIÓN DE ARTÍCULO	2
RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
ÍNDICE	5
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
1 INTRODUCCIÓN.....	14
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2.1 Definición del problema.....	17
2.2 Objetivos de investigación	17
2.3 Preguntas de investigación	18
2.4 Justificación.....	18
2.5 Impactos	19
3 HIPÓTESIS	20
4 ESTADO DEL ARTE	21
4.1 Maquinado electroquímico.....	21
4.2 Sistemas de control basados en lógica difusa.....	33
4.3 Sistemas de control MIMO mediante Lógica Difusa.....	37
4.4 Análisis y discusión del estado del arte.....	39
5 MÉTODO	48
5.1 Requerimientos y especificaciones del sistema de computo.....	48
5.1.1 Software	48
5.1.2 Hardware.....	49

5.1.3	Diagrama de requisitos.....	50
5.1.4	Diagrama de flujo de funcionamiento del proceso PECM	52
5.1.5	Diagrama de distribución	53
5.1.6	Especificaciones técnicas del prototipo de maquinado.....	54
5.1.7	Sistema de ejes coordenados.....	54
5.1.8	Circuito de control del sistema de ejes coordenados	55
5.1.9	Módulo de regulación de voltaje.....	57
5.1.10	Unidad de pulsos.....	57
5.1.11	Configuración de unidad de suministro de pulsos	60
5.1.12	Sistema de circulación y filtrado de electrolito.....	61
5.1.13	Sistema de monitoreo.....	63
5.2	Identificación de parámetros del proceso PECM con corriente bipolar.....	65
5.3	Estimación del área de exposición	67
5.4	Diagrama de control del proceso PECM mediante un enfoque difuso	69
5.5	Definición de las variables difusas	71
5.5.1	Diseño de los conjuntos difusos.....	72
5.6	Sistema de inferencia.....	76
5.7	Método de defuzzificación	77
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	78
6.1	Caracterización de PECM con corriente bipolar	78
6.2	Identificación de frecuencia de trabajo.....	80
6.3	Documentación experimental para establecimiento de los conjuntos difusos ..	87
6.4	Diseño de maquinados.....	99
6.4.1	Especificaciones experimentales para maquinados lineales	99
6.4.2	Criterios de desempeño	102

6.4.3 Maquinados Poligonales	111
CONCLUSIONES	119
REFERENCIAS	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4. 1. Tasa de remoción de material registrada en los tipos de acero expuestos	24
Tabla 5. 1 Relación de pulsos negativos y pulsos positivos según la frecuencia de trabajo.	67
Tabla 5. 2 Etiquetas lingüísticas para las variables de entrada y salida del sistema difuso.	71
Tabla 6. 1. Configuración de parámetros para la experimentación del proceso PECM ..	78
Tabla 6. 2. Parámetros de experimentales para la definición de conjuntos difuso	90
Tabla 6. 3. Porcentaje de error en profundidad cuantificada para cada uno de los experimentos propuestos.	103
Tabla 6. 4. Porcentaje de efecto de sobre corte promedio obtenido en los ensayos experimentales propuestos	104
Tabla 6. 5. Porcentaje de error en la profundidad cuantificado para las pruebas de maquinados poligonales	112
Tabla 6. 6. Porcentaje de diámetro de sobre-corte obtenido en pruebas de maquinados poligonales.	113
Tabla 6. 7. Efecto de sobre corte obtenido en ensayos experimentales con un sistema MIMO y datos reportados en maquinados con un método SISO.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4. 1 Proceso de ECM (a)Antes de la remoción, (b) Después de la remoción.....	22
Figura 4. 2. Principio básico de reacciones implicadas en ECM (Abdel & El-Hofy, 2005).	23
Figura 4. 3. Principio básico de efecto de sobre corte durante ECM.....	26
Figura 4. 4. Principio básico de operación en PECM.	27
Figura 4. 5. Comportamiento de voltaje entre electrodo y pieza de trabajo durante PECM (a) 40 kHz; (b) 200 Hz (Han, et al., 2018).	28
Figura 4. 6. Unidad de pulsos empleada para acelerar el fenómeno de despolarización en PECM.....	29
Figura 4. 7. Comparativa del comportamiento de la corriente versus el voltaje a 10 kHz en el proceso de manufactura (Gallegos Miranda, 2019).	30
Figura 4. 8. Comparativa del comportamiento de la corriente versus el voltaje a 50 kHz en el proceso de maquinado electroquímico por pulsos (Gallegos Miranda, 2019).	30
Figura 4. 9. Sistema de control basado en el error (Wah, 2008).	35
Figura 4. 10. Sistema de control difuso (Wah, 2008).	36
Figura 5. 1 Diagrama de requerimientos del proceso PECM.	51
Figura 5. 2. Diagrama de flujo del funcionamiento de la técnica PECM.	52
Figura 5. 3. Diagrama de distribución de los elementos que conforman la unidad de cómputo del proceso PECM.	53
Figura 5. 4. Sistema mecánico de 3 ejes coordenados empleado en el proceso de PECM.	55
Figura 5. 5. Diagrama esquemático del circuito de control para los motores a pasos (Gallegos Miranda, 2019).	56
Figura 5. 6. Módulo de regulación de voltaje de la fuente de pulsos PECM.....	57
Figura 5. 7. Unidad de pulsos para el proceso de PECM.....	59
Figura 5. 8. Diagrama de flujo de funcionamiento de la unidad de polarización.	60
Figura 5. 9. Relación de pulsos positivos y negativos generados con la unidad de polarización.....	61
Figura 5. 10. Sistema de filtrado tubular.....	62

Figura 5. 11 Divisor de tensión utilizado para asegurar el monitoreo de voltaje no superior a 5 V.....	63
Figura 5. 12 Diagrama eléctrico del sistema de monitoreo de corriente y voltaje del proceso PECM.	64
Figura 5. 13 Electrodo utilizado para la experimentación del proceso PECM.	66
Figura 5. 14 Relación de pulsos unipolares (a) y pulsos bipolares (b) utilizados para la serie experimental.	67
Figura 5. 15. Diagrama de los elementos que conforman el área de exposición en el proceso de PECM.....	68
Figura 5. 16 Diagrama de control del proceso PECM mediante un enfoque difuso.....	70
Figura 5. 17 Funciones de membresía normalizadas para la evaluación del error de la pendiente [(mA/s) / (mA/s)]......	72
Figura 5. 18 Funciones de membresía normalizadas para la variable del área de exposición [mm ² / mm ²].	73
Figura 5. 19 Funciones de membresía normalizadas para la variable de salida “gap” [μm / μm]......	74
Figura 5. 20 Funciones de membresía normalizadas para la variable de salida de Voltaje [V / V].	75
Figura 5. 21. Perforación resultante para la obtención de un maquinado de 100 μm de profundidad movilizand o el electrodo cada decremento de corriente de 20 mA.....	88
Figura 6. 1. Efecto de sobre corte observado en la caracterización con los diferentes métodos de polarización.....	79
Figura 6. 2. Promedio de corriente inicial observada en la experimentación con su respectivo error en la dispersión de los datos.....	81
Figura 6. 3. Dispersión del efecto de sobre corte con respecto a la media de los datos obtenidos.	82
Figura 6. 4. Dispersión de los datos de profundidad con respecto a la media.	83
Figura 6. 5. Dispersión del volumen con respecto a la media de los resultados obtenidos.	83
Figura 6. 6. Corriente RMS de maquinado observada en la frecuencia de 20 kHz.	84
Figura 6. 7. Corriente RMS de maquinado observada en la frecuencia de 40 kHz.	85

Figura 6. 8. Corriente RMS de maquinado observada en la frecuencia de los 60 kHz....	86
Figura 6. 9. Corriente RMS de maquinado observada en la frecuencia de los 80 kHz....	86
Figura 6. 10. Corriente RMS de maquinado observada en la frecuencia de los 100 kHz.	87
Figura 6. 11. Corriente RMS detectada en maquinado de 100 μm tomando como parámetro de ajuste una ventana de corriente de 20 mA.....	88
Figura 6. 12.. Comportamiento de la corriente de maquinado descrito por la pendiente en 5 ajustes.....	89
Figura 6. 13. Análisis de datos del proceso PECM en la prueba experimental número 2.	91
Figura 6. 14. Maquinado con una profundidad de 160 μm y un área de exposición inicial.	91
Figura 6. 15. Diagrama del experimento con una profundidad deseada de 240 μm y un área de exposición inicial en el límite de la superficie de la pieza de trabajo.....	92
Figura 6. 16. Incremento del área de exposición del electrodo al descender mayor profundidad que el gap inicial.....	92
Figura 6. 17. Estado final para la prueba de maquinado con una profundidad de 400 μm	93
Figura 6. 18. Corriente de maquinado detectada para un descenso de 80 μm con voltajes de polarización de 3, 5 y 7 volts.....	94
Figura 6. 19. Corriente de maquinado detectada para un descenso de 400 μm con voltajes de polarización de 3, 5 y 7 V.....	95
Figura 6. 20. Porcentaje de error en la profundidad cuantificada para cada ensayo de prueba.....	96
Figura 6. 21. Dispersión identificada del MRR promedio en cada experimento.....	97
Figura 6. 22. Dispersión promedio del tiempo de maquinado cuantificado para cada experimento estipulado.	98
Figura 6. 23. Dispersión del diámetro de sobre corte promedio observado en cada profundidad de maquinado estipulada.	98
Figura 6. 24. Desgaste de material esperado al término del maquinado lineal sin perturbación.	99

Figura 6. 25. (A) Principio de una perturbación de profundidad sobre la superficie a maquinar y (B) Maquinado esperado al término del experimento.....	100
Figura 6. 26. Fotografía lateral y frontal de la perturbación sobre la superficie de trabajo obtenida con un microscopio digital ODAR63.....	101
Figura 6. 27. (A) Condiciones iniciales en el maquinado lineal con una inclinación de la pieza de 5° y (B) Maquinado esperado al término del experimento.....	101
Figura 6. 28. Esquema general para la especificación de los puntos de medición de profundidad y diámetro de maquinado en desgaste sin perturbación (A) y con perturbación de profundidad (B).....	102
Figura 6. 29. Corriente y voltaje RMS de maquinado observada en los ensayos lineales sin perturbación.....	105
Figura 6. 30. Maquinados lineales sin perturbación con una profundidad de (A)240 μm y (B) 400 μm.....	106
Figura 6. 31. Corrientes RMS observadas en maquinados lineales aplicando una perturbación de profundidad.....	107
Figura 6. 32. Voltaje y corriente RMS observada en maquinado lineal de 400 μm aplicando una perturbación de profundidad.....	108
Figura 6. 33. (A) Maquinado lineal de 240 μm y (B) 400 μm de profundidad con una perturbación perpendicular de 100 μm de altura.....	109
Figura 6. 34. Corriente RMS cuantificada en maquinados lineales aplicando una perturbación de inclinación de 5°.....	109
Figura 6. 35. Voltaje RMS observado para maquinados lineales aplicando una perturbación de inclinación.....	110
Figura 6. 36. (A) Maquinado lineal de 240 μm y (B) 400 μm de profundidad con una perturbación de inclinación de 5°.....	111
Figura 6. 37. Puntos de medición de profundidad y diámetro de maquinado poligonal.....	112
Figura 6. 38. Corriente y voltaje observado en las pruebas de maquinados poligonales.....	113
Figura 6. 39 Potencia generada en los maquinados poligonales.....	114

Figura 6. 40. Pruebas realizadas para validación de diseño de maquinados poligonales.
..... 114

Figura 6. 41. Espacio de trabajo para la estimación del Gap del sistema de inferencia difuso..... 115

Figura 6. 42. Espacio de trabajo para la estimación del voltaje del sistema de inferencia difuso..... 116

Figura 6. 43. Maquinados de 300 μm de profundidad en acero AISI1018 elaborados con el sistema MIMO difuso desarrollado..... 117

1 INTRODUCCIÓN

La manufactura es un proceso mediante el cual se lleva a cabo la construcción de productos para un uso específico. No obstante, es posible derivar tal procedimiento en dos tipos: manufactura convencional y no convencional. La primera se caracteriza por presentar contacto directo de los elementos involucrados en el proceso; en cambio, en la segunda no sucede así, debido a que la remoción del material se lleva a cabo por diferentes medios donde no existe contacto directo entre los elementos (Qin, 2015).

Un ejemplo de la manufactura no convencional es la técnica denominada ECM (*Electrochemical Machining*, por sus siglas en inglés), la cual se describe como un proceso de manufactura avanzada que permite la remoción de material mediante una disolución anódica, que es catalizada por medio de un voltaje de polarización de dos electrodos, denotados como herramienta y pieza de trabajo (Kats & Tibbles, 2005). En relación con la implicación anterior se destaca que originalmente la polaridad de operación del proceso consistía en la aplicación de corriente directa; no obstante, en investigaciones como (Gallegos Miranda, 2019) (Mortazavi & Ivanov, 2019) (Younas, et al., 2017) (Han, et al., 2018) se obtienen mejoras en los resultados al implementar una polarización pulsada, tomando como criterio de valoración la exactitud de maquinado. La afirmación anterior es observada mediante la mejora en el efecto de sobre corte, descrito como la relación que existe entre el diámetro de la herramienta de trabajo en comparación con el diámetro del maquinado final, destacando reducciones en hasta un 47 % (Gallegos Miranda, 2019).

En las generalizaciones anteriores, la mejora de la exactitud de maquinado fue gracias a la manipulación de las variables que proporciona la implementación de una fuente de polarización pulsada como lo son magnitud de la tensión, frecuencia y ciclo de trabajo. Sin embargo, resulta complejo de estimar la elección de los parámetros ideales para la operación del proceso.

A fin de identificar uno de los puntos que influyen negativamente en el proceso, en el estudio de Zaytzev (2004) se muestra que, durante la disolución de material, parte de los residuos del maquinado son atraídos y adheridos a la herramienta de trabajo, provocando un decremento en la exactitud de maquinado. Entorno a esta situación, presentan una manera de eliminar tales partículas, la cual consiste en aplicar una polarización inversa. A

pesar de conocer la solución, existe la dificultad de controlar la conmutación de ambas fuentes al igual que la magnitud específica debido a que no existe el tiempo ni el intervalo determinístico para aplicar tal intervención. Por otra parte, alteraciones en los parámetros iniciales como ciclo de trabajo, resistividad del electrolito o configuración de distancia inter-electrodos, influyen en los datos de salida como magnitud o velocidad de remoción de material de manera no determinística, es decir, se observa una tendencia de no linealidad en el proceso (Zaytzev, et al., 2004).

De la misma manera Zhmark (2004) afirma que existe una particularidad para controlar variables en relación con el voltaje ya que éste puede ser multicriterio; es decir, que influyen múltiples determinantes para elegir las condiciones óptimas de operación. Factores como el tiempo de suministro, corriente máxima, polaridad o magnitud pueden provocar incertidumbre al instante de determinar los parámetros ideales. Del mismo modo, pueden existir fluctuaciones en el voltaje provocadas en el proceso que pueden influir negativamente para mantener los parámetros óptimos de operación.

Por otra parte, los controladores basados en lógica difusa se adecuan a este tipo de problemas en los que se ven implícitos múltiples factores para determinar los parámetros de operación. Debido a ello permiten la toma de decisiones incluso al no conocer con certeza el conjunto global de información que un controlador convencional requeriría para funcionar correctamente (Zhmark, et al., 2004).

La afirmación anterior es posible gracias a que la lógica difusa es descrita como un sistema interpretativo en el cual los elementos evaluados son relacionados con conjuntos cuyas fronteras no se encuentran nítidamente definidas (Zadeh, 1965). Por ende, se les otorga un grado de pertenencia graduada y no estrictamente definido como lo haría un controlador convencional. De este modo, permite evaluar sentencias pertenecientes al lenguaje natural para interpretar el estado de las variables de control, asignándoles en cada momento un grado de pertenencia a los conjuntos difusos definidos. En este sentido, el diseño de un controlador que interprete de manera intuitiva el estado en el cual se encuentra se vuelve factible para deducir en forma de lógica una solución posible (Samir & Musalem, 2002).

Con base en el análisis de la literatura, se presentan alternativas viables para el diseño de algoritmos basados en técnicas de *soft-computing* que permiten emular la toma de decisiones en situaciones donde existe ambigüedad o incertidumbre en la información evaluada, brindando una gran ventaja para la creación de controladores mediante métodos computacionales.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Definición del problema

El maquinado electroquímico es un proceso de remoción de material en el que interfieren variables de control ligadas a la exactitud de maquinado; entre otras: la magnitud de tensión, corriente de maquinado, *gap* (distancia inter-electrodos), área de exposición, resistividad del electrolito, que interfieren en el acabado final y en la tasa de remoción de material. No obstante, el estudio de los efectos provocados por la manipulación de la polaridad de manera activa en tiempo de ejecución (lapso en el que se realiza la remoción de material sobre la pieza de trabajo) se ha rezagado, al no existir un método específico para hacerlo, y de ser así resulta complejo de tratar mediante el uso exclusivo de instrumentación, debido a la presencia de un comportamiento no lineal.

Debido a estas circunstancias, se presenta la oportunidad de implementar técnicas computacionales que permitan regular parte de las variables físicas involucradas en el proceso como lo es el voltaje de operación, siendo así un punto de partida para el análisis de los efectos citados en la literatura ligados con la exactitud y la remoción de material.

Por otra parte, es necesario implementar una serie de instrumentación para controlar y monitorear las variables físicas que retro alimentan el control del proceso.

2.2 Objetivos de investigación

General

Desarrollar un algoritmo de control difuso que permita regular los parámetros de tensión que son suministrados durante el proceso de remoción de material en una técnica de manufactura no convencional ECM, para la optimización de la exactitud de maquinado y la tasa de remoción de material.

Específicos

1. Diseñar una fuente de suministro de energía con parámetros ajustables mediante software de tensión y polaridad.

2. Diseñar un sistema de monitoreo para la adquisición de datos de las variables de operación.
3. Implementar la instrumentación para controlar las variables de tensión, polaridad y distancia inter-electrodos en el proceso de maquinado electroquímico.
4. Caracterizar el proceso mediante el análisis de las variables de velocidad de remoción y exactitud de maquinado electroquímico.
5. Desarrollar un algoritmo difuso para estimar en tiempo de ejecución los parámetros de tensión y *gap* inmersos en el proceso de disolución de material.

2.3 Preguntas de investigación

- ¿Qué tipo de topología permitirá realizar la manipulación de los parámetros de la fuente de polarización?
- ¿Qué tipo de instrumentación será necesaria para monitorear las variables de operación?
- ¿Cómo implementar las fuentes activas de polarización y el sistema de monitoreo sobre el proceso de maquinado electroquímico?
- ¿Qué efectos de sobre corte presentará la aplicación de una fuente dinámica sobre el proceso de maquinado electroquímico?
- ¿Qué número de variables lingüísticas y reglas difusas deberá de tener el algoritmo para llevar a cabo el control de magnitud y polaridad de tensión en el proceso de manufactura?
- ¿Qué resultados se obtendrán después de la implementación del controlador difuso sobre el método de disolución de material?

2.4 Justificación

La técnica de manufactura no convencional realiza el proceso de electrolisis mediante el tránsito de corriente de una herramienta a una pieza de trabajo. No obstante, debe de existir una separación entre ambos elementos para mantener constante la remoción de material. En este sentido, la variable de corriente es un parámetro esencial que permite estimar la distancia entre ambos electrodos (Abdel & El-Hofy, 2005).

Sin embargo, se ha observado que la corriente tiende a aumentar en función al incremento del área de exposición de la herramienta, ocasionado el aumento de intensidad eléctrica que transita sobre ellos provocando mayor remoción de material (Gallegos Miranda, 2019).

En relación con las implicaciones anteriores se presenta la oportunidad para la investigación sobre el control de la variable de tensión con el objetivo de regular la magnitud de corriente y así mantener constante la remoción de material. No obstante, al ser un proceso compuesto por un sistema mecánico para la movilización del electrodo y un conjunto de dispositivos eléctricos para catalizar la disolución de material, provoca un comportamiento no lineal (Yang & Li, 2017).

Tomando en cuenta la complejidad descrita anteriormente se plantea el uso de técnicas computacionales derivadas del *soft-computing*, específicamente lógica difusa, para realizar el control de la variable de tensión durante el proceso de manufactura. Esto es posible gracias a que la lógica difusa es robusta ante circunstancias que presentan no linealidad, permitiendo procesar información con cierto grado de ambigüedad o incertidumbre (Zadeh, 1965).

Con la presente investigación se pretende regular el voltaje de polarización en un proceso de manufactura no convencional mediante técnicas computacionales, y compensar las alteraciones de corriente provocadas por el incremento del área de exposición del electrodo sobre el material de trabajo.

2.5 Impactos

- **Científico:** El desarrollo de un algoritmo de control difuso que permita modificar el voltaje de operación durante la ejecución de un proceso de maquinado electroquímico por pulsos.
- **Tecnológico:** Integrar una herramienta computacional que permita controlar la polaridad y magnitud de tensión aplicada en los parámetros de operación en PECM para compensar el incremento en la remoción de material a causa del aumento de la corriente por una mayor exposición del electrodo.

3 HIPÓTESIS

Si mediante un algoritmo basado en lógica difusa se realiza la aproximación de la distancia inter-electrodos y la magnitud de tensión eléctrica con base en el análisis de la corriente de maquinado y el área de exposición del electrodo, se observará un decremento en el efecto de sobre corte en un porcentaje menor al 62 %, el cual es obtenido de un sistema difuso de una entrada y una salida identificado en la literatura, que considera como parámetro de entrada la corriente de maquinado y como salida la movilización del sistema mecánico.

4 ESTADO DEL ARTE

La manufactura es un término acuñado desde hace tiempo que se ha ido apropiando del sector industrial, el cual representa el diseño y construcción de productos para una aplicación en específico. Conforme al paso de los años, las exigencias en este sector para producir elementos con mayor calidad, menor costo y el mínimo de tiempo, han provocado que este término presente una constante evolución, enfocándose en el “¿Cómo es realizado?”. En base a ello, se ha incrementado la investigación sobre nuevas técnicas que permitan optimizar los procesos que se ven inmersos para la creación de los productos (Qin, 2015).

Es así como el estudio del proceso de manufactura sufre una tendencia hacia dos métodos: el convencional y no convencional. El primer término es descrito como aquel proceso donde la interacción entre una herramienta de trabajo y una pieza de trabajo, se efectúa de manera directa provocando fricción entre ambos, permitiendo la deformación del material en función a la energía mecánica producida (Younas, et al., 2017). Dentro de los procesos de manufactura convencional se encuentran el barrenado, fresado y torneado mecánico. Por otra parte, los procesos no convencionales o avanzados son aquellos en los cuales el contacto físico entre la pieza de trabajo y la herramienta de trabajo no existe (Catarino Aguilar, 2017). Algunos de los procesos no convencionales más populares son el maquinado por chorro de agua, por descarga eléctrica, por láser y maquinado electroquímico.

4.1 Maquinado electroquímico

El método de maquinado electroquímico es un proceso para la remoción de material mediante una disolución anódica, en donde se ven involucrados dos elementos: una herramienta o electrodo y una pieza de trabajo. Ambas partes tienen propiedades conductoras que permiten el flujo de corriente a través de ellas. Al estar dentro de la clasificación de manufactura no convencional, el contacto entre ambas durante el proceso no existe. Por tal razón para lograr llevar a cabo el desprendimiento de partículas metálicas de la pieza de trabajo, es necesario aplicar una etapa de polarización (Kats & Tibbles, 2005). En esta etapa la pieza de trabajo es polarizada positivamente y la herramienta de trabajo negativamente, formando así una relación Ánodo-Cátodo. En la Figura 4. 1 se

presenta el principio básico del método de maquinado electroquímico permitiendo observar la relación Ánodo-Cátodo citada anteriormente. Así mismo en la Figura 4. 1 (a) se simboliza el estado inicial del proceso de ECM y en la Figura 4. 1(b) el estado final al efectuar la remoción de material.

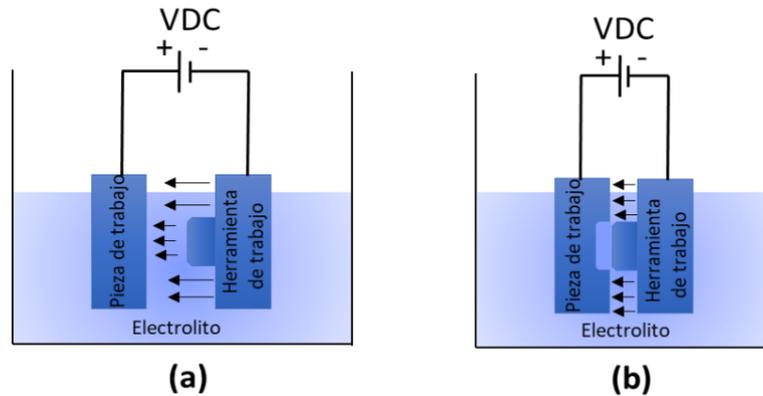


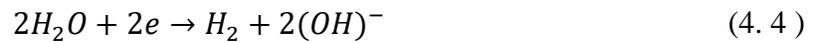
Figura 4. 1 Proceso de ECM (a) Antes de la remoción, (b) Después de la remoción

La composición molecular de las herramientas y el electrolito forman parte vital de los elementos necesarios del proceso de ECM. En este sentido, una solución compuesta por $H_2O + NaCl$ fue implementada. Además, el tipo de material para la herramienta de trabajo se basa en cobre, debido a la alta conductividad que proporciona, solo estableciéndose por de la plata con una conductividad de 59 MS/m (Blázquez, et al., 2014). Por otra parte, gran mayoría de los aceros y aleaciones son elaboradas en su mayoría por hierro. Tomando en cuenta los parámetros descritos, al iniciar la polarización de ambas herramientas se genera una reacción química producida por la diferencia de potencial que cataliza el intercambio de iones entre los elementos inmersos en la disolución, sin embargo, también se ve afectada la concentración acuosa reestructurando su composición molecular conforme al siguiente comportamiento (Abdel & El-Hofy, 2005).

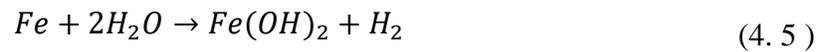


Como se observa en las ecuaciones (4. 1) y (4. 2), se lleva a cabo la separación de las partículas que la conforman, agrupándose según su carga eléctrica. De esta manera los

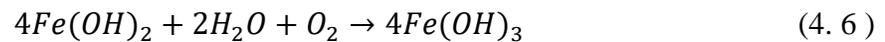
iones positivos se transfieren hacia la herramienta de trabajo mientras que los iones negativos a la pieza de trabajo. Al entrar en contacto con los elementos se observa que en el ánodo se pierden dos electrones, en cambio, en el cátodo se produce gas de hidrogeno e iones de hidroxilo como se presenta en las ecuaciones (4. 3) y (4. 4) respectivamente.



El resultado de esas reacciones químicas provoca que los iones del hierro se combinen unos a otros precipitándose como hidróxidos de hierro tal y como se visualiza en (4. 5).



No obstante, al estar en contacto constante con partículas de agua y oxigeno es posible formar hidróxido férrico, denotado en (4. 6).



De este modo envuelto por la electrolisis, la combinación del electrolito con el metal ha provocado la disolución del hierro y la generación de hidrogeno (H₂) en la herramienta de trabajo. En la Figura 4. 2 se observa el principio básico de las reacciones anteriormente descritas presentes en la disolución de material.

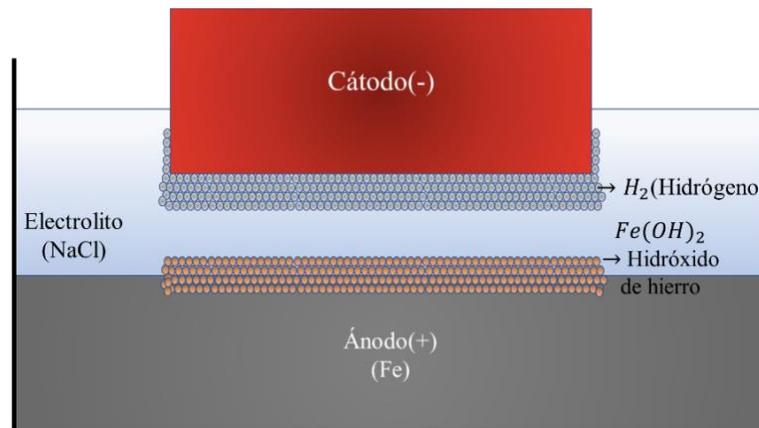


Figura 4. 2. Principio básico de reacciones implicadas en ECM (Abdel & El-Hofy, 2005).

En lo que al proceso se refiere, existe una métrica para medir cuantitativamente la productividad del proceso de ECM denominada *MRR* (*Material Removal Rate*, por sus siglas en inglés). Determinado en función a la ley de Faraday para una reacción electroquímica, el *MRR* de un proceso de ECM se puede denotar como: (McGeough, 1974) (Feng, et al., 2016):

$$MRR = \frac{V}{t} = C \frac{EA}{g\delta} \quad (4.7)$$

Donde:

V : Volumen removido [mm ³]	A : Área del electrodo [mm ²]
t : Tiempo [min]	g : Distancia inter-electrodos [mm]
E : Voltaje aplicado [V]	δ : Resistividad del electrolito [Ω]
C : Tasa de remoción específica de la pieza de trabajo utilizada [$\frac{\text{mm}^3}{\text{As}}$]	

En investigaciones realizadas en (Feng, et al., 2016), han elaborado una serie de pruebas que permiten determinar la tasa de *MRR* sobre algunos tipos de aceros como Domex 550MC y AISI 1018, obteniendo resultados como los que se presentan a continuación en la Tabla 4. 1.

Tabla 4. 1. Tasa de remoción de material registrada en los tipos de acero expuestos

Tipo de acero	Velocidad de remoción
Acero Domex 550MC	$3.63 * 10^{-2} \frac{\text{mm}^3}{\text{As}}$
Acero AISI 1018	$3.67 * 10^{-2} \frac{\text{mm}^3}{\text{As}}$

La velocidad de remoción puede ser fundamental durante el proceso de ECM, en trabajos como (Catarino Aguilar, 2017) la emplean para experimentar en base a la primera ley de Faraday la cual establece que, “La cantidad de cambio químico que produce una corriente

eléctrica es proporcional a la cantidad de electricidad transmitida” (Groover, 2010). De esta manera Catarino Aguilar emplea la siguiente ecuación para determinar el volumen de material removido como se observa a continuación:

$$V = Cit \quad (4. 8)$$

Donde:

V : Volumen de metal removido [mm^3]

t : Tiempo [min]

C : Constante de velocidad de remoción (AISI 1018) [$\frac{\text{mm}^3}{\text{As}}$]

I : Corriente [A]

Otro parámetro de relevancia a diferencia del MMR y el volumen de material removido es la distancia inter-electrodos, la cual es aproximada mediante la ecuación (4. 9) (Gallegos Miranda, 2019).

$$g = \frac{A}{I_{RMS} * (R * c)} \quad (4. 9)$$

Donde:

g = Distancia inter-electrodos [μm]

A = Área de exposición del electrodo [mm^2]

I_{RMS} = Corriente RMS de Maquinado [V]

R = Resistividad del electrolito [Ω]

c = (Densidad del metal² * Velocidad de remoción específica) =
 $(7.87)^2 * (3.0 * 10^{-2})$

De eso se desprende la estimación de la resistividad del electrolito la cual se obtiene mediante la ecuación (4. 10) donde se considera la magnitud de voltaje (V) de polarización (Groover, 2010).

$$R = \frac{V * A}{g * I_{RMS}} \quad (4.10)$$

Aunado a lo anterior, en el proceso de ECM existe un fenómeno denominado efecto de sobre corte, el cual consiste en un maquinado cuyo diámetro es parcialmente mayor al del electrodo empleado durante el proceso. En la Figura 4. 3 se observa el principio básico del fenómeno de sobre corte.

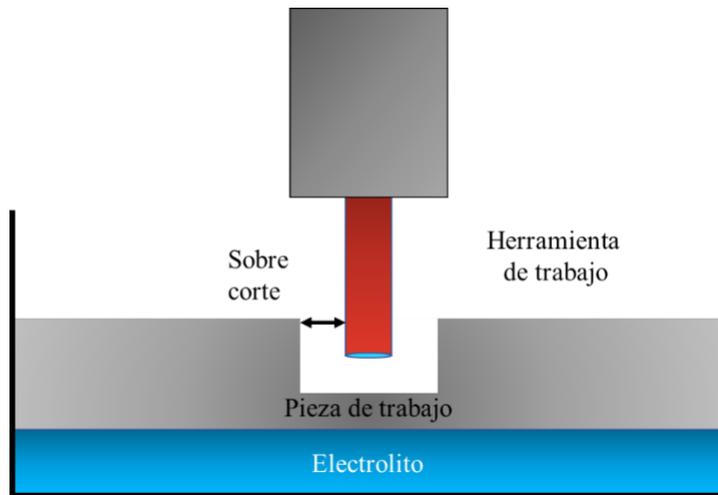


Figura 4. 3. Principio básico de efecto de sobre corte durante ECM.

Una de las características presentes en el proceso corresponde de manera precisa al fenómeno planteado anteriormente. Por otra parte, originalmente el maquinado electroquímico fue desarrollado mediante la aplicación de una polaridad de tipo DC (Corriente Directa, por sus siglas en inglés), la cual presenta la característica de mantener la tensión de alimentación de manera constante durante el proceso de remoción. Mediante la investigación sobre técnicas para mejorar la exactitud del maquinado, fue como se originó una derivación de ECM nombrada “*Pulsed Electrochemical Machining*” (PECM, por sus siglas en inglés). Esta técnica trabaja mediante el mismo principio, sin embargo, la fuente de polarización aplicada sobre las herramientas se modifica de ser constante a estar activa únicamente durante determinado lapso de tiempo, permitiendo la disolución de material durante el pulso activo, mientras que en el pulso inactivo parte de los

subproductos de la reacción son removidos mediante la ayuda del flujo del electrolito (Mortazavi & Ivanov, 2019).

Según las investigaciones desarrolladas en (Burkert, et al., 2009), una de las ventajas de emplear una fuente pulsada es la posibilidad de delimitar los parámetros como ciclo de trabajo (*Duty Cycle*), frecuencia de repetición y amplitud máxima de voltaje pico. No obstante, durante este proceso se ven involucrados dos elementos: a) una fuente de alimentación (PSU, por sus siglas en inglés) y b) una unidad de pulsos (PU, por sus siglas en inglés). Aquí, ambos elementos en conjunto con la distancia inter-electrodos son vitales durante el maquinado con PECM. Con objeto de ejemplificar los elementos planteados anteriormente, se muestra en la Figura 4. 4 el principio básico operacional del proceso de disolución mediante una fuente pulsada.

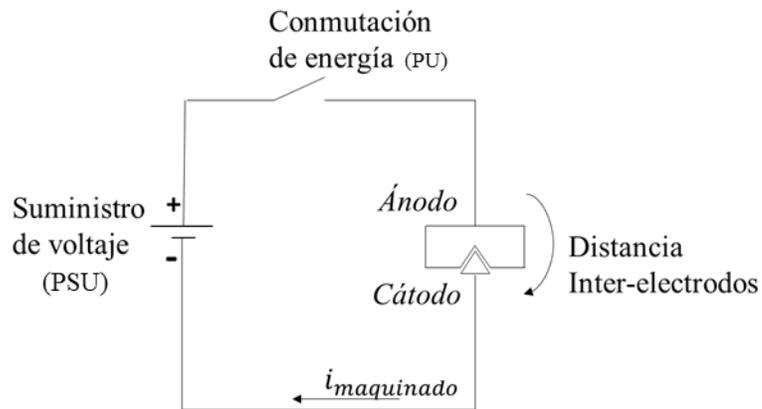


Figura 4. 4. Principio básico de operación en PECM.

A fin de mejorar la exactitud de maquinado mediante implementación de PECM en (Han, et al., 2018) desarrollan investigación sobre los fenómenos que suscitan durante el proceso, destacando el comportamiento del pulso. De este modo se describe la etapa de despolarización como la conmutación de un pulso activo a un pulso apagado (*pulse on time, pulse off time*), ya que al emplear una fuente de suministro pulsada es equivalente a aplicar y remover la fuente de energía. Es esencial que durante el tiempo apagado del pulso se asegure la completa supresión de tensión, ya que, de no ser así, el proceso de remoción de material continuara en el periodo de tiempo donde no debería existir. Con base en los resultados obtenidos en (Han, et al., 2018) empleando una PU ordinaria

conformada por un MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, por sus siglas en inglés) se observa el comportamiento visualizado en la Figura 4. 5.

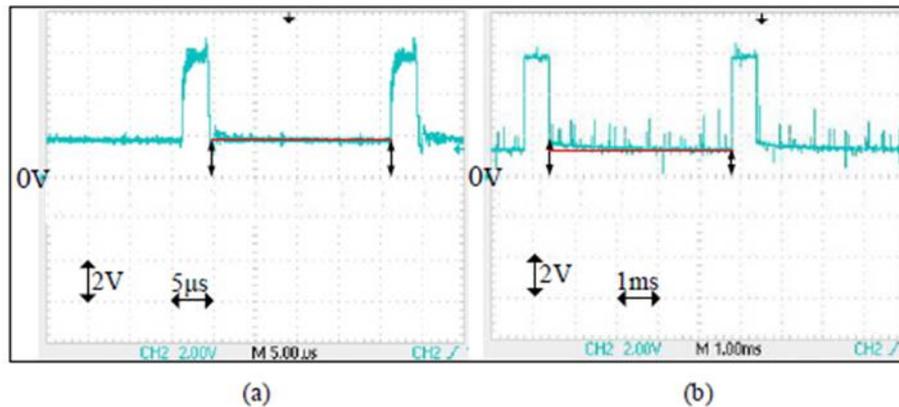


Figura 4. 5. Comportamiento de voltaje entre electrodo y pieza de trabajo durante PECM (a) 40 kHz; (b) 200 Hz (Han, et al., 2018).

A manera de solución para asegurar que la tensión del pulso en tiempo apagado sea nula se presentan dos alternativas: 1) cortocircuitar el ánodo y el cátodo posteriormente al término de la polarización de energía y 2) emplear una fuente DC inversa al concluir el suministro de voltaje. Ambos métodos permiten la despolarización en el tiempo apagado del pulso. En (Han, et al., 2018) emplean el primer criterio utilizando un arreglo de interruptores MOSFET's como se observa en la Figura 4. 6. En primer lugar, el arreglo de MOSFET's conformado por Q1 y Q4 conducen la energía DC que es transferida al electrodo y la pieza de trabajo. Siguiendo a esto se realiza el proceso de conmutación al tiempo de pulso apagado de Q2 y Q3, provocando un corto circuito que permite eliminar el voltaje rápidamente asegurando la despolarización a tiempo de ambos elementos.

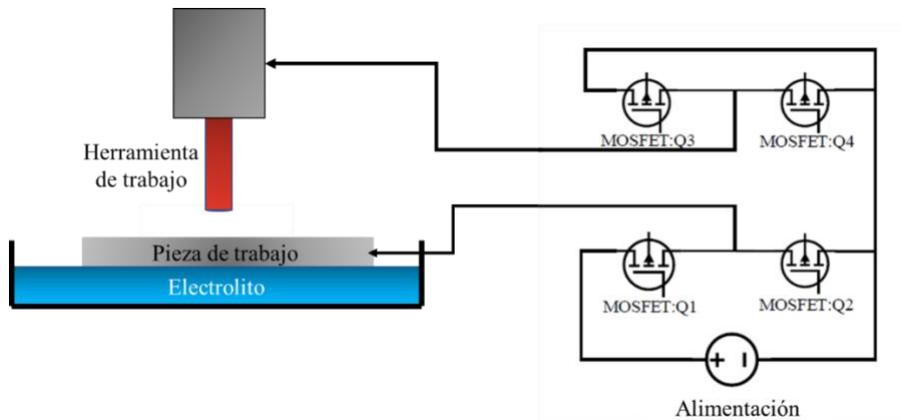


Figura 4. 6. Unidad de pulsos empleada para acelerar el fenómeno de despolarización en PECM.

Visto desde la perspectiva de Lohrengel (2005), ambos métodos son posibles soluciones para emplear como PU, no obstante, describe que algunas otras variantes emplean el control del potencial suministrado o la aplicación de pulsos catódicos cortos al final de un tiempo activo. Además, determina que la geometría de la pieza de trabajo, así como la velocidad de conducción del electrolito pueden influir en el comportamiento de la señal aplicada.

Con relación en las ideas expuestas anteriormente en Gallegos Miranda (2019) se define una característica en el comportamiento de la corriente generada por el proceso de manufactura, en la cual se observa que, al trabajar a bajas frecuencias (no mayores a los 10 kHz), la forma de onda del voltaje y corriente presentan un comportamiento similar. Sin embargo, a frecuencias mayores a los 10 kHz, la forma de onda tiende a comportarse como una señal tipo diente de sierra. En la Figura 4. 7 y Figura 4. 8 se observan las tendencias mencionadas respectivamente.

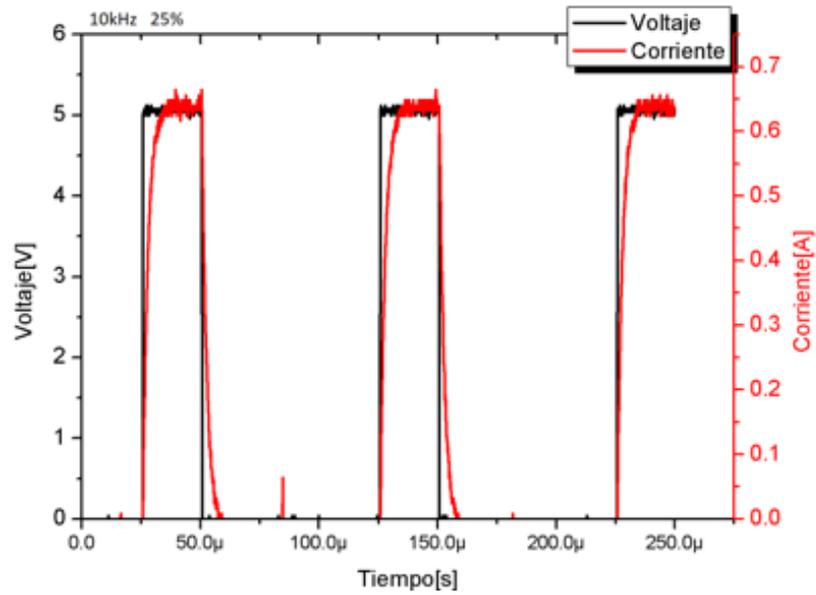


Figura 4. 7. Comparativa del comportamiento de la corriente versus el voltaje a 10 kHz en el proceso de manufactura (Gallegos Miranda, 2019).

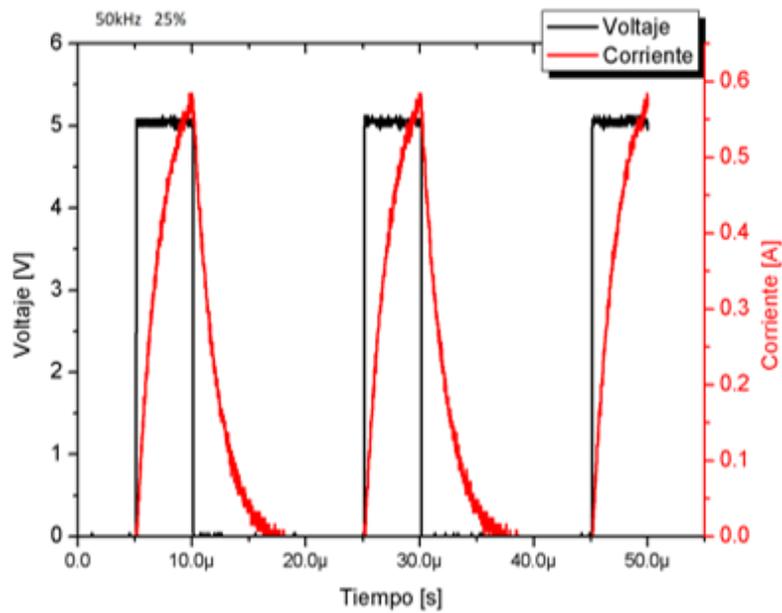


Figura 4. 8. Comparativa del comportamiento de la corriente versus el voltaje a 50 kHz en el proceso de maquinado electroquímico por pulsos (Gallegos Miranda, 2019).

Por tal razón, sigue existiendo a menor escala el proceso de remoción de material aun y cuando el tiempo del pulso se encuentra en un estado inactivo, provocado por el trabajo con frecuencias mayores a las observadas en las gráficas.

Según el estudio de Granda Gutierréz (2015) el desempeño de maquinado electroquímico empleando diferentes disoluciones puede influenciar la velocidad de remoción, siendo ligeramente superior cuando la concentración es más alta. La afirmación anterior se debe a que la conductividad se ve aumentada cuando la concentración del precursor se incrementa. Si bien es cierto el incremento de la concentración aumenta la tasa de conductividad. Por otro lado, en investigaciones realizadas en (Klocke, et al., 2018), se estudian los efectos relacionados con el parámetro conformado por la temperatura del electrolito, indicando que de igual manera puede ser una variable catalizadora para el aumento en la transferencia de corriente a una temperatura en los intervalos de 280-295 °k.

En relación con las implicaciones antes vistas, en (Zaytzev, et al., 2004) proponen la implementación de dos PU; la primera tendrá como objeto suministrar los pulsos de operación para activar la disolución del material, mientras que la segunda tendrá la función de remover los sedimentos adheridos al electrodo mediante un pulso con una pequeña corriente inversa. Las conclusiones derivadas de la experimentación permiten observar que las principales ventajas que ofrece la aplicación de una corriente inversa es mantener las características físicas y químicas de la herramienta de trabajo al permitir eliminar los sedimentos almacenados en ella y, por otra parte, crear una superficie con propiedades visuales similares a las que presenta el cromo sobre la pieza de trabajo maquinada.

No obstante, como es descrito por Li (2019), no existe una configuración estrictamente definida para la aplicación de los pulsos inversos que garantice la mayor calidad del producto final del maquinado. Sin embargo, es valorada la aplicación de estos con una relación de 200 pulsos positivos por cada pulso negativo con respecto a la frecuencia establecida para llevar a cabo el desgaste de material, observando que son los suficientemente necesarios para garantizar la eliminación de los residuos no metálicos detectados en la cara del electrodo a consecuencia de las reacciones presentes en el proceso.

Por otra parte, en (Meng, et al., 2019) es utilizada una relación de 12.5:1 de pulsos negativos para contribuir a la eliminación de las partículas descritas anteriormente, además son analizados parámetros como amplitud del pulso negativo, amplitud del pulso

positivo y los efectos en la corriente producidos por cada uno. En esta experimentación fueron empleados parámetros de 0 a -2 V para los pulsos negativos y un estándar de 8 V para los pulsos de desgaste, observando que en el caso donde son aplicados pulsos negativos es visualizado un incremento de corriente en el proceso a diferencia de la aplicación de pulsos unipolares. Esto es atribuido a que al permitir la eliminación de la capa no metálica sobre el electrodo permite mantener la conductividad entre ambas herramientas en un valor cercano a la inicial. Por lo contrario, en la aplicación de pulsos unipolares la conductividad decreta provocando que la tasa de remoción de material disminuya a consecuencia de descenso del corriente provocado por las partículas no metálicas situadas en los electrodos.

Aunado a lo anterior, T.R. Idrosov (2004) presenta el desarrollo de un modelo para describir la relación que existe entre la aplicación de pulsos bipolares con el comportamiento de la densidad de corriente, con el objetivo de estimar una serie de coeficientes que modelen el comportamiento de este parámetro en función a la duración de los pulsos aplicados, la pausa entre el tiempo activo e inactivo y el intervalo de tiempo de la corriente inversa generada por la conmutación de los polos en los electrodos. Las configuraciones investigadas para la estimación de los coeficientes son definidas por la siguiente serie de parámetros: pulsos con un periodo de 3 μ s, distancia entre electrodos en 5, 10, 20, 50 μ m, pausas entre cada pulso para la conmutación de los polos de 10, 20, 30, 35, 40 μ s y amplitudes de pulso de 4, 5 y 6 V. Según los resultados obtenidos, es demostrado que el modelo generado permite acercarse al comportamiento de la densidad de corriente visto en las pruebas reales, contribuyendo a modelar el desarrollo del proceso electroquímico con un enfoque en pulsos bipolares. Sin embargo, cabe destacar que tal modelo es dependiente de las características empleadas como dimensión de electrodo utilizado, concentración acuosa y características de los pulsos empleados.

Sobre la base de las ideas expuestas anteriormente en (Hongyou, et al., 2009) diseñan una serie de herramientas y moldes mediante la aplicación de pulsos bipolares, argumentando que algunas de las características vistas empleando este método son el incremento de la densidad de corriente, modificando la estructura sobre la superficie del producto final,

visualizando un incremento en la calidad de la superficie maquinada y la disminución de defectos y estrés interno sobre el producto generado.

Dentro de este marco, como parte del análisis de los factores que influyen en el proceso de manufactura no convencional, se relaciona a la rugosidad como una variable dependiente de la frecuencia, esto debido a las características de la superficie de maquinado final, la cual presenta una coloración muy similar a la observada en el elemento de cromo. Además, según las investigaciones reportadas por Chen et. al. (2018) la frecuencia no presenta relación con la variable de exactitud de maquinado. Por su parte, según los resultados obtenidos se atribuye la exactitud de desgaste a la magnitud de voltaje efectivo promedio, ya que decrementando esta variable se obtiene mayor exactitud, considerando una amplitud de pulso máxima de 15 V y una mínima de 6 V para este caso de estudio. Retomando el punto anterior, Xu, et al., (2017) corroboran que el voltaje de pulso bajo promedio es una determinante de la precisión resultante, en donde la remoción de material con mejores características es la realizada con una polarización de 2 V.

Las evidencias anteriormente descritas permiten indagar la posibilidad de implementar herramientas para manipular las variables físicas inmersas en el proceso, con el propósito de modificarlas sin necesidad de detenerlo para reconfigurar los parámetros de trabajo. Aunado a lo anterior, son vislumbradas aplicaciones de control en este contexto en (Boby, et al., 2018) donde a partir de un modelo difuso y un sistema Mamdani operan los parámetros de voltaje suministrados sobre un actuador para regular la temperatura de un sistema de manufactura convencional, catalizando la aceleración o disminución de la velocidad de corte con la salida del regulador difuso. Además, según Labib (2011), el desarrollo de un modelo matemático para describir esta clase de procesos resulta complejo debido a que existe no linealidad entre las variables, pero gracias a las ventajas del procedimiento difuso no ostenta ningún inconveniente para procesar la información, aunque exista imprecisión en los datos o en su caso ambigüedad.

4.2 Sistemas de control basados en lógica difusa

La Lógica Difusa es un sistema de procesamiento basado en modelos de procesos cognitivos humanos característicos por presentar incertidumbre, imprecisión o ambigüedad. Visto de esta manera es denotado como un mecanismo de inferencia capaz

de simular el razonamiento a partir de una base de conocimiento. (Altas, 2017) (Zadeh, 2008). Su estructura está compuesta por conjuntos difusos, los cuales se consideran como una clase de objetos con un determinado grado de afiliación. Visto de esta forma los conjuntos difusos permiten categorizar las subclases de incertidumbre existentes. Por lo tanto, cada subclase se constituye por funciones de membresía las cuales son consideradas como un puente entre datos inciertos y el mundo difuso para determinar un grado de pertenencia (Zadeh, 1965).

Derivado de lo anterior se dice que si una variable toma como valor una palabra originada del lenguaje natural se denominará “variable lingüística”, donde cada palabra hace referencia a los conjuntos difusos establecidos en el universo del discurso. De este modo se denota que la estructura de una variable lingüística se constituye a partir de una cuádrupla denotada por (\hat{x}, T, U, M) de las cuales \hat{x} , define el nombre de la variable lingüística, T : el conjunto de valores lingüísticos, U : el dominio de la variable lingüística \hat{x} tomando valores cuantitativos y M : la regla semántica que relaciona el valor lingüístico T en un conjunto difuso U . Dentro de este orden de ideas, Grande Meza (2003) desarrolla un modelo empleando Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*) (FL, por sus siglas en inglés) para identificar y controlar sistemas no lineales tomando como punto de partida los principios de sistemas difusos citados anteriormente.

De acuerdo con Emil & Tomescu (2014) la FL es aplicable en campos como mecánica, tecnología láser, comunicación, electrónica, química, biología, medicina, economía y todos aquellos sistemas que sean considerados generalmente como sistemas dinámicos. En virtud de ello, determinan que es posible aplicar esta técnica para realizar el control de sistemas caóticos los cuales tienen la particularidad de ser no lineales, no determinísticos y sensibles ante ligeros cambios en los parámetros iniciales, lo que en términos computacionales resulta complejo de controlar. En este caso particular emplean un sistema MIMO para modelar el control de este tipo de sistemas denominados caóticos, tomando en cuenta que gran mayoría de ellos trabajan en función de múltiples variables de evaluación y como salida contienen más de una variable de salida.

En las generalizaciones anteriores se observa el objetivo de emplear esta clase de algoritmos debido a su aplicabilidad en problemas no lineales. Tal es el caso de los

resultados reportados en (Fang, et al., 2018), donde a través de un algoritmo difuso y un control clásico PID (Proporcional Integral Derivativo), ejecutan el control de estados de posicionamiento de una pieza eléctrica para eliminar el fenómeno de histéresis observado durante el avance de la herramienta utilizada, tomando en cuenta la no linealidad del fenómeno, demostrando la eficacia de la implementación de un enfoque difuso para la solución de problemas no lineales y las características de un PID, dentro de las cuales destacan la velocidad de respuesta, precisión, ajuste y predicción automática para variables no definidas inicialmente en los parámetros inaugurales (Ogata, 2010).

En (Wah, 2008) realizan la comparación de un sistema de control convencional basado en retroalimentación en base al cálculo del error versus un controlador difuso, estableciendo los siguientes elementos:

1. Medición: Proceso en el cual se mide el valor de la variable de control.
2. Decisión: Calcular el error y utilizarlo para formar la acción de control.
3. Manipulación: A través de la acción de control manipular algunas de las variables implícitas en el proceso que permitan reducir el error.

Sobre la base de las ideas expuestas, en la Figura 4. 9 se ejemplifica el proceso empleado durante un controlador basado en retroalimentación en función al error y en la Figura 4. 10 las etapas de un controlador difuso.

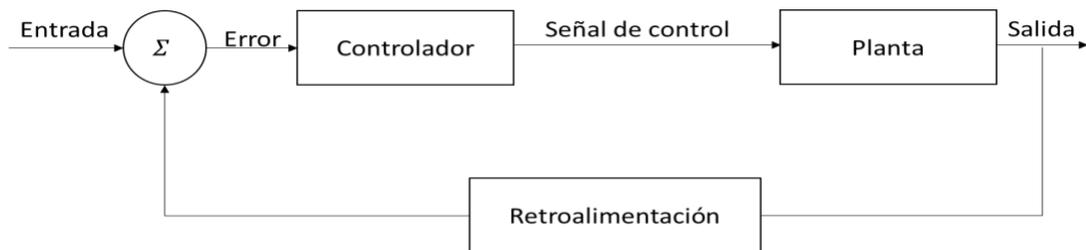


Figura 4. 9. Sistema de control basado en el error (Wah, 2008).

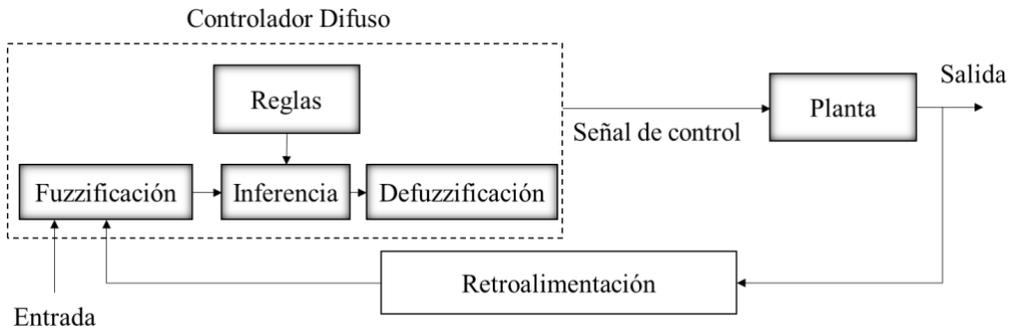


Figura 4. 10. Sistema de control difuso (Wah, 2008).

Como se observa en la Figura 4. 10 el controlador difuso está constituido por una serie de elementos denotados como:

Fuzzificación: Es la transformación de datos nítidos a su correspondiente conjunto difuso, sin embargo, es necesario normalizarse para conocer el rango del universo del discurso adecuado.

Reglas: Hacen referencia a un conjunto de reglas de control difusas basadas en conocimiento que se expresan mediante condicionales IF (Antecedente) y THEN (Consecuente).

Defuzzificación: Describe la acción de control difusa en una acción de control no difusa que representa la mejor inferencia de salida. En ocasiones es necesario desnormalizar la salida mediante métodos como: centroide, centro de gravedad, defuzzificación de altura, centro de área más grande o media de los máximos.

Motor de inferencia: Interpreta las reglas difusas en una base de reglas para formar conjuntos difusos.

En este punto, vale la pena resaltar que el resultado final del motor de inferencia esta dado por la conclusión de cada una de las reglas difusas establecidas inicialmente. Sin embargo, para hacerlo es empleado el método desarrollado por Lofti Zadeh mediante máximos y mínimos como se describe en (Trillas & Eciolaza, 2015) (Trillas & Gutierres, 1992) donde la conclusión de se estima mediante la siguiente serie de ecuaciones.

$$x_t = E' \quad (4.11)$$

$$R1 = [\mu_f(E_i) \wedge \mu_f(B_i)] \quad (4.12)$$

$$B'_n = \vee_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_E(x) \wedge \mu_B(y)) \quad (4.13)$$

Donde E' es el conjunto de membresía correspondiente al hecho de las premisas generadas por la variable de entrada x_t , $R1$ la relación resultante de los conjuntos de evaluación representados por las variables E_i , B_i y B'_n el consecuente de la inferencia.

Con base en este contexto, es preciso tener presente que el control puede tornarse en una tarea con mayor grado de complejidad al convertirse en un problema multicriterio, es decir, donde influyen diversos aspectos para determinar el valor óptimo de operación o salida. No obstante, la implementación de controladores difusos es una alternativa viable debido a que son diseñados para operar en situaciones donde existe incertidumbre. Esto es posible gracias a que las reglas empleadas pueden adaptarse dependiendo de las condiciones de trabajo. Además, debe señalarse que una de las ventajas de estos algoritmos en comparación con la implementación de instrumentación electrónica en control, recae en la complejidad de elaboración, en otras palabras, resulta más sencillo adaptar un controlador difuso ante circunstancias de imprecisión que abarcar con dispositivos electrónicos todos los posibles escenarios en los cuales el sistema pudiese incurrir. Derivado de ello se generan procesos de control más extensos en sentido del número de variables que evalúan, al igual que la cantidad de parámetros generados como resultado, convirtiéndose así en problemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO, por sus siglas en inglés).

4.3 Sistemas de control MIMO mediante Lógica Difusa

Un sistema de control multivariable también conocido como MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*, por sus siglas en inglés) es aquel en el cual interfieren más de una variable de entrada y de salida. Debido a esto y a la presencia de factores tales como no linealidad, propician sustancialmente el incremento de la complejidad para la construcción de un modelo matemático que permita controlar el proceso, por lo cual, resulta atractivo el diseño de sistemas MIMO mediante un enfoque por lógica difusa, la cual no se ve

afectada por la presencia de no linealidad o ambigüedad en la información. (Emil & Tomescu, 2014).

Los sistemas MIMO difusos al igual que los sistemas convencionales SISO convierten los datos reales de entrada en variables lingüísticas con un determinado grado de pertenencia según la descripción del universo del discurso establecido para cada función de membresía. No obstante, el diseño del motor de inferencia conformado por las reglas difusas cambia, definiendo la inferencia mediante la siguiente sintaxis (Butkiewicz, 2001):

***if [Premisa1]is [VariableLingüística1] AND [Premisa2]is [VariableLingüística2]
then [Concecuente1]is [VariableLingüística3] AND [Concecuente2]is [VariableLingüística4]***

Como es observado anteriormente, la conclusión de una regla difusa de un sistema MIMO considera más de un antecedente, por lo cual son empleados operadores para realizar operaciones entre conjuntos y obtener una conclusión. Los operadores más utilizados son AND, el cual obtiene un conjunto resultante de la INTERSECCIÓN entre dos conjuntos y el operador OR, el cual al igual que en el caso anterior devuelve un conjunto resultante de la operación de UNIÓN entre otros dos. A este tipo de operaciones aplicadas entre conjuntos para la obtención de la conclusión se les denomina T-Norm y S-Norm, respectivamente (Kubica, et al., 2005) (Soriano, et al., 2005) .

Visto de esta forma, es utilizado en el campo de la manufactura como método confiable de control de procesos multivariables, además son consideradas las características implícitas en un proceso de este tipo, identificando problemas como los que se ejemplifican a continuación (Liu, 2008):

1. Una mala estructuración de un proceso de manufactura.
2. Cambios frecuentes en las condiciones de operación.
3. Ocurrencia aleatoria de fallas operacionales.
4. Procesamiento de información incierta, confusa o incompleta.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriormente expuestas, se describe en (Jimenez, et al., 2004) un sistema de control de un proceso de manufactura el cual toma como consideración el error y la magnitud del cambio del error, debido a que el objetivo

planteado recae en mantener un error lo más cercano a cero, tomando en cuenta los cambios con respecto al tiempo. No obstante, el criterio de diseño de un controlador MIMO es independiente al caso de estudio, siendo capaz de modificarse según las necesidades del problema.

Visto desde la perspectiva del proceso de maquinado electroquímico, se encuentran investigaciones como (Keasberry, et al., 2004), donde es considerado un enfoque difuso para controlar el proceso multivariable de ECM mediante la valoración de la corriente y el flujo de electrolito, permitiendo controlar el *gap* mediante el movimiento del electrodo y la magnitud del flujo de electrolito que es suministrado. En virtud de ello, resulta viable el tratamiento para la estimación de otras variables de control como lo es la distancia entre electrodos, considerando la extremada no linealidad que conlleva aproximar este parámetro.

A consecuencia de esta clase de problemas con relación a la no linealidad son aplicados cada vez más los enfoques difusos en este tipo de procesos, como sucede en (Yonghua & Kai, 2010), donde diseñan un controlador MISO para regular la distancia entre electrodos, que al igual que en casos anteriores la corriente tiene gran relevancia para la aproximación de este parámetro. Sin embargo, estudio de este paradigma es un extenso campo de estudio en razón a la existencia de múltiples factores que influyen en el diseño de herramientas mediante maquinado no convencional.

Estas evidencias son observadas en (Rama, et al., 2009) mediante la construcción de un modelo para el proceso de control de ECM tomando en consideración 4 variables de entrada: corriente, voltaje, flujo de electrolito y *gap*, son los parámetros ponderados mediante análisis difuso en la entrada y tasa de remoción de material así como superficie de maquinado para la salida, buscando definir una serie de configuraciones que permitan describir el mejor resultado posible, demostrando una vez más la alta viabilidad de este método de control para procesos de manufactura de forma inteligente.

4.4 Análisis y discusión del estado del arte

Con base en el análisis de la literatura es demostrado que existen diferentes tipos de manufactura con características y especificaciones disímiles, observando la tendencia de

investigación hacia el enfoque no convencional. Sin embargo, la derivación de éste en subtipos permite la elección del método con mayor viabilidad en virtud de las necesidades o requerimientos según sea el caso.

Para enfoque del presente proyecto se analizaron los rubros correspondientes al proceso de maquinado electroquímico, en el cual se observa que presenta variaciones en su implementación, es decir, puede efectuarse utilizando diferentes configuraciones de energía como DC o pulsada. De acuerdo con la literatura se observa que ECM en su configuración pulsada presenta mayor exactitud de maquinado en comparativa con su respectiva alternativa en polarización en DC.

Por otra parte, durante el proceso existen reacciones químicas como resultado de la disolución de material que influyen de manera negativa sobre la herramienta de trabajo, impidiendo que la velocidad de remoción a lo largo del proceso sea constante. Tal como lo ilustra Zaytzev, et al., (2004), una alternativa de solución implica la aplicación de una fuente bipolar que permita conmutar el sentido de la corriente, afectando la atracción de los residuos a la herramienta de trabajo para su correspondiente eliminación. No obstante, es de rigor cuidado controlar este proceso debido a que de ser aplicada la misma magnitud de energía que la que es utilizada para el para el barrenado de la pieza de trabajo, el desprendimiento de partículas metálicas se efectuará sobre la herramienta que hace el cátodo, provocando deformaciones o disminución en la precisión del desbaste final.

Tal como se observa en la literatura múltiples factores como: magnitud de tensión, *gap*, resistividad de la solución acuosa o características del pulso de operación, afectan los resultados de exactitud, presentando comportamientos de no linealidad. Por tal motivo resulta complejo emplear exclusivamente instrumentación electrónica para controlar la aplicación de una fuente bipolar para solución del problema planteado con anterioridad.

En respuesta a las implicaciones anteriores se presenta una técnica derivada de la Inteligencia Artificial denotada como lógica difusa que es empleada para realizar control tomando como criterio de decisión una base de conocimiento, lo cual le permite interpretar datos en función de variables lingüísticas establecidas en un universo del discurso. De este modo es capaz de diferir situaciones en las que los datos de entrada contengan cierto grado de ambigüedad, comúnmente presente en sistemas no lineales.

Por tal motivo, tomando en cuenta esta serie de consideraciones descritas en la literatura referentes al proceso de manufactura PECM y los beneficios que proveen los sistemas difusos para el tratamiento de no linealidad, se plantea el desarrollo de un sistema bajo el esquema de lógica difusa para la estimación de los parámetros de control del proceso de manufactura avanzada referentes al *gap* y voltaje de polarización, tomando en cuenta como variables de interés el comportamiento de la corriente de maquinado así como la superficie total del electrodo expuesta. Por tanto, al considerarse más de una variable de entrada y de salida se convierte en un esquema de control MIMO, el cual permitirá realizar el contraste con metodologías basadas en sistemas SISO presentadas en la literatura y verificar los resultados obtenidos.

Tabla 4 1. Matriz de referencia para determinar el estado del arte del proyecto de investigación

Fuente	Resumen	Método empleado	Áreas de oportunidad
(Abdel & El-Hofy, 2005)	Literatura que habla de manera detallada acerca de los procesos de manufactura y los elementos que se ven implícitos en él.	Los procesos de manufactura avanzada tienen la característica de presentar múltiples características, así como variables. En este documento analizan cuáles son y en donde interfieren durante el proceso.	Teniendo el suficiente conocimiento de las variables vistas durante el proceso de manufactura es posible aprovechar la gran variedad de técnicas computacionales para optimizar parte de los procesos.
(Groover, 2010)	En el proceso de maquinado no convencional interfieren múltiples variables derivadas del tipo de suministro de energía o el método por el cual se realiza. En este sentido se detalla una exhaustiva investigación sobre las técnicas de maquinado convencional y no convencional para demostrar la aplicabilidad y el desarrollo de nueva tecnología en el campo de la manufactura.	Proporcionan los fundamentos de los procesos que se ven implícitos durante el proceso de manufactura. De igual manera presentan algunas de los teoremas necesarios para lograr comprender cómo trabaja el proceso de manufactura tanto convencional y no convencional. De igual forma ejemplifican cuáles son sus aplicaciones y áreas de operación en el campo laboral.	Resulta primordial conocer las ventajas y desventajas de cada criterio para la elaboración de componentes por medio de este tipo de manufactura. Tomando en cuenta lo antes mencionado se cita una de las desventajas más sobresalientes la cual es relacionada con la evolución y desarrollo de nuevos procesos, ya que con el avance del tiempo se generan nuevos conocimientos como consecuencia del avance tecnológico provocando que algunos métodos convencionales se conviertan en obsoletos.
(Younas, et al., 2017)	En la investigación elaborada en el presente documento realizan el análisis de procesos de manufactura convencional para ser contrastados con el nuevo modelo de manufactura no convencional en sus diferentes variantes como una alternativa viable para la elaboración de productos.	Ejemplifica la construcción de diferentes elementos y productos mediante los modelos de manufactura no convencional. De igual manera para fines ilustrativos describen de forma general los requerimientos y elementos dependientes que se requieren durante cada proceso, así como el campo en el cual son utilizados tanto como en el sector público y privado.	Con la aparición de la manufactura no convencional, se puede observar que gran parte de los procesos de manufactura tienden a realizarse mediante este método, sin embargo, debido a que existen variantes de él es posible efectuar un mismo proceso mediante diferente técnica para averiguar cual permite obtener mejores resultados en el menor tiempo posible y con el menor costo.
(Qin, 2015)	Describen algunas de las variantes del mecanizado como son el principio del mecanizado por descarga micro eléctrica, de hundimiento de micro matrices y mecanizado de descarga eléctrica por micro hilos.	En base a las técnicas de mecanizado presentadas, se generan los resultados obtenidos en cada proceso permitiendo observar el efecto que produce sobre ellos. De igual manera aplican una disolución que permite comportarse como un medio conductor para producir una corriente en base a la polarización de los elementos.	A pesar de que el fluido dieléctrico fluye a través de la pieza de trabajo y el electrodo con fines de eliminación de material, se genera un pequeño desgaste sobre ambos elementos. De igual manera, en algunos de estos métodos se observa un efecto de sobre corte en la pieza de trabajo provocando imprecisión no deseada.

(Granda Gutierrez, et al., 2015)	Describen el análisis de los resultados obtenidos en un proceso de maquinado electroquímico no convencional polarizado con voltaje directo empleando diferentes tipos de composiciones de disolución.	El proceso es controlado mediante un software desarrollado en LabVIEW el cual permite comprobar el comportamiento ocasionado por diferentes tipos de composiciones electrolíticas, además realizan una serie de experimentos para determinar la relación entre material removido y la disolución.	Dentro de los tipos de maquinado no convencional existe el que es polarizado con energía pulsada, en el cual se observan mejoras en el proceso de remoción. De esta manera es factible realizar la comparación del efecto de este tipo de maquinado de voltaje directo con el pulsado, realizando la variación de las diferentes composiciones del electrolito.
(Burkert, et al., 2009)	El análisis sobre los parámetros en la unidad de señal pulsada para el micro mecanizado demuestra que existen perdidas de energía que influyen negativamente durante el proceso. Por tal hecho se realiza la comparación entre una unidad de pulsos convencional empleada en ECM y PECM versus un modelo de doble capa empleado en PECMM para identificar las causas que detonan los fenómenos planteados y cuáles son las posibles alternativas de solución.	La propuesta de la unidad de pulsos para efectuar el micro maquinado está conformada por dos fuentes de suministro. Es planteada de esta manera para permitir el óptimo proceso de carga y recarga de la capacitancia de doble capa. Los resultados obtenidos al emplear unidades de pulsos convencionales y unidades de doble capa son medidos y simulados a través de diferentes medios para sustentar la validez de su análisis y resultados.	Una de las principales ventajas de utilizar una fuente bipolar recae en la velocidad de carga y recarga de la doble capa existente en la unidad de pulsos para PECMM. Por otra parte, es esencial enfatizar la investigación sobre algún método que permita contrarrestar las pérdidas de energía por parte de los componentes electrónicos, permitiendo obtener resultados reales más cercanos a los resultados ideales calculados mediante el análisis matemático.
(Han, et al., 2018)	Efectúan una investigación sobre el comportamiento que presenta la polarización de tensión durante el proceso de maquinado a través de una fuente pulsada la cual, indica que en el proceso de despolarización no se cuenta con el tiempo suficiente para que el circuito elimine por completo la tensión existente sobre el electrodo, lo que provoca la disminución de exactitud en el corte realizado por el electrodo.	Para asegurar que el efecto de despolarización se cumpla de manera real proponen la implementación de una nueva fuente generadora de pulsos la cual, se basa en un arreglo de MOSFET's denominado "Puente completo". De esta manera tomando en cuenta su funcionamiento, permite conmutar del voltaje pico máximo a un estado de tensión ligeramente negativa permitiendo despolarizar la herramienta y así, disminuir notoriamente el corte lateral y frontal durante el periodo nulo en la señal pulsada.	La principal ventaja del sistema de polarización propuesto se enfoca en la optimización de la exactitud de corte final realizado por la pieza de trabajo. Sin embargo, existe un área de oportunidad al desarrollar modificaciones en cuanto variables como ciclo de trabajo de la señal pulsada, amplitud de tensión e incluso, indagar sobre los resultados al modificar la relación existente de las variables anteriores con su frecuencia. Por tal razón, queda en pie la investigación sobre el comportamiento que presente durante los parámetros propuestos.
(Hongyou, et al., 2009)	En el presente documento detallan el proceso de acabado superficial mediante un pulso electroquímico. Algunas de las variables computadas son la densidad del	Derivado de este proceso se generan 3 subdivisiones las cuales son: pulido electroquímico, acabado por pulso electroquímico y acabado por pulso	Gracias a que el electrodo no entra en contacto con la pieza de trabajo en el proceso de mecanizado, el desgaste de la herramienta es mínimo. Sin embargo, la frecuencia y la distancia inter-

	pulso aplicado, tiempo y ciclo de trabajo. De igual forma aplican una serie de pruebas que permiten conocer los resultados en cada una de ellas.	electroquímico compuesto. Con fines de análisis llevan a cabo la métrica de los resultados obtenidos al aplicar una variación sobre parámetros importantes como frecuencia y distancia inter-electrodos en los procesos mencionados con anterioridad.	electrodos se calcula de manera manual, permitiendo la inmersión en nuevas técnicas para controlar los parámetros de manera autónoma vía software o por medio de técnicas de inteligencia artificial.
(Mortazavi & Ivanov, 2019)	Reportan el análisis de los parámetros que permiten determinar la caracterización del maquinado electroquímico y el micro maquinado electroquímico. Presentan de manera explícita los avances que se han llevado a cabo tras la experimentación con diferentes fuentes se suministró de voltaje, concentraciones electrolíticas, capacitancia, distancia inter-electrodos, brindando así una visión más extensa sobre las necesidades que aún faltan por atender.	Plantean la ley de Faraday como uno de los parámetros esenciales para el cálculo de variables como resistividad. Uno de los aspectos relevantes en este proceso es el tipo de fuente utilizada, ya que ésta es la encargada de suministrar la energía para catalizar el proceso de remoción de material. Agregado a lo anterior se demuestra que una fuente de pulsos eléctricos proporciona mejores resultados que una fuente de corriente directa. No obstante, manipular pulsos conlleva definir parámetros como frecuencia, ciclo de trabajo, amplitud de pulso entre otros, lo que incrementa la complejidad de control.	Uno de los inconvenientes que existe en el proceso de generación de una señal pulsada recae en el instante cuando se lleva a cabo la despolarización. Es necesario asegurar que la caída de tensión llegue de manera exacta a un punto donde no exista la presencia de energía y así asegurar las condiciones óptimas en cuanto a la polarización se refiere. De igual forma es fundamental comprobar el comportamiento del sistema que suministra la energía pulsada mediante las diferentes herramientas tecnológicas como osciloscopios para verificar su correcto funcionamiento.
(Lohrengel, 2005)	Tomando como base el método de maquinado no convencional, realizan el desarrollo de un proyecto con fuente de polarización pulsada sobre una composición electrolítica $NaNO_3$.	Realizan pruebas bajo diferentes escenarios como temperatura, composición del electrolito, ciclo de trabajo de la fuente pulsada y materiales que permiten analizar los resultados para cada circunstancia.	Una desventaja resultante de la alteración de temperatura del electrolito es la creación de compuestos ácidos férricos que pueden considerarse como agentes contaminantes para el medio ambiente.
(Zaytzev, et al., 2004)	En base al análisis de las variables de polarización en el proceso de maquinado electroquímico pulsado, se plantea el diseño de un método para aplicar una corriente bipolar la cual, se aplica en el periodo en donde la señal pulsada se establece en un estado nulo, de tal manera que al efectuar dicho estímulo se permita asegurar la estabilidad geométrica del electrodo, así como sus propiedades físicas y químicas debido a que se lleva a	Durante el proceso de polarización bipolar ocurre un fenómeno de desfase entre la señal pulsada y la corriente bipolar aplicada que puede ocasionar un corto circuito. Es fundamental mantener coordinados ambos parámetros para eliminar el riesgo de entrar en dicho estado. Cabe destacar que en el proceso descrito aplican un fenómeno en el cual, el electrodo entra a un estado de vibración que permite el aumento de corriente de funcionamiento, así como la presión	Una peculiaridad observada al término del proceso de maquinado mediante la aplicación de corriente bipolar hace referencia a la rugosidad. Según los resultados reportados utilizando esta técnica se visualiza un maquinado final una coloración muy semejante al elemento de cromo. En este sentido, la adición de una nueva variable al proceso de PECM extiende el área de investigación para mejorar las condiciones por medio de las cuales se obtienen maquinados con menor efecto de sobre corte y una remoción de material constante.

	cabo un proceso de remoción de sedimentos.	del electrolito provocando un incremento de conductancia electrolítica.	
(Klocke, et al., 2018)	Se efectúa la incursión sobre un nuevo modelo de mecanizado no convencional en el cual, la temperatura del electrolito es un factor determinante que se ve involucrado. A través de la construcción de una simulación aplicando estas modificaciones, se observa que una de las principales influencias que ocasiona el cambio de temperatura es el incremento de la conductividad, lo que permite obtener cambios significativos en los resultados finales.	Delimitan una serie de parámetros que permiten modelar las óptimas condiciones de trabajo del proceso de estudio y obtener maquinados uniformes. Los principales valores establecidos son parámetros eléctricos, mecánicos, concentración de electrolito y operadores de simulación para la regulación de temperatura. No obstante, agregan un par más de variables las cuales son el tipo de estructura geométrica y la oscilación del electrodo, vislumbrando los resultados tras agregar mayor grado de complejidad por las variables mencionadas.	Existe un amplio campo de investigación sobre este nuevo modelo de mecanizado debido a que simplemente fue realizado un análisis teórico en base a resultados obtenidos de ECM y PECM, sin embargo, tras el análisis de la propuesta de incluir variables de temperatura y oscilación del electrodo da paso a la formulación de nuevas hipótesis sobre la influencia de estas variables en los resultados finales con el mecanizado no convencional.
(Chen, et al., 2018)	Durante el proceso ECM, existe un fenómeno denominado sobre corte parásito el cual, provoca el desprendimiento de material en las secciones laterales de la pieza de trabajo utilizada. Sin embargo, con el profundo estudio de este campo se descubrió que una manera efectiva de contrarrestar este problema era aplicando una fuente de energía pulsada. En base a ello se discute en el presente trabajo la influencia que tiene la forma de onda y las características que debe contener para mejorar la exactitud en dicho proceso.	En los resultados obtenidos se demostró que el sobre corte parásito aumenta en función de el voltaje aplicado y la duración del pulso. Se llevó a cabo experimentación en la cual, se descubrió que aumentar la potencia de la frecuencia pulsada no aumenta la precisión. Al continuar con la experimentación, presentan resultados que abalan que para incrementar la precisión del mecanizado es necesario reducir el valor del voltaje promedio efectivo, pero aplicado a niveles de frecuencia en el rango de los kHz.	En base al estudio realizado se presenta la posibilidad de llevar a cabo el desarrollo de investigación a fondo acerca de nuevos parámetros para el suministro de energía pulsada en conjunto con nuevas composiciones electrolíticas y diversos materiales de trabajo. Tal y como lo mencionan, el uso de aislamientos en la sección lateral del electrodo resultaba poco factible en el proceso de ECM más sin en cambio, con el nuevo método de polarización queda en duda los posibles efectos que sea capaz de provocar al aplicarse tomando en cuenta la nueva forma de onda y frecuencia utilizadas.
(Xu, et al., 2017)	Realizan la investigación de una nueva propiedad en el proceso de micro maquinado electroquímico pulsado, la cual consiste en añadir una resistencia con valor ajustable. Al establecer la relación resistencia-voltaje ideal, permite mejorar	Emplean un electrodo con un diámetro de 10 micrómetros de longitud que permite realizar maquinados muy precisos. El tipo de electrolito empleado corresponde a una composición elaborada por ácido sulfúrico. El tipo de material	Al añadir un nuevo parámetro de control en el proceso de micro maquinado se presenta la oportunidad de desarrollar técnicas de control que permitan llevar a cabo la variación de manera autónoma de dicha variable. Así mismo, establecer la relación resistencia-voltaje optima a través del

	la resolución de proceso durante la elaboración de microformas.	empleado para realizar microestructuras se compone por piezas elaboradas con níquel.	análisis mediante problemas de optimización con métodos heurísticos.
(Feng, et al., 2016)	Realizan una investigación experimental en la cual implementan un parámetro extra al proceso de maquinado que consta de implementar vibración durante la remoción de material.	Se emplearon diferentes tipos de metales para comparar la tasa de remoción obtenida con el objetivo de determinar el efecto que tiene la investigación experimental de la aplicación de la nueva variable.	Durante el proceso de maquinado no convencional existen múltiples factores que se ven relacionados para la disolución de material y por tal hecho existe un amplio campo de investigación para buscar la manera de optimizar tal proceso mediante diferentes técnicas.
(Catarino Aguilar, 2017)	Mediante el lenguaje de programación Python se desarrolló un sistema para monitorear un proceso de maquinado no convencional en polarización directa, el cual, tiene como variables de interés el tiempo, corriente de maquinado y la tasa de remoción de material. Finalmente, mediante estos parámetros se realiza el control del proceso para mantener un <i>gap</i> contante y mantener la remoción de material inicial.	Realizan la manipulación de un sistema mecánico de tres ejes que controla el proceso de maquinado vía software. Parte de las variables que son monitoreadas son la distancia inter-electrodos, voltaje de polarización y corriente de maquinado.	Una de las ventajas de este sistema es que permite conocer la distancia inter-electrodos a través de la corriente que fluye por la herramienta y la pieza de trabajo, lo que evita el uso de sensores para llevar a cabo esa tarea. Por otra parte, existe un exceso de remoción en relación con el diámetro de la pieza de trabajo al aumentar la magnitud de tensión eléctrica suministrada al ánodo y al cátodo utilizados en el proceso.
(Altas, 2017)	Definen el termino de lógica difusa, además de denotar las características que lo conforman para la construcción del universo, las funciones de membrecía y los conjuntos difusos.	Mediante el análisis de la lingüística empleada en la vida diaria delimitan la construcción de la lógica difusa para simular el razonamiento humano para la toma de decisiones.	A través de la construcción de los conjuntos difusos y las funciones de membrecía es posible emular el razonamiento humano para establecer el control de instrumentación de manera autónoma.
(Zadeh, 1965)	Describen la metodología necesaria para establecer los conjuntos difusos, así como las funciones de membrecía que la conforman.	Partiendo de las notaciones de inclusión, unión, intersección, complemento, relación y convexidad, realizan la descripción de los conjuntos	Empleando la teoría de conjuntos es posible crear las clases difusas según los requerimientos necesarios para llevar a cabo el control.
(Grande Meza, 2003)	Utilizan una técnica basada en los principios difusos para desarrollar un modelo que permita llevar a cabo el control de problemas no lineales.	Crean variables lingüísticas para simular el razonamiento humano utilizando conjuntos difusos basados en conocimiento.	Al hacer uso de variables lingüísticas es posible recrear y tomar decisiones muy similares a las empleadas durante el análisis del lenguaje natural con el que el hombre se comunica.
(Emil & Tomescu, 2014)	Desarrollan un modelo difuso que permite realizar control en sistemas caóticos aplicable en múltiples campos.	Utilizan un sistema difuso MIMO el cual permite hacer uso de múltiples entradas al	Es de gran ventaja la implementación de modelos difusos que permitan controlar procesos no

		control difuso y obtener múltiples salidas de este.	lineales, no determinísticos y sensibles ante ligeros cambios.
(Wah, 2008)	Establecen las características básicas que debe de contener un controlador difuso, además de identificar los sistemas de inferencia empleados para el desarrollo de los sistemas basados en conocimiento.	Emplean un modelo Mamdani para el desarrollo de un ejemplo de control mediante lógica difusa. Especifican cada uno de los parámetros esenciales para la construcción del sistema, así como las reglas necesarias en el proceso de decisión.	Realizan la identificación de las áreas de oportunidad con relación a los sistemas difusos Mamdani y Takagi en la construcción de controladores.
(Boby, et al., 2018)	Desarrollan un controlador difuso implementando el sistema Mamdani con un estilo MIMO para un proceso de control de voltaje de operación de un ventilador y velocidad de corte de una fresadora.	Haciendo uso de un CNC de 3 ejes coordinados y empleando una tarjeta embebida actualizan los parámetros de operación de los actuadores que implementan en base a la salida del sistema de inferencia.	Es necesario satisfacer que las variables de entrada del control difuso sean correctas para asegurar que la inferencia del algoritmo proporcione las salidas más precisas a la emulación del razonamiento basado en conocimiento.
(Zhmark, et al., 2004)	Realizan la comparativa de las ventajas y desventajas de emplear únicamente instrumentación para realizar el control de voltaje versus un controlador difuso.	Delimitan algunas de las variables de entrada para el algoritmo difuso, permitiéndoles controlar los elementos de salida como voltaje de operación y corriente. Además, hacen uso de variables lingüísticas como bajo, medio y alto para elaborar las funciones que posteriormente ponderaran la pertenencia de la variable real a un término lingüístico.	Una gran ventaja de emplear un controlador difuso para voltaje recae precisamente en la flexibilidad que proporciona para ajustarse ante situaciones de ambigüedad donde existe incertidumbre en la información.

5 MÉTODO

En el presente capítulo es descrita la metodología empleada para el desarrollo de la etapa que permite controlar el proceso de maquinado electroquímico por pulsos mediante la estimación de tensión aplicada a las herramientas de trabajo y el control de la distancia inter-electrodos utilizando una técnica de *soft-computing* nombrada Lógica Difusa. Agregado a lo anterior se describe a detalle los requerimientos y especificaciones del sistema que son necesarios para la ejecución del proceso de manufactura no convencional.

5.1 Requerimientos y especificaciones del sistema de computo

5.1.1 Software

El lenguaje de programación seleccionado para la codificación del problema es Python, del cual se hacen uso de las librerías que a continuación se enlistan.

- Numpy
- Pandas
- Os
- MySQL
- Tkinter
- Serial

En primer lugar, es utilizado *Numpy* debido a las características que ofrece para el tratamiento de datos mediante arreglos y matrices, que a su vez es empleado por *Pandas* para la creación de *DataFrames* y *Series* temporales para la manipulación de información. Por otra parte, es requisito el paquete *OS* (*Operating System*, por sus siglas en inglés) para la obtención de directorios donde se resguardan los archivos necesarios para las interfaces desarrolladas con el paquete de *Tkinter*. Finalmente, el paquete *Serial* permite la transferencia de datos mediante protocolo de comunicación serial asíncrono desde la SBC a los dispositivos requeridos (Foundation, 2021).

Por otra parte, es necesario el lenguaje C++ para realizar la codificación de microcontroladores de 8 bits de matrícula 18F46K22. Este dispositivo en particular fue seleccionado por la accesibilidad y flexibilidad que facilita para la implementación de periféricos de entrada y salida además de contar con un conjunto de instrucciones reducido

y la segmentación en la ejecución de código “*pipe-line*”, lo que agrega velocidad en el procesamiento de información (Technology, 2021).

5.1.2 Hardware

La ejecución de la interfaz de usuario requiere de un equipo de cómputo con los requerimientos mínimos que a continuación se presentan para ejecutar de manera adecuada los scripts del sistema y la carga de los paquetes de Python descritos a continuación:

1. Controladores de periféricos de comunicación Serial FTDI (*Future Technology Devices International*)
2. Conexión Ethernet
3. Un equipo de computo

Por otra parte, es empleada una computadora de una sola placa (SBC, por sus siglas en inglés) para el procesamiento del algoritmo, monitoreo de la variables y control de los diferentes elementos y dispositivos del sistema. Es recomendable utilizar un equipo de la familia Raspberry Pi mayor o igual a la versión 3, permitiendo procesar datos a una velocidad 1.2 GHz, superando a versiones anteriores que cuentan con un procesamiento de 900 MHz (Foundation, 2021).

Adicionalmente es necesario un sistema mecánico que permita la movilización en un espacio de tres ejes coordenados X-Y-Z. Particularmente, el prototipo con que se está trabajando está compuesto por tres tornillos sin fin y motores a pasos descritos en la sección 5.1.7. Además, es necesario un circuito capaz de controlar la movilización de los motores en cada eje mediante comandos dirigidos por software para regular la dirección de giro, la velocidad y la ubicación de la herramienta en el sistema.

El proceso de manufactura requiere de un sistema de filtración y bombeo del electrolito que está conformado por los siguientes elementos:

1. Tres bombas de succión con un voltaje de operación de 12 V con un flujo promedio de 1 L/min.
2. Sistema de filtrado y recirculación de electrolito.
3. Recipiente para almacenamiento de residual del proceso.

4. Solución acuosa compuesta de H_2O y $NaCl$ con una concentración del 16.6 % en masa.

5.1.3 Diagrama de requisitos

El proceso estudiado está compuesto por un conjunto de elementos que conforman el sistema de maquinado no convencional PECM. Derivado de ello, es presentado el diagrama de requisitos de la Figura 5. 1, el cual permite identificar las herramientas, características y especificaciones mínimas para cubrir la funcionalidad del prototipo de maquinado no convencional (Genero Bocco , et al., 2014). Adicionalmente es necesario especificar que en el requisito número 1 “Sistema de movilización” se establece una resolución mínima de 20 μm en función al prototipo utilizado. Por lo tanto, el sistema de control está diseñado tomando en cuenta esta especificación y de ser modificado, deberá ser considerado en la respuesta del sistema de control.

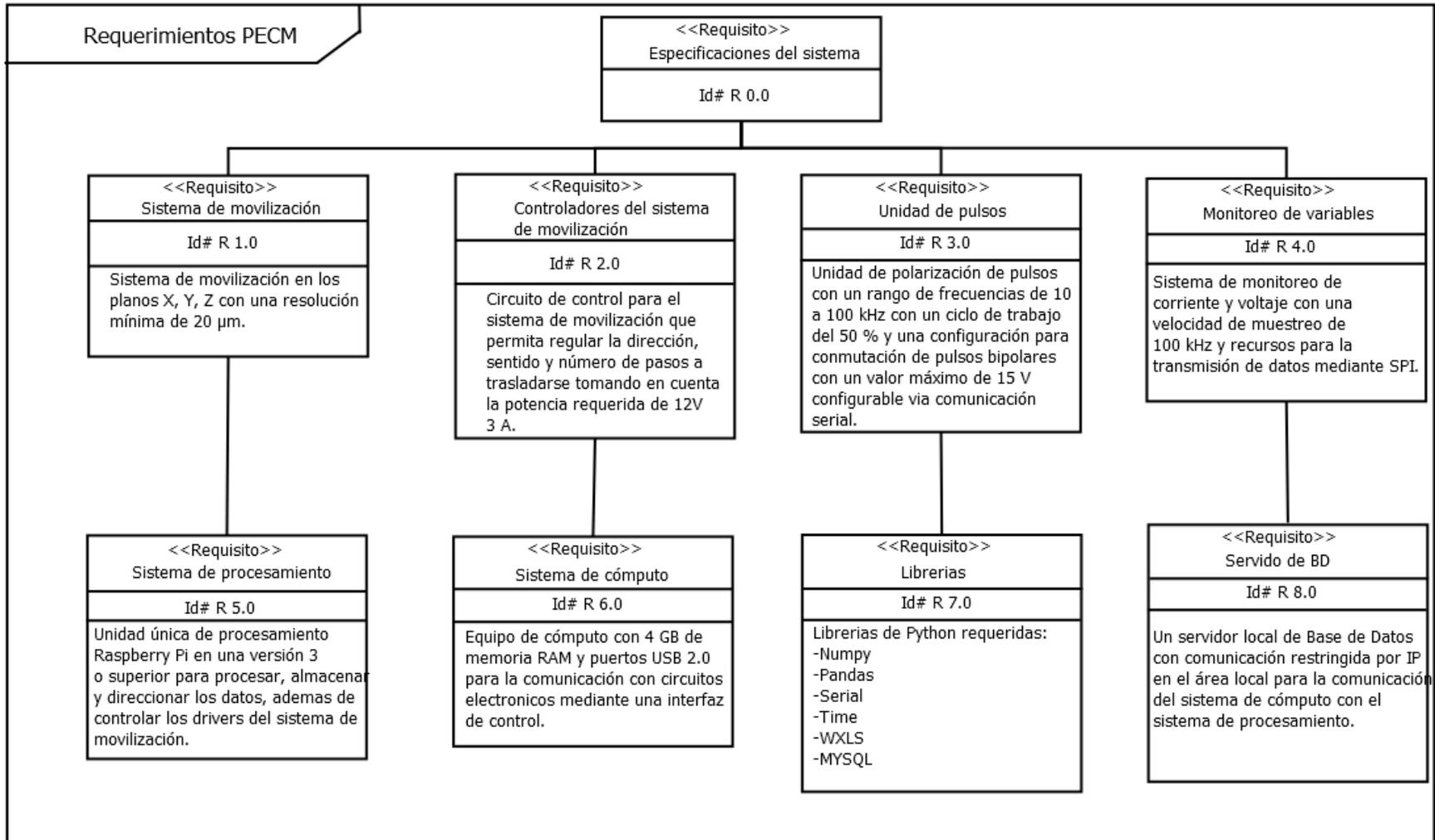


Figura 5. 1 Diagrama de requerimientos del proceso PECM.

5.1.4 Diagrama de flujo de funcionamiento del proceso PECM

En el diagrama de la Figura 5. 2 se describe la secuencia de pasos que conforman el funcionamiento del proceso PECM bajo un esquema de lógica difusa en la interpretación de las variables de interés y la obtención de resultados para el control en el proceso de manufactura PECM.

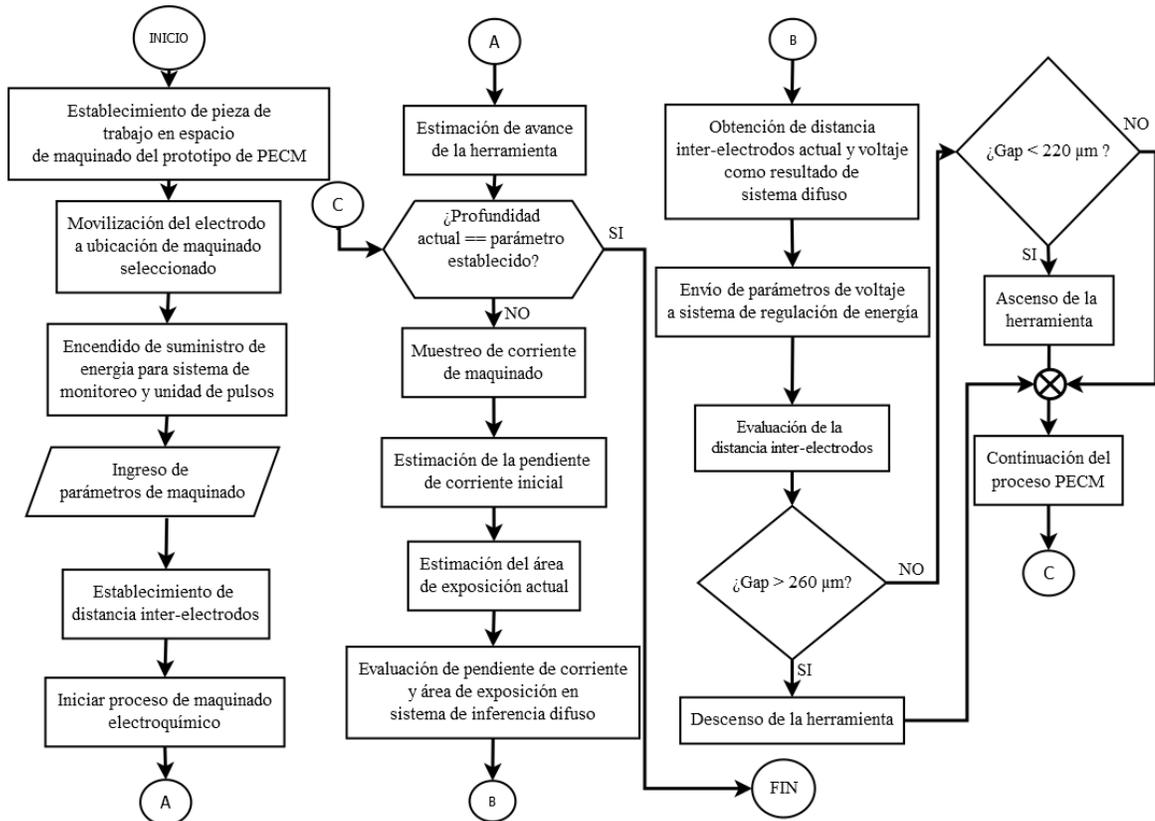


Figura 5. 2. Diagrama de flujo del funcionamiento de la técnica PECM.

Se aprecia en el diagrama anterior que el funcionamiento de PECM inicia con el posicionamiento de la pieza de trabajo en el área de maquinado donde está el prototipo, para posteriormente continuar con el establecimiento de los parámetros deseados en el maquinado. Siguiendo a esto se realiza la evaluación de las variables de interés en el sistema de inferencia difusa, permitiendo generar un resultado que posteriormente es valorado por el sistema para generar los cambios necesarios en el proceso, finalizando una vez sean completados los parámetros establecidos inicialmente por el usuario.

5.1.5 Diagrama de distribución

Tomando en cuenta las especificaciones descritas en (Genero Bocco, et al., 2014) y partiendo de los requisitos observados en la sección 5.1.3, se presenta el diagrama de distribución de la Figura 5. 3.

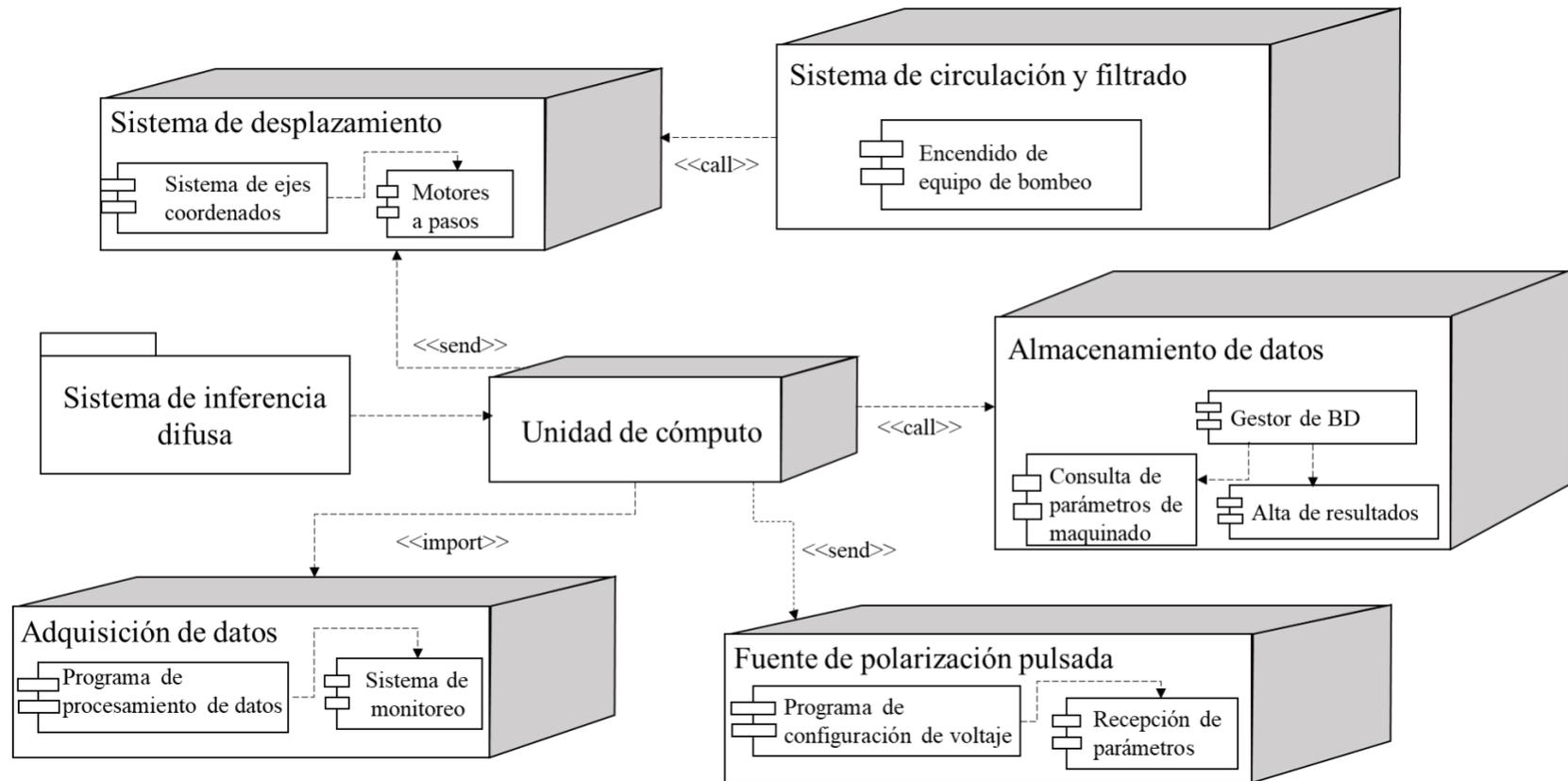


Figura 5. 3. Diagrama de distribución de los elementos que conforman la unidad de cómputo del proceso PECM.

La finalidad del diagrama de distribución presentado anteriormente es de dimensionar y relacionar los componentes que integran cada sección del sistema de cómputo que hacen posible el funcionamiento del proceso de disolución anódica. Cada apartado está delimitado por un cubo, representando cada uno de los diferentes módulos por los que está compuesto PECM. Paralelamente a esto, dentro de cada elemento existen descripciones denotadas por rectángulos que describen procesos y subcomponentes que se requieren para el correcto funcionamiento. Además, la relación de cada uno de ellos se visualiza mediante flechas y etiquetas con la leyenda “<<send>>”, “call” e “<<import>>”, donde el primer término se utiliza para definir el envío de datos de una sección a otra; el segundo para realizar peticiones de información de manera bidireccional a otro bloque y finalmente, el último término se emplea para establecer una solicitud de información de un bloque en específico. Durante las siguientes secciones son descritas las características que componen cada uno de los elementos mencionados anteriormente que permiten asegurar la reproducibilidad del sistema planteado.

5.1.6 Especificaciones técnicas del prototipo de maquinado

El prototipo de maquinado electroquímico requiere de un conjunto de herramientas para generar un producto final como resultado de la exposición del electrodo sobre la pieza de trabajo. En este orden de ideas es descrito en las siguientes secciones el conjunto de componentes esenciales para la reproductibilidad de la presente investigación.

5.1.7 Sistema de ejes coordenados

El proceso de maquinado es movilizado por medio de un sistema mecánico de tres ejes coordenados que son desplazados a través de tornillos sin fin por medio de motores a pasos NEMA 23, los cuales generan un movimiento lineal de 8 mm por cada resolución y un voltaje de operación de 24 Volts con un consumo máximo de corriente de 10 Amperes. En la Figura 5. 4 es presentado el esquema del sistema mecánico para el proceso de PECM.

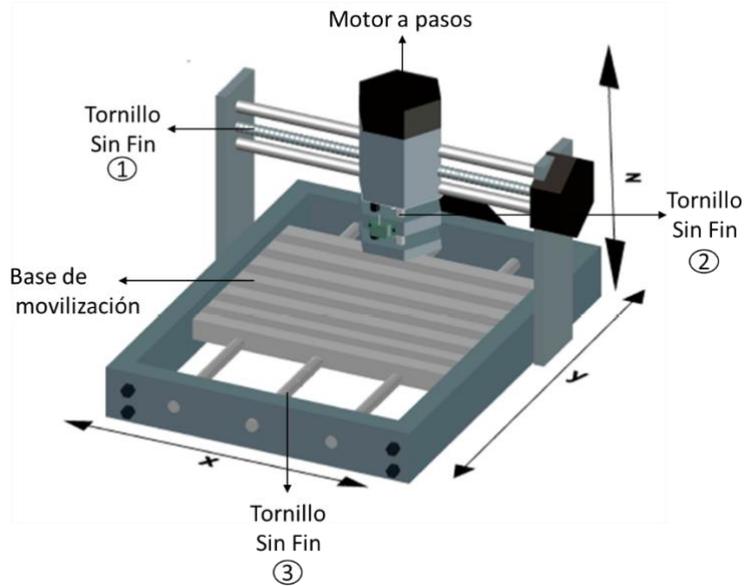


Figura 5. 4. Sistema mecánico de 3 ejes coordinados empleado en el proceso de PECM.

Como es descrito en el esquema de la Figura 5. 4 el sistema mecánico cuenta con una base rectangular que le permite el movimiento en el plano Y. Por otro lado, el eje X y el eje Z son movilizadas mediante los tornillos sin fin 1 y 2 respectivamente, permitiendo el desplazamiento de las herramientas en 3 dimensiones para realizar el proceso de manufactura.

5.1.8 Circuito de control del sistema de ejes coordinados

El circuito de control encargado de suministrar la energía necesaria para manipular el sentido, dirección y velocidad del sistema mecánico es desarrollado en (Gallegos Miranda, 2019), el cual emplea circuitos integrados L297 y una serie de MOSFET's para satisfacer los requerimientos de corriente por parte de los motores a pasos, siendo capaz de suministrar hasta un máximo de 10 A y una tensión de alimentación máxima de 15 V.

De acuerdo con las especificaciones del controlador planteado es posible gestionar un movimiento con una resolución de $\frac{1}{2}$ paso, permitiendo movilizar una distancia de 20 μm en cada señal enviada al circuito de control. En el esquema de la Figura 5. 5 es descrito el diagrama eléctrico del circuito de control.

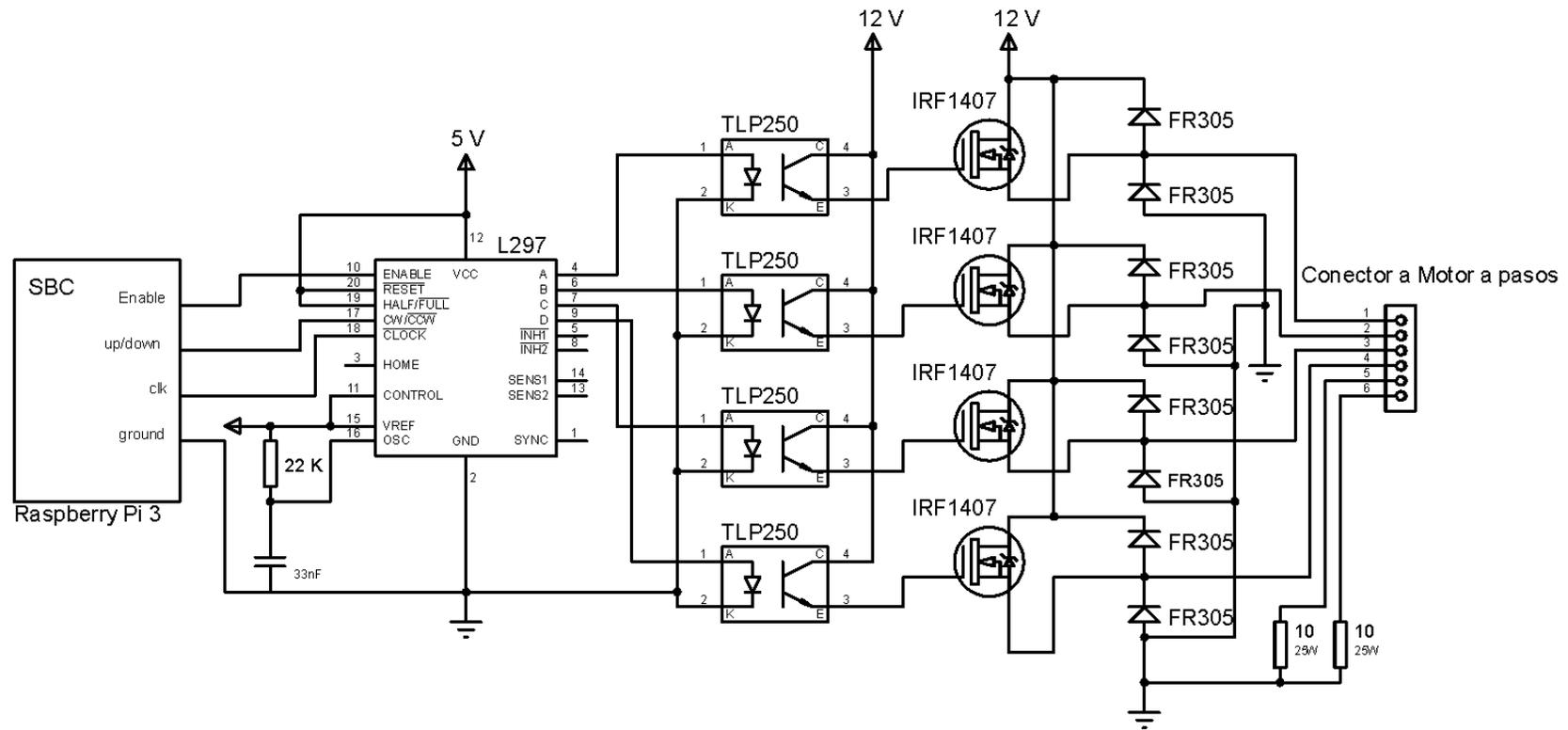


Figura 5. 5. Diagrama esquemático del circuito de control para los motores a pasos (Gallegos Miranda, 2019).

Como es observado en el diagrama de la Figura 5. 5 el circuito de control es comandado por una SBC del tipo Raspberry Pi, que gestiona y envía las señales de control al dispositivo L297; encargado de controlar la dirección y el giro del motor. Posteriormente son empleados optoacopladores TLP250 para activar el arreglo de MOSFET's encargados de la etapa de potencia y así suministrar la energía requerida para la activación del actuador.

5.1.9 Módulo de regulación de voltaje

El presente módulo es considerado como parte de la unidad de pulsos descrita en la sección 5.1.10, el cual es encargado de regular continuamente el voltaje de polarización de los pulsos de desgaste de material empleados en el proceso PECM. Éste es conformado por una fuente Buck XL4015 con una capacidad de tensión de salida de 1.25 a 32 V regulada a través de una red divisora de resistencia externa conformada por un potenciómetro digital X9C103S de 10 k Ω permitiendo suministrar hasta 5 A. Sin embargo, este dispositivo es controlado mediante un microcontrolador 18F46K22 el cual establece la configuración necesaria mediante la habilitación del pin U/D para incrementar o disminuir la resistencia obteniendo así la tensión de salida deseada, la cual es gestionada y posteriormente enviada desde la placa SBC mediante protocolo serial síncrono. En el diagrama de la Figura 5. 6 se presentan los elementos que conforman el módulo de regulación de tensión para la unidad de pulsos.

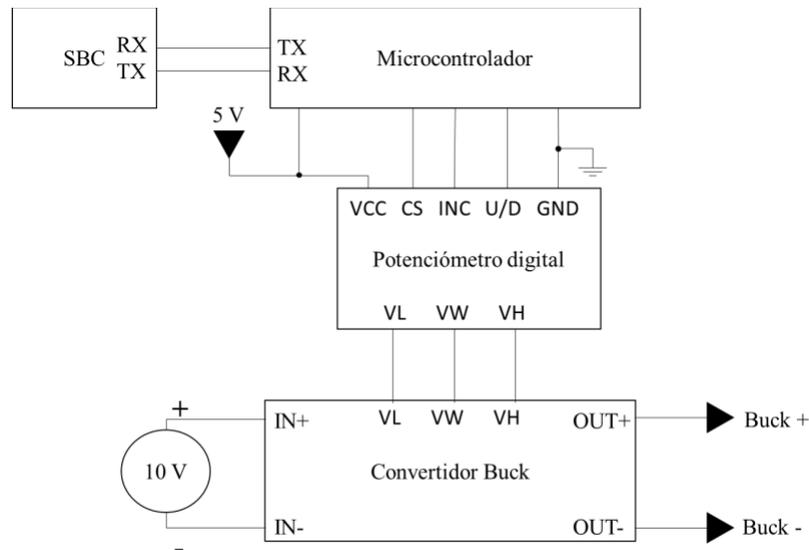


Figura 5. 6. Módulo de regulación de voltaje de la fuente de pulsos PECM.

5.1.10 Unidad de pulsos

El proceso de PECM debe ser catalizado mediante la polarización con energía eléctrica para activar el desgaste de partículas metálicas mediante el paso de corriente a través del electrolito. No obstante, de acuerdo con la literatura existen una variedad de métodos de polarización para inicializar el proceso de remoción de material, citando los enfoques por

corriente continua, corriente pulsada y corriente pulsada bipolar. De acuerdo con el objetivo de la investigación se desarrolló una unidad de polarización pulsada con una configuración en puente H tomando en cuenta los parámetros descritos por (Martinez Alvarado , et al., 2015). Así mismo, son utilizados pulsos de control para la regulación de la conmutación de salida mediante un microcontrolador 18F46K22 el cual se encarga de activar los controladores de medio puente IR2110 que suministran el voltaje necesario para establecer en la región de saturación los MOSFET IRFZ44N y permitir la conducción de corriente. Por otra parte, es utilizada una red de disparo configurada según los parámetros recomendados por el fabricante del dispositivo descritos en (AG, 2020) y una *snubber net* RCD (*Resistance Capacitor Diode*, por sus siglas en inglés) normalmente utilizada para decrementar los sobre impulsos y tensiones transitorias durante la conmutación. Sin embargo, para la estimación de las magnitudes de estos elementos fue considerado el criterio descrito en (Muhamad, 2004) para la estimación de circuitos de amortiguamiento tomando en cuenta una corriente de salida máxima de 3 A, un voltaje pico de drenado a fuente de 20 V y un tiempo de descenso de 30 ns establecido por los MOSFET. Derivado de esto, se utiliza un capacitor comercial de 1 nF, una resistencia de 10 Ω y un diodo de rápida conmutación FR305 en este circuito. En este sentido, son citadas las características generales de la unidad de pulsos mediante los numerales que a continuación se presentan:

1. Frecuencia de trabajo en el intervalo de 10 kHz – 100 kHz
2. Ciclo de trabajo al 50 %
3. Capacidad de suministro de corriente máxima de 3 A.
4. Módulo de comunicación para transferencia de datos por protocolo serial con una velocidad de transferencia nominal de 9600 Baudios
5. Regulación de 1.25 a 10 V del ancho de pulso

La descripción anterior permite definir las características del proceso de manufactura según las configuraciones delimitadas por el usuario, las cuales son enviadas mediante un módulo de transmisión de datos por protocolo serial síncrono desde un equipo de cómputo hasta a la unidad de pulsos dirigida por un microcontrolador. En la Figura 5. 7 se plantea el diagrama esquemático de fuente de pulsos desarrollada para el proceso de PECM.

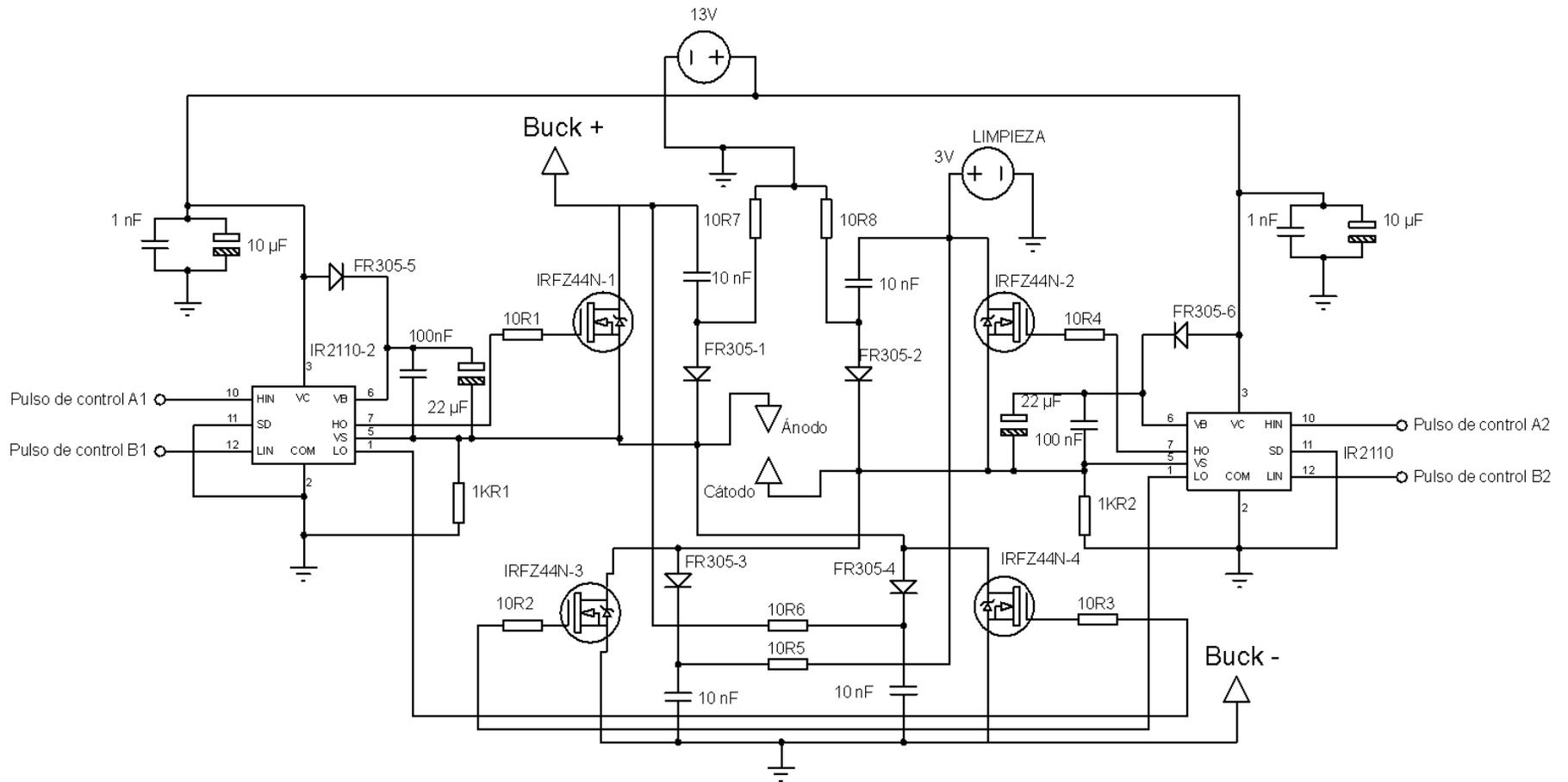


Figura 5. 7. Unidad de pulsos para el proceso de PECM.

5.1.11 Configuración de unidad de suministro de pulsos

La unidad de polarización descrita en la sección 5.1.9 presenta una configuración del tipo puente H, la cual permite regular la disposición Ánodo-Cátodo de los puertos de salida y en consecuencia el sentido de la corriente. Para fines de la presente investigación se requiere mantener un número de 12 pulsos denominados “positivos” de acuerdo con la polarización inicial, que posteriormente deberán invertirse para generar a un pulso “negativo”, regresando así a la configuración inicial una vez este finalice. Es indispensable establecer que la frecuencia nominal es establecida a través de un equipo de cómputo por medio de comunicación serial, para posteriormente iniciar con el proceso manufactura. En este sentido se presenta en la Figura 5. 8 el diagrama de flujo del funcionamiento de la unidad de polarización para la generación de pulsos positivos y negativos.

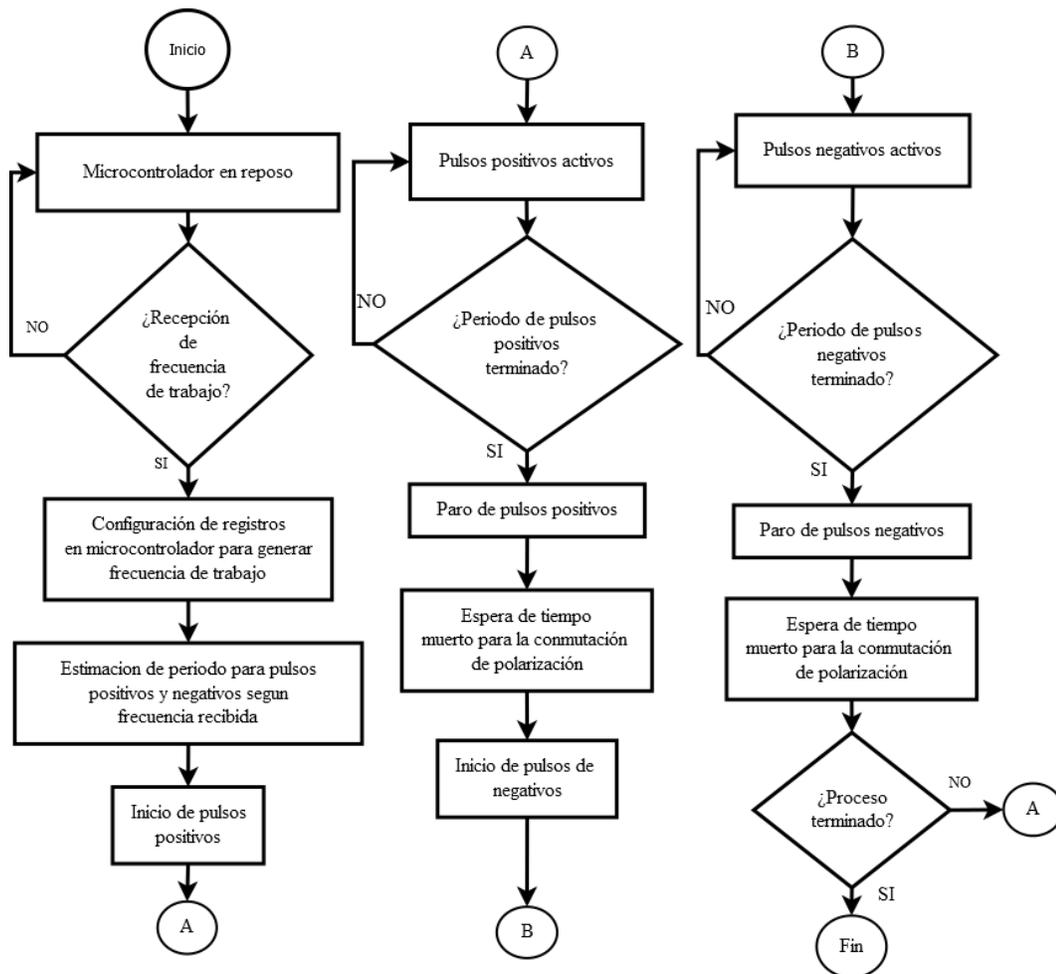


Figura 5. 8. Diagrama de flujo de funcionamiento de la unidad de polarización.

De acuerdo a lo descrito en el diagrama de la Figura 5. 8 la conmutacion de los pulsos se lleva a cabo a partir de la recepcion de la frecuencia de trabajo hasta finalizar el proceso de manufactura. Agregado a lo anterior, se vizualiza en la Figura 5. 9 (A) una medicion de los pulsos generados con un tiempo de muestreo de 100 μ s, donde se aprecia la relacion periodicamente de los pulsos positivos y negativos suministrados por la fuente. Además, en la Figura 5. 9 (B) se presenta una captura de la medicion de los pulsos con un tiempo de muestreo de 40 μ s, permitiendo identificar con mayor claridad el número de pulsos positivos por cada negativo, asi como el tiempo muerto necesario para conmutar de uno a otro. Todo esto fue cuantificado por medio de un osciloscopio flotado Tektronix THS3024 el cual posibilita realizar las mediciones directamente de la salida de los electrodos sin verse perjudicados por la referencia a tierra que los osciloscopios convencionales utilizan, y en concecuencia lograr vislumbrar la polaridad directamente de las señales de trabajo.

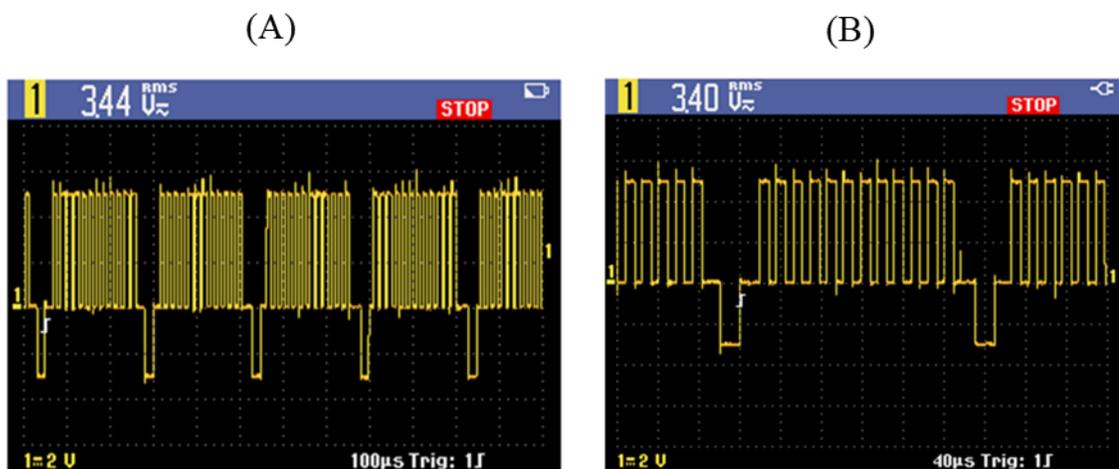


Figura 5. 9. Relación de pulsos positivos y negativos generados con la unidad de polarización a un tiempo de muestreo de (A)100 μ s y (B)40 μ s con un osciloscopio flotado Tektronix THS3024.

5.1.12 Sistema de circulación y filtrado de electrolito

El método de manufactura no convencional PECM requiere de electrolito entre los electrodos para lograr catalizar el proceso de electrolisis e inicializar la remoción de material. Como resultado de esto se generan residuos provenientes del maquinado, propiciando la baja conductividad eléctrica entre las herramientas debido a sus propiedades físicas y químicas (Abdel & El-Hofy, 2005). Derivado de ello es desarrollado

un sistema de filtración compuesto por tres filtros de espuma de poliuretano ubicados en un recipiente tubular donde es almacenada la solución que circula hacia el sistema. Este recipiente tiene un diámetro de 8 cm en la base y una altura de 60 cm, ubicando los elementos de filtración a lo largo de su interior. Agregado a ello es situada una bomba de succión en la parte inferior del sistema tubular para suministrar la solución filtrada hacia el electrodo que hace la herramienta, y otra bomba en el recipiente donde es situada la pieza de trabajo para trasladar el líquido contaminado con residuos hasta el sistema de filtrado, siendo así el proceso de circulación del electrolito como se muestra en la Figura 5. 10.

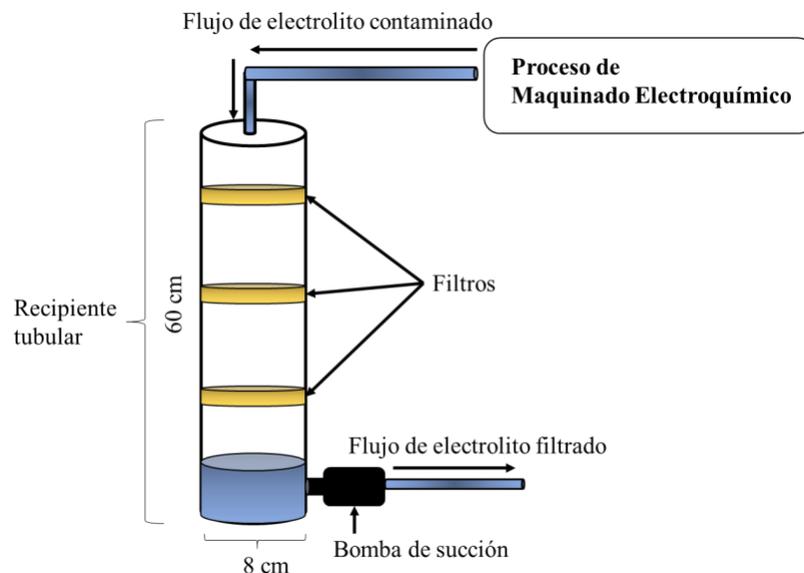


Figura 5. 10. Sistema de filtrado tubular.

La magnitud del flujo de electrolito que circula por el sistema está definida en función al voltaje aplicado sobre las bombas de succión. Nominalmente es aplicado un voltaje de 5 V, lo cual mantiene un flujo de 19.7 ml/min, pero puede ser regulado mediante el suministro de tensión eléctrica según las necesidades del usuario.

Por otra parte, con base en las características del sistema de filtrado es estimado un aproximado de 1.5 litros de solución acuosa para permitir el suministro regular de electrolito en el proceso de PECM, el cual tiene una vida útil para 20 pruebas aproximadamente. Este dato es válido para ensayos lineales con una longitud máxima de

10 mm por experimento y profundidades de hasta 500 μm , filtrando un promedio de 0.3927 mm^3 de material por unidad. Por otro lado, tomando en cuenta las mismas condiciones definidas anteriormente se estima que la integridad de los filtros es la adecuada para un máximo de 40 pruebas. Este parámetro es establecido con base en la observación de dificultad de la solución para trasladarse de un filtro a otro, siendo este el criterio principal para la sustitución de estos elementos.

5.1.13 Sistema de monitoreo

Partiendo de la necesidad de conocer el comportamiento de determinadas variables físicas presentes en el proceso de PECM, se implementó un sistema de monitoreo de corriente y voltaje para adquirir y resguardar los datos observados. Para esto se implementa un sensor de corriente de efecto Hall de lazo cerrado con matrícula T-60404-N4646-X761 el cual genera el valor de voltaje RMS en función a la intensidad detectada. Así mismo, es utilizado un convertidor AD536 el cual obtiene el valor eficaz de la señal de entrada de voltaje de maquinado. Para sustentar que la entrada de tensión del sensor sea menor a 5 V y no dañe el dispositivo es utilizado un divisor de voltaje como se muestra en la Figura 5. 11, cuya salida se estima mediante la ecuación (5. 1).

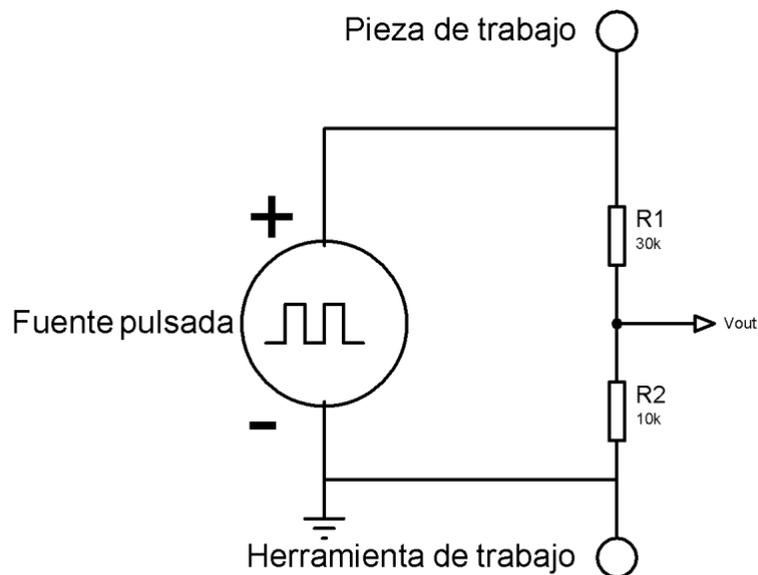


Figura 5. 11 Divisor de tensión utilizado para asegurar el monitoreo de voltaje no superior a 5 V.

$$V_{out} = \frac{R2}{R1 + R2} * V_{in} \quad (5.1)$$

Donde:

V_{out} = Voltaje de salida [V]

V_{in} = Voltaje de entrada [V]

R1, R2 = Arreglo de resistencias para obtener la ganancia de voltaje [kΩ]

Cada parámetro es muestreado mediante un convertidor analógico a digital de 12 bits MCP3208, el cual transmite los datos mediante una interfaz SPI (*Serial Peripheral Interfaz*) hacia una SBC donde son procesados y almacenados. Estos datos son obtenidos de dos elementos, el primero se obtiene del convertidor AD536 el cual estima el valor eficaz de la señal pulsada que es recibida del divisor de voltaje, y el segundo se adquiere de la corriente RMS de salida que es estimada por el sensor de voltaje de lazo cerrado T60404-N4646-X761 que se conecta en serie con las herramientas de trabajo. En la Figura 5. 12 es observado el diagrama eléctrico del sistema de monitoreo descrito.

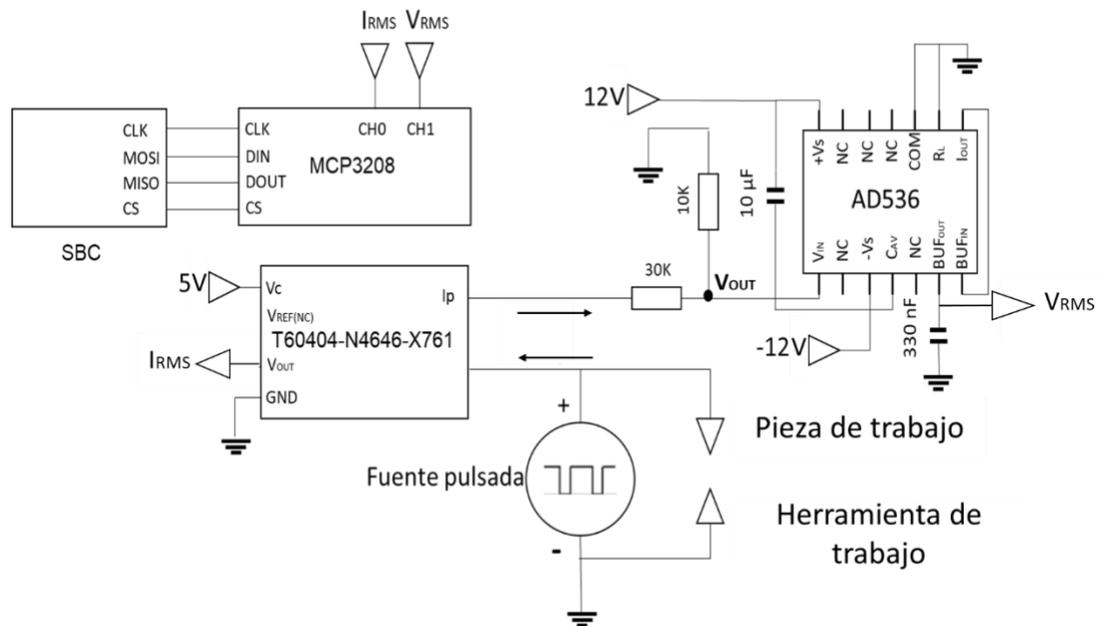


Figura 5. 12 Diagrama eléctrico del sistema de monitoreo de corriente y voltaje del proceso PECM.

Con base en el diagrama eléctrico del sistema de monitoreo, se realiza el muestreo de datos por medio del MCP3208 a una frecuencia de 100 kHz. Sin embargo, durante este proceso es obtenida una media cada 500 muestras del parámetro de tensión y corriente, que posteriormente son procesados por la SBC y almacenados en un documento de Excel para su posterior análisis.

5.2 Identificación de parámetros del proceso PECM con corriente bipolar

En la discusión de la literatura fueron observadas diferencias entre los métodos de maquinado no convencional, observando que a diferencia de la polarización por corriente continua el método de corriente pulsada ofrece ventajas como la reducción del efecto de sobre corte. En este caso en particular son estudiados los resultados de la aplicación de pulsos con corriente bipolar, por lo cual se diseñó una serie experimental para delimitar las desigualdades existentes entre la aplicación de pulsos convencionales (corriente pulsada) y pulsos bipolares (corriente bipolar).

Según el estudio de la literatura visto en (Han, et al., 2018) (Hongyou, et al., 2009) (Idrosov, et al., 2004) (Zaytzev, et al., 2004), los pulsos bipolares contribuyen a la eliminación de las partículas no metálicas generadas por el proceso de remoción de material con ayuda de la conmutación de la polarización en los electrodos, permitiendo reducir el fenómeno de sobre corte y contribuyendo a mantener constante la tasa de remoción de material. A partir de este criterio fue diseñada una caracterización experimental para observar los efectos de la aplicación de pulsos con corriente bipolar en el proceso de maquinado electroquímico.

El prototipo de maquinado utilizado para el presente análisis es descrito en (Gallegos Miranda, 2019), el cual se moviliza con un sistema de motores a pasos con una resolución de 20 μm . Por otra parte, el tipo de electrodo utilizado presenta un diámetro externo de 603 μm y uno interno de 370 μm como se muestra en la Figura 5. 13

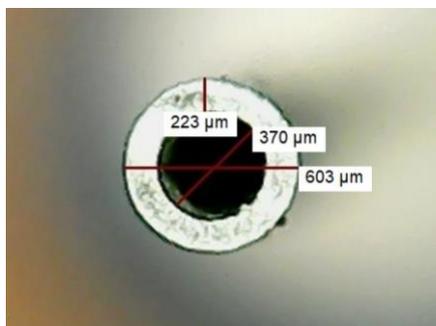


Figura 5. 13 Electrodo utilizado para la experimentación del proceso PECM.

Como es mencionado anteriormente, la corriente juega un papel esencial para la comprensión del proceso, por lo cual, fue necesario identificar las características principales con respecto a la corriente generada con este tipo de electrodo, dando paso a una caracterización para analizar la corriente inicial, así como la magnitud de intensidad entre cada paso del sistema mecánico debido a que se moviliza en función a una resolución. Bajo esta hipótesis se situó el electrodo a una distancia inicial de 240 μm con respecto a la pieza de trabajo y se cuantificó la corriente observada al polarizar los electrodos. Posteriormente se descendió un paso y se estimó la diferencia de intensidad eléctrica para conocer la ventana de corriente entre cada descenso. De igual manera se realizó el mismo procedimiento de movilización, pero en dirección contraria, para observar la similitud entre cada criterio. Como resultado se obtuvo que la ventana de corriente entre cada paso del sistema mecánico es aproximadamente igual a 20 mA.

En adición a lo anterior, cabe destacar que la relación de pulsos negativos propuestos está delimitada con base en los avances descritos en (Meng, et al., 2019) donde la frecuencia de pulsos bipolares es establecida en una tasa de 12.5:1. En este sentido, para fines de la presente investigación se estableció utilizar una relación de pulsos bipolares de 12:1 debido a la similitud de las frecuencias empleadas en la literatura y las características de la fuente diseñada. En la Figura 5. 14 se describen las discrepancias entre la aplicación de pulsos convencionales y pulsos bipolares empleados como caso de estudio para el análisis de las diferencias entre cada método.

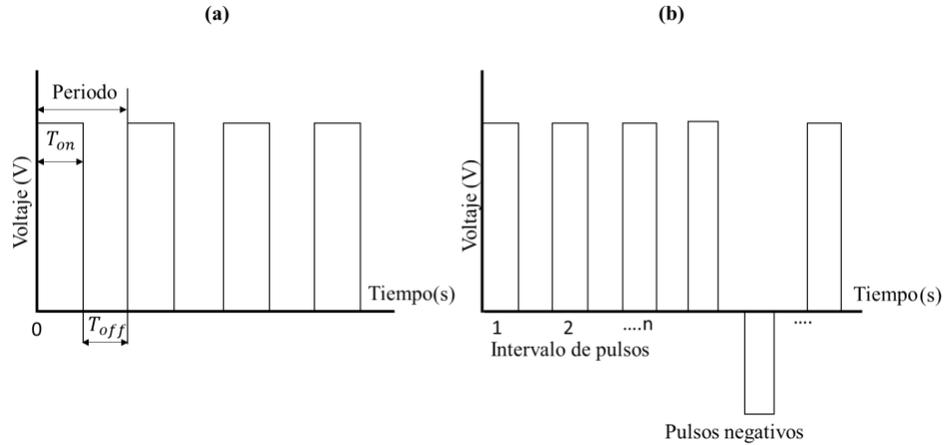


Figura 5. 14 Relación de pulsos unipolares (a) y pulsos bipolares (b) utilizados para la serie experimental.

Para este criterio de pulsos bipolares conviene especificar que cada dependencia de pulsos inversos es establecida en función a la frecuencia de desgaste de material, por lo que en cada intervalo se mantendrá una periodicidad inversa distinta. En este sentido se describe en la Tabla 5. 1 el periodo de los pulsos bipolares según la frecuencia principal de trabajo.

Tabla 5. 1 Relación de pulsos negativos y pulsos positivos según la frecuencia de trabajo.

Frecuencia kHz	Periodo de desgaste (pulsos positivos)	Periodo de limpieza (pulsos negativos)
20	50 μ s	600 μ s
40	25 μ s	300 μ s
60	16.6 μ s	200 μ s
80	12.5 μ s	150 μ s
100	10 μ s	120 μ s

5.3 Estimación del área de exposición

El área de exposición es una variable de gran relevancia para el presente documento debido a que la corriente de maquinado depende este parámetro. Por lo tanto, es considerada como una variable de entrada en la etapa de control en conjunto con el comportamiento de la corriente de maquinado. En este sentido, es estimada la superficie

total expuesta por medio de la ecuación (5. 2), tomando en cuenta el esquema de la Figura 5. 15.

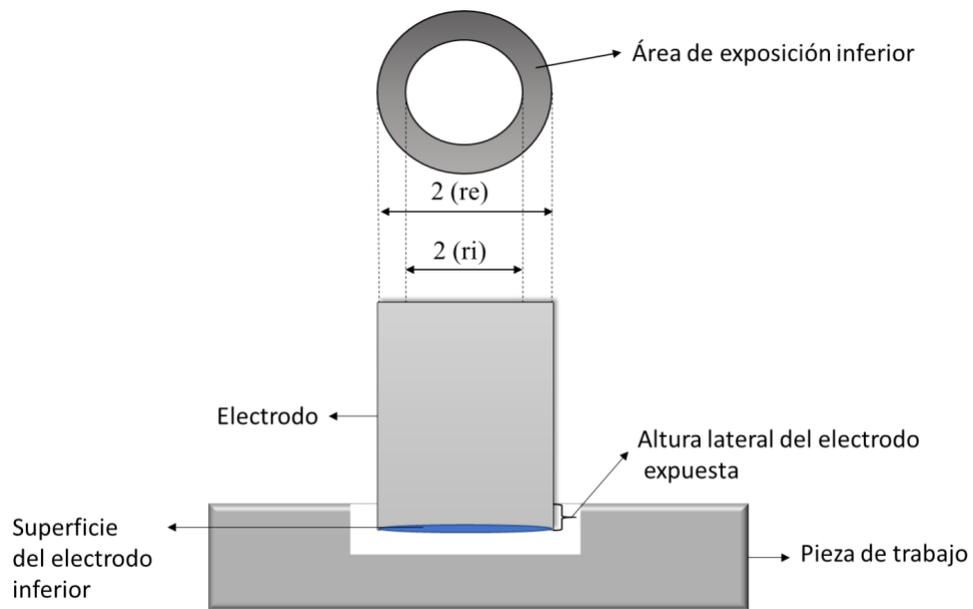


Figura 5. 15. Diagrama de los elementos que conforman el área de exposición en el proceso de PECM

$$A_f = A_{inf} + A_{lat} \quad (5. 2)$$

$$A_{inf} = (\pi * re^2) - (\pi * ri^2) \quad (5. 3)$$

$$A_{lat} = 2\pi * re * h \quad (5. 4)$$

Donde:

A_f = Es el área de exposición final [mm^2]

A_{inf} =Es el área de exposición inferior del electrodo [mm^2]

A_{lat} =Es el área de exposición lateral del electrodo [mm^2]

re =Es el radio de la circunferencia exterior [mm]

ri =Es el radio de la circunferencia interior [mm]

h =Es la altura del electrodo expuesta sobre la superficie de la pieza de trabajo [mm]

5.4 Diagrama de control del proceso PECM mediante un enfoque difuso

Tomando en cuenta las características y el análisis desarrollado en la literatura con relación a las implicaciones básicas del proceso de manufactura no convencional, así como el enfoque de control mediante técnicas de inteligencia artificial, es como se determinan las siguientes premisas como parte del diseño de control para PECM con un enfoque difuso.

1. La corriente de maquinado permite aproximar la relación existente entre la distancia de los electrodos normalmente conocida como “*gap*” mediante la ecuación (4. 9)
2. El voltaje de polarización influye en la dimensión del maquinado final denominado efecto de sobre corte.
3. El descenso de la herramienta a una profundidad mayor a la superficie de la pieza de trabajo provoca el incremento del área de exposición a consecuencia de la adición de la superficie lateral, esto favorece la dispersión de la corriente no solo por la superficie inferior sino también por las zonas adyacentes, originando el decremento en la remoción de material.
4. El proceso de PECM presenta un comportamiento no lineal, dificultando el diseño de control mediante la definición de un modelo matemático.
5. En el área de la industria son consideradas las técnicas de cómputo suave como lógica difusa como alternativas viables para el tratamiento de problemas de control que cuentan con alto grado de complejidad y no linealidad.
6. El enfoque difuso consiste en plasmar el conocimiento humano en una serie de reglas formando una base de conocimiento, las cuales evalúan variables lingüísticas representativas de fenómenos físicos extraídos de un proceso.
7. El proceso PECM es considerado como una técnica no lineal en función al número de variables que involucra para su ejecución. Además, al ser considerado como una técnica de manufactura moderna puede ser tratado como un problema de control mediante un enfoque difuso.

Con base en esta serie de premisas se visualiza en la Figura 5. 16 un diagrama de control del proceso PECM con un enfoque difuso tomando en consideración las problemáticas planteadas en la literatura.

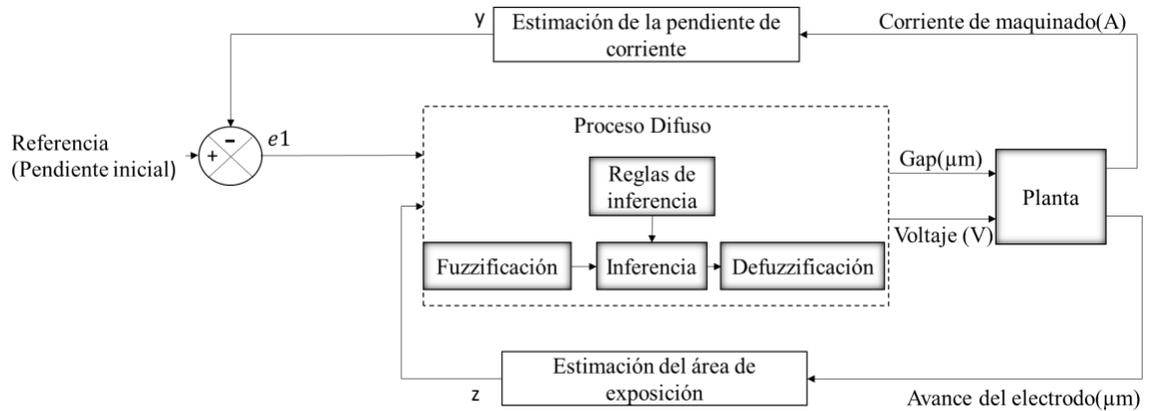


Figura 5. 16 Diagrama de control del proceso PECM mediante un enfoque difuso.

Según el estudio desarrollado en (Abdel & El-Hofy, 2005) (Groover, 2010) sobre el proceso, la corriente de maquinado es la variable con mayor correlación a la distancia entre electrodos, y según la evaluación difusa de (Gallegos Miranda, 2019) su pendiente refleja la velocidad de remoción, parámetro de igual forma relacionado con el *gap*. Con base en ello, es considerada la pendiente como una variable de entrada para el control del sistema planteado. Por otra parte, es considerada como segunda variable de evaluación la magnitud del área de exposición del electrodo, esto debido a que interfiere con la proporción de corriente presente en el proceso según el grado de avance en la remoción de material, observando un comportamiento no lineal con relación a la corriente vista en el inicio del proceso y la detectada cuando los bordes laterales son expuestos sobre la pieza de trabajo (Gallegos Miranda, 2019).

En virtud de lo antes mencionado se evalúa mediante un razonamiento difuso la magnitud del *gap* existente para cada intervalo de tiempo y la magnitud de voltaje requerido para obtener un maquinado uniforme y obtener la distancia de profundidad establecida inicialmente por el usuario con un efecto de sobre corte mínimo, contribuyendo a la dispersión de residuos no metálicos de la herramienta por medio de la aplicación de pulsos bipolares cada periodo de tiempo como fue establecido en la sección 5.4.

5.5 Definición de las variables difusas

Los términos lingüísticos o variables difusas son las etiquetas que delimitan los conjuntos de pertenencia en el sistema difuso. Para la presente investigación se delimitaron un total de 12 variables lingüísticas, 3 para cada variable de entrada y 3 para cada una de salida tal como se muestra en la Tabla 5. 2.

Tabla 5. 2 Etiquetas lingüísticas para las variables de entrada y salida del sistema difuso.

Tipo de variable	Variables	Etiquetas lingüísticas
Entrada	Error	NE (Negativo)
		CE (Cero)
		PO (Positivo)
	Área de Exposición	IN (Inicial)
		ME (Media)
		AV (Avanzada)
Salida	<i>Gap</i>	CR (Cerca)
		NO (Normal)
		LE (Lejos)
	Voltaje	MI (Mínimo)
		RE (Regular)
		AL (Alto)

Tal como se observa en la Tabla 5. 2 cada variable puede tomar un grado de pertenencia a cualquiera de las tres etiquetas lingüísticas, que a su vez son representativas de un conjunto difuso con límites establecidos dentro de un universo del discurso según la acción de control requerida.

5.5.1 Diseño de los conjuntos difusos

El tipo de funciones de membresía propuestas para la presente investigación son del tipo Z, S y Gaussianas, definidas según el análisis experimental planteado en la sección 6.3. Sin embargo, merece la pena subrayar que para generalizar los límites de los parámetros descritos se realizó la normalización de los conjuntos difusos, dividiendo el máximo valor del universo del discurso entre cada uno de los parámetros evaluados a lo largo del proceso, estableciendo el eje “x” de manera unitaria, y en un intervalo de -1 a 1 para el caso del parámetro del error. En consecuencia, cada función difusa puede adaptarse con mayor facilidad a cambios en los parámetros de pertenencia establecidos inicialmente. Por lo tanto, según la descripción de las etiquetas lingüísticas descritas en la Tabla 5. 2, se visualiza en la Figura 5. 17 los conjuntos difusos para la variable del error de la pendiente cuantificada en mA/s.

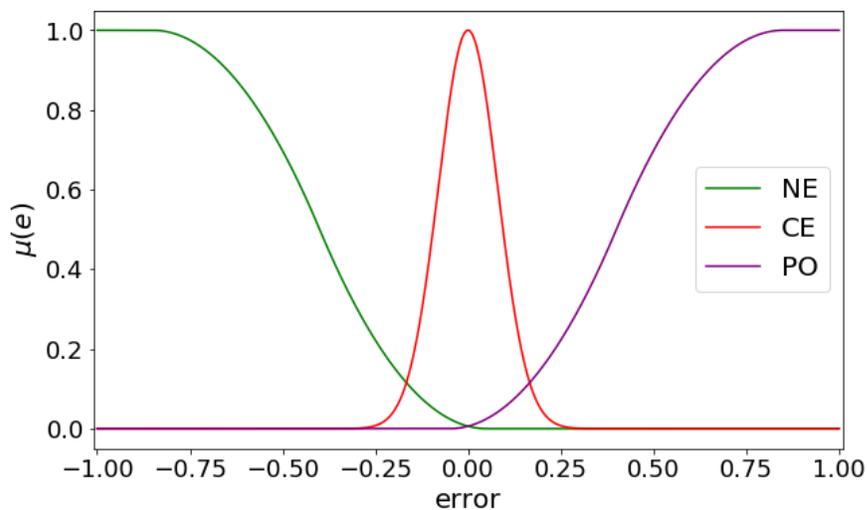


Figura 5. 17 Funciones de membresía normalizadas para la evaluación del error de la pendiente [(mA/s) / (mA/s)].

En términos generales, las funciones de la Figura 5. 17 tienen como objetivo estimar el grado pertenencia de la variable del error de la pendiente a las etiquetas lingüísticas “NEGATIVO” (NE), “CERO” (CE) y “POSITIVO” (PO), donde el universo del discurso en números reales se establece en un intervalo de -0.0048 a 0.0048 (error permitido de la pendiente de maquinado). Estos parámetros fueron definidos tomando como referencia la pendiente promedio, donde los límites del conjunto CE reflejan el porcentaje de cambio

permitido durante la remoción de material correspondientes a una resolución del sistema, la cual es de 20 μm . Por otra parte, el conjunto NE proporciona los fundamentos para estimar el *gap* cuando el electrodo se aproxima a la pieza de trabajo más de lo permitido, es decir, con una distancia menor a 220 μm . Finalmente, el conjunto PO manifiesta los cambios de la pendiente que son atribuidos cuando el desgaste de material decrece a consecuencia del aumento de la distancia entre electrodos en una magnitud superior a 260 μm .

Por otro lado, los conjuntos difusos definidos para la segunda variable de entrada correspondientes al área de exposición del electrodo son visualizados en la Figura 5. 19.

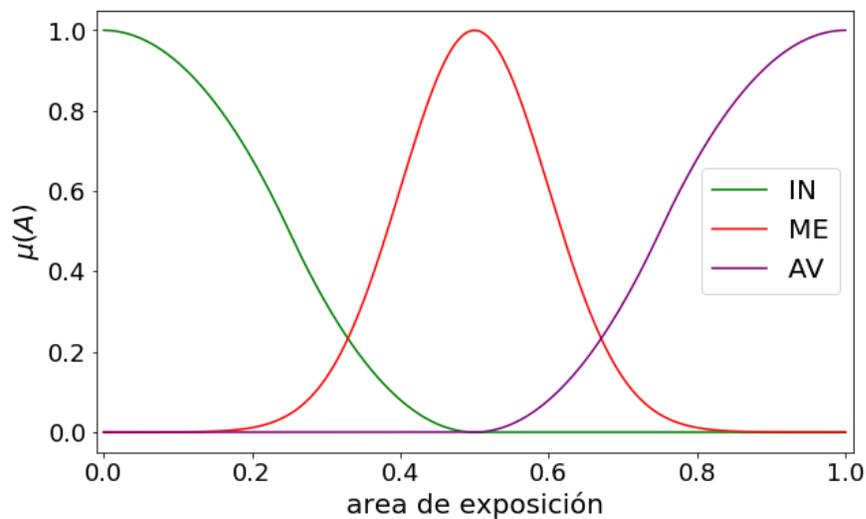


Figura 5. 18 Funciones de membresía normalizadas para la variable del área de exposición [$\text{mm}^2 / \text{mm}^2$].

Los conjuntos para ponderar el área de exposición tienen un universo del discurso definido en un intervalo de 0.178 mm^2 a 1.283 mm^2 , lo cual permite valorar superficies del electrodo para maquinados de hasta 800 μm de profundidad. Este parámetro se estipuló para realizar cortes sobre la pieza de trabajo en el límite de la escala de las micras, el cual ha sido y será uno de los principales objetivos del micro maquinado. Continuando con la descripción de los conjuntos se observa la etiqueta “INICIAL” (IN), la cual detalla el conjunto de valores para profundidades donde solo interfiere la superficie inferior del electrodo y desgastes con un área en el límite medio del universo del discurso. Posteriormente se identifica el conjunto “MEDIA” (ME), el cual pondera la pertenencia

de áreas situadas desde los límites del 20 al 80 % a través de una función Gaussiana con una media en 0.5 y una desviación estándar de 0.1. Por último, el conjunto de área “AVANZADA” (AV), refleja la pertenencia de pruebas con profundidades de hasta 800 μm donde el área total máxima observada es de 1.283 μm^2 .

Análogamente a las funciones de entrada se tienen los conjuntos de membrecía para las variables de salida. Una de ellas refiere al *gap*, los cuales son detallados mediante la gráfica de la Figura 5. 19.

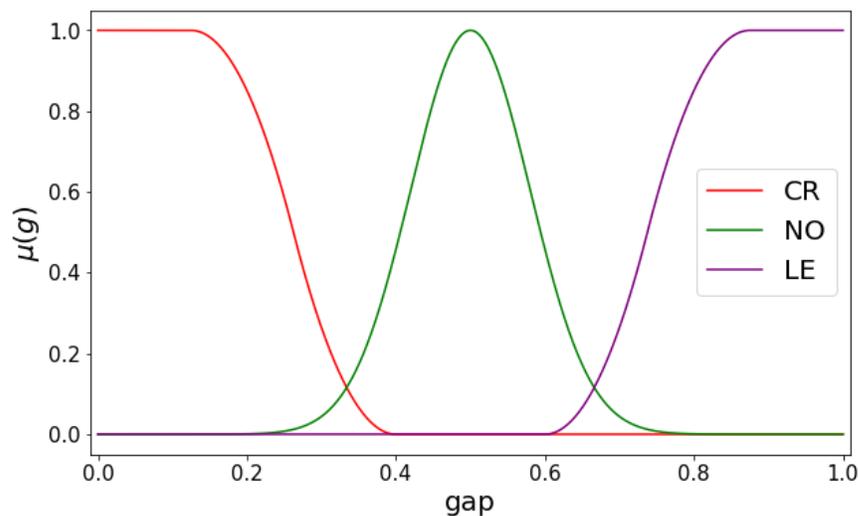


Figura 5. 19 Funciones de membrecía normalizadas para la variable de salida “gap” [$\mu\text{m} / \mu\text{m}$].

Para el diseño de las funciones de la variable de salida *gap* merece la pena recordar que la corriente de maquinado presenta la mayor correlación con la distancia entre electrodos, que al ser controlada de manera efectiva permite realizar una remoción de material constante (Groover, 2010). Además, según el análisis de este proceso por medio de experimentación y de investigaciones previas desarrolladas en (Gallegos Miranda, 2019) se ha demostrado que mediante el análisis del comportamiento de la corriente con respecto al tiempo también conocida como la “pendiente de corriente”, permite aproximar de manera efectiva los cambios en la separación de ambos electrodos al evaluarse por medio su error y a su vez considerando el área de exposición, se estima aproximar el *gap* de manera efectiva y así evaluarse por medio de la planta para realizar una acción de control. Derivado de esto son definidos los conjuntos difusos visualizados en la Figura 5. 19, donde

el conjunto “NORMAL” (NO) delimita el *gap* permitido, el cual es de 220 μm a 260 μm , donde la distancia optima a establecer es de 240 μm , como fue establecida inicialmente. Por lo tanto, para cuando el resultado recae sobre el conjunto “CERCA” (CR), significa que la herramienta que hace el cátodo se aproxima con una distancia menor a los 220 μm ; Por el contrario, cuando el resultado recae en la etiqueta “LEJOS” (LE) la distancia estimada supera los 260 μm . Aunado a lo anterior, como segunda variable de salida se tiene el Voltaje, definiéndose los conjuntos “MINIMO” (MI), “REGULAR” (RE) y “ALTO” (AL) como se observa en la Figura 5. 20.

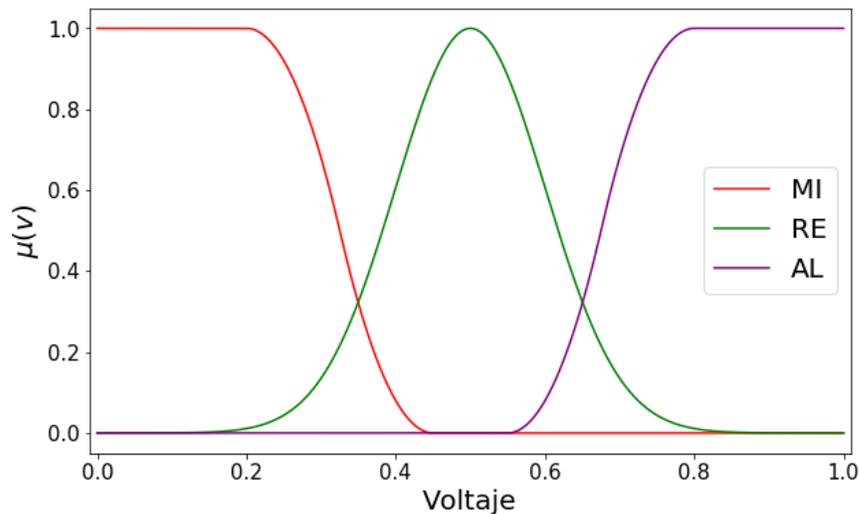


Figura 5. 20 Funciones de membresía normalizadas para la variable de salida de Voltaje [V / V].

El universo del discurso para la variable de voltaje está definido en un intervalo de 3 a 7 V, éste tiene la finalidad de optimizar el efecto de sobre-corte, así como de modificar la pendiente de corriente con una menor resolución que la que ofrece la movilización del electrodo, ya que como se describe en (Groover, 2010) un parámetro del proceso tiene relación con la resistividad que presenta el electrolito, estimada según la ecuación (4. 10). Por lo tanto, si la movilización de la herramienta no es lo suficientemente adecuada para alcanzar la referencia definida, la compensación con el parámetro de tensión permitirá aproximar lo más cercano posible a la referencia, cumpliendo con el objetivo de mantener una remoción de material constante.

5.6 Sistema de inferencia

El proceso de inferencia del sistema difuso está conformado por un conjunto de reglas del tipo IF-THEN (ver sección 4.3), las cuales reflejan el proceso de razonamiento aproximado generado por un experto, que para este caso de estudio se fundamenta mediante el análisis experimental elaborado. Por lo tanto, si es considerado el criterio de máximos y mínimos descrito en la serie de ecuaciones (4. 11)-(4. 13), el primer término de evaluación correspondiente al error de la pendiente de corriente se define como un conjunto singleton E' , y A' para el segundo término de entrada referente al área de exposición. Análogamente la salida y_t correspondiente al nivel de voltaje se representa mediante una función de membresía V' y una función G' para la salida del *gap*. En este sentido, el conjunto de reglas establecidas para la delimitación del voltaje de operación de la planta esta denotado por la siguiente serie de reglas difusas.

1. $V'_1 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{NE}(x) \wedge \mu_{RE}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{IN}(x) \wedge \mu_{RE}(y))])$
2. $V'_2 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{CE}(x) \wedge \mu_{RE}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{IN}(x) \wedge \mu_{RE}(y))])$
3. $V'_3 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{PO}(x) \wedge \mu_{RE}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{PO}(x) \wedge \mu_{RE}(y))])$
4. $V'_4 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{NE}(x) \wedge \mu_{AL}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{ME}(x) \wedge \mu_{AL}(y))])$
5. $V'_5 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{CE}(x) \wedge \mu_{RE}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{ME}(x) \wedge \mu_{RE}(y))])$
6. $V'_6 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{PO}(x) \wedge \mu_{RE}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{ME}(x) \wedge \mu_{RE}(y))])$
7. $V'_7 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{NE}(x) \wedge \mu_{AL}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{AV}(x) \wedge \mu_{AL}(y))])$
8. $V'_8 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{CE}(x) \wedge \mu_{RE}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{AV}(x) \wedge \mu_{RE}(y))])$
9. $V'_9 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{PO}(x) \wedge \mu_{MI}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{AV}(x) \wedge \mu_{MI}(y))])$

Siguiendo este orden de ideas es necesario especificar que la conclusión que está dada en términos de conjuntos se obtiene mediante la agregación de los resultados obtenidos de cada una de las reglas descritas, por lo que el resultado difuso para el voltaje se define mediante la ecuación (5. 5)

$$\mu_{V'}(y) = \mu_{V'_1} \vee \mu_{V'_2} \vee \mu_{V'_3} \vee \mu_{V'_4} \vee \mu_{V'_5} \dots \mu_{V'_{12}} \quad (5. 5)$$

Del mismo modo que el caso anterior, se tienen un conjunto de reglas para delimitar el *gap* presente en el proceso. Éste al igual que el parámetro de voltaje es aproximado mediante un razonamiento denotado por 9 reglas que a continuación se presentan.

1. $V'_1 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{NE}(x) \wedge \mu_{LE}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{IN}(x) \wedge \mu_{LE}(y))])$
2. $V'_2 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{CE}(x) \wedge \mu_{NO}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{IN}(x) \wedge \mu_{NO}(y))])$
3. $V'_3 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{PO}(x) \wedge \mu_{CR}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{PO}(x) \wedge \mu_{CR}(y))])$
4. $V'_4 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{NE}(x) \wedge \mu_{LE}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{ME}(x) \wedge \mu_{LE}(y))])$
5. $V'_5 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{CE}(x) \wedge \mu_{NO}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{ME}(x) \wedge \mu_{NO}(y))])$
6. $V'_6 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{PO}(x) \wedge \mu_{CR}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{ME}(x) \wedge \mu_{CR}(y))])$
7. $V'_7 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{NE}(x) \wedge \mu_{LE}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{AV}(x) \wedge \mu_{LE}(y))])$
8. $V'_8 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{CE}(x) \wedge \mu_{NO}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{AV}(x) \wedge \mu_{NO}(y))])$
9. $V'_9 = (\forall_x [\mu_{E'}(x) \wedge (\mu_{PO}(x) \wedge \mu_{CR}(y))]) \wedge (\forall_x [\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_{AV}(x) \wedge \mu_{CR}(y))])$

Finalmente, la conclusión del *gap* existente en el proceso está definida mediante la agregación de las reglas anteriormente descritas, delimitando la función de membresía representada por la ecuación (5. 6).

$$\mu_{G'}(y) = \mu_{G'_1} \vee \mu_{G'_2} \vee \mu_{G'_3} \vee \mu_{G'_4} \vee \mu_{G'_5} \dots \mu_{G'_{12}} \quad (5. 6)$$

5.7 Método de defuzzificación

A diferencia de los métodos clásicos de control convencional, los sistemas basados en lógica difusa de tipo Mamdani generan como resultado de la conclusión un conjunto difuso. En consecuencia, para realizarse la interpretación en los sistemas numéricos es necesario aplicar un método de defuzzificación, el cual se encarga de transformar los datos difusos en valores reales que un sistema es capaz de interpretar (Altas, 2017). Para el caso particular de estudio, es aplicado un método de defuzzificación “*Centroide*”, el cual interpreta el conjunto de salida como una distribución de masa, estableciendo el parámetro de salida según la ecuación (5. 7).

$$\bar{x}(\tilde{A}) = \frac{\int_m^n x \mu_{\tilde{f}}(x) dx}{\int_m^n \mu_{\tilde{f}}(x) dx} \quad (5. 7)$$

Donde m y n son el intervalo de integración, $\mu_{\tilde{f}}$ la pertenencia de la función de salida \bar{x} de la literal x .

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Caracterización de PECM con corriente bipolar

Con base en la ventana de corriente obtenida en la sección 5.2, se diseñó una serie experimental para identificar los resultados de maquinarse sobre la pieza de trabajo por un lapso correspondiente a una ventana de 20 mA, tomando en cuenta los dos enfoques de pulsos unipolares y bipolares, y así, validar la hipótesis descrita en la literatura con relación a la disminución del efecto de sobre corte.

En este orden de ideas se describe a continuación el conjunto de parámetros utilizados en la experimentación de cada método:

Tabla 6. 1. Configuración de parámetros para la experimentación del proceso PECM

Variable	Pulsos Unipolares	Pulsos Bipolares
Frecuencia	Intervalos de 20k unidades en el rango de 20-100 kHz	
Amplitud de pulso de desgaste	5V	
Electrolito	H_2O con una concentración en masa de 16.6% de NaCl	
Material de trabajo	Acero AISI 1018 con una composición química de 0.14 - 0.2 C, 0.6 - 0.9 Mn, Fe balance (% peso)	
Electrodo	Estructura tubular de acero con un diámetro de 603 μm	
Distancia inicial	240 μm	
Ciclo de trabajo	50 %	
Relación de pulsos bipolares	N/A	12:1
Amplitud de pulso bipolar	N/A	3 V

Los resultados obtenidos con relación al fenómeno de sobre corte obtenidos mediante la caracterización con pulsos convencionales y pulsos bipolares son descritos mediante la Figura 6. 1 que es presentada a continuación:

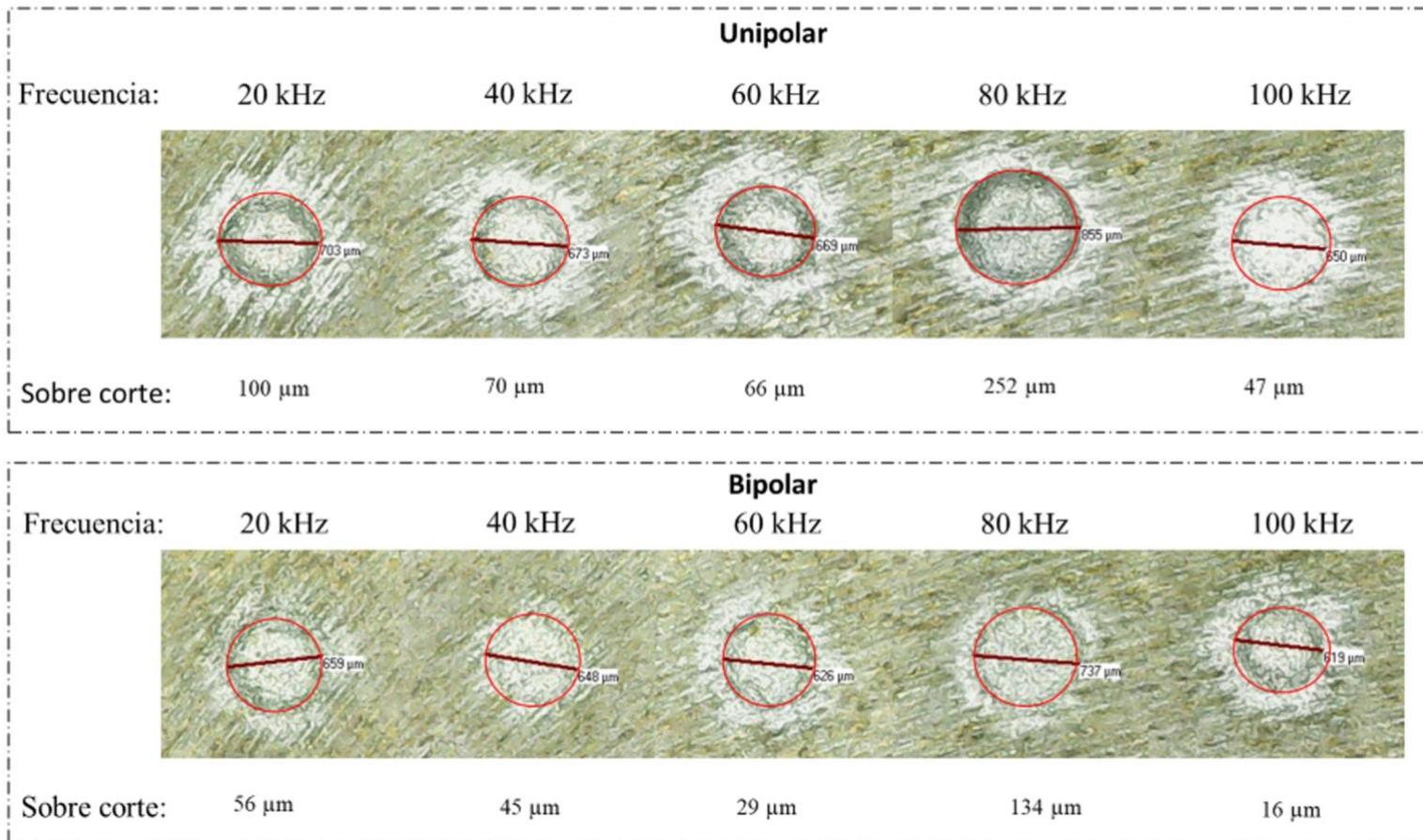


Figura 6. 1. Efecto de sobre corte observado en la caracterización con los diferentes métodos de polarización

Como es observado en la Figura 6. 1 el diámetro de sobre corte utilizando pulsos bipolares decreta considerablemente en la mayoría de las frecuencias estudiadas confirmando la hipótesis descrita en la literatura.

6.2 Identificación de frecuencia de trabajo

Una vez verificados los beneficios de la aplicación de pulsos bipolares se presenta en la siguiente sección el procedimiento para determinar la frecuencia de trabajo ideal que permite la obtención de resultados con mayor precisión y menor efecto de sobre-corte utilizando el nuevo enfoque bipolar. Los parámetros utilizados para esta experimentación son listados a continuación:

1. Intervalos de frecuencia cada 20 kHz en el rango de 20-100 kHz.
2. Amplitud de pulso 5 V.
3. Tiempo de exposición 60 s.
4. Electrolito compuesto por H_2O y una concentración en masa de 16.6% de NaCl con una resistividad eléctrica de $4.76 \Omega \cdot \text{cm}$
5. Pieza de trabajo de acero AISI 1018 con una composición química de 0.14 - 0.2 C, 0.6 - 0.9 Mn, Fe balance (% peso).
6. Electrodo hueco de acero con un diámetro externo de 603 μm .
7. Distancia inicial inter-electrodos de 240 μm .
8. Ciclo de trabajo 50 %
9. Relación de pulsos bipolares 12:1
10. Amplitud de pulso bipolar 3 V

Partiendo de la premisa de menor efecto de sobre corte observada en la Figura 6. 1 con el método de corriente bipolar sobre la técnica de maquinado convencional por pulsos, es como se delimita la experimentación que a continuación se describe.

Se definieron un total de 3 rondas experimentales con cada intervalo de frecuencia para discutir los efectos presentes en el maquinado final. El experimento consistió en exponer la herramienta de trabajo sobre la pieza metálica de prueba durante un periodo de tiempo de 60 segundos

Por otra parte, cabe destacar que las cuantificaciones de relevancia para la ronda experimental están compuestas por los siguientes parámetros:

1. Corriente inicial
2. Efecto de sobre corte
3. Tasa de remoción de material
4. Profundidad de maquinado

Posteriormente a la realización de la experimentación fue aplicado un estudio estadístico a los datos obtenidos de las pruebas experimentales para analizar la dispersión de los datos con respecto a su media, observando la variabilidad de cada prueba. En este sentido, se presenta la gráfica de la Figura 6. 2 en la cual se aprecia la media de corriente inicial obtenida en cada serie experimental, así como la desviación estándar entre cada repetición.

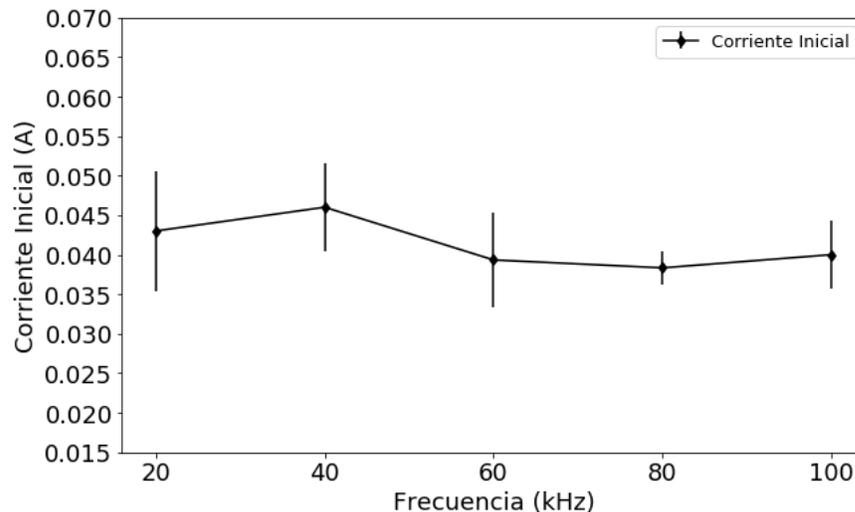


Figura 6. 2. Promedio de corriente inicial observada en la experimentación con su respectivo error en la dispersión de los datos.

Un aspecto que se observa en la Figura 6. 2 es que la media de corriente inicial en la mayoría de las frecuencias se establece en un intervalo de 0.039 a 0.046 mA, con una dispersión mayor de 0.0075 mA en el intervalo de frecuencia de los 20 kHz y una menor en los 80 kHz de 0.002 mA, pero así mismo es el parámetro que menor corriente inicial refleja. No obstante, se observa una ligera tendencia al establecimiento de corriente a un mínimo local debido a la cercanía de la media observada en cada uno de los ensayos visualizados.

En adición a lo anterior, se presenta en la gráfica de la Figura 6. 3 el comportamiento observado en las mediciones del efecto de sobre corte en los maquinados finales, visualizando que el intervalo con mayor precisión corresponde a la frecuencia de 60 kHz, con tan solo una variación promedio de 15.71 μm . Por lo contrario, en las frecuencias de 20 y 80 kHz existe una dispersión mayor de 60.62 μm y 51.42 μm respectivamente, dificultando la estimación de una tendencia en relación de la corriente inicial con respecto al efecto de sobre corte.

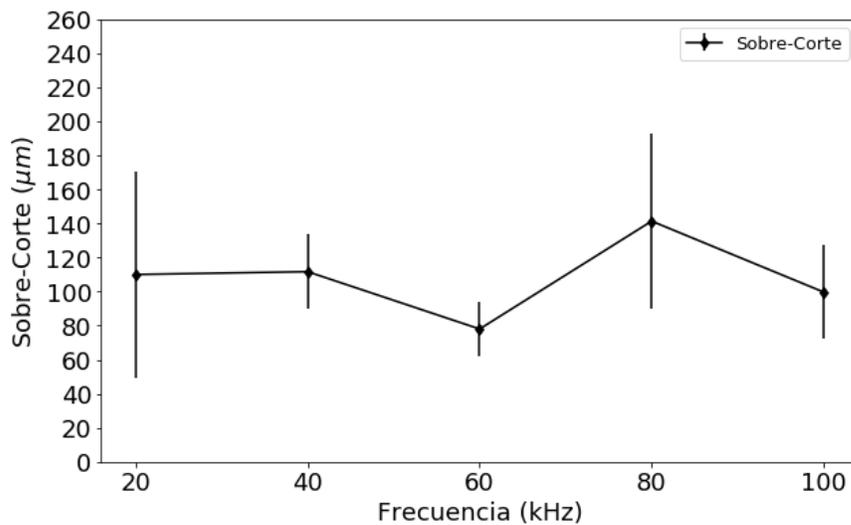


Figura 6. 3. Dispersión del efecto de sobre corte con respecto a la media de los datos obtenidos.

Con relación a la profundidad obtenida en cada maquinado se presenta la gráfica de la Figura 6. 4, en la cual se observa que la frecuencia con mayor desgaste vertical corresponde a los 40 kHz, con una diferencia en la media de 5 μm con respecto a 20 kHz. Además, es visualizado un comportamiento descendente a partir de las frecuencias de los 60 kHz, visualizando un ligero cambio decreciente en la profundidad conforme la frecuencia incrementa. Por otra parte, la menor dispersión es ubicada en los 40 kHz, seguida de 60 y 100 kHz, dejando atrás a los 80 donde se establece la peor dispersión de los datos obtenidos.

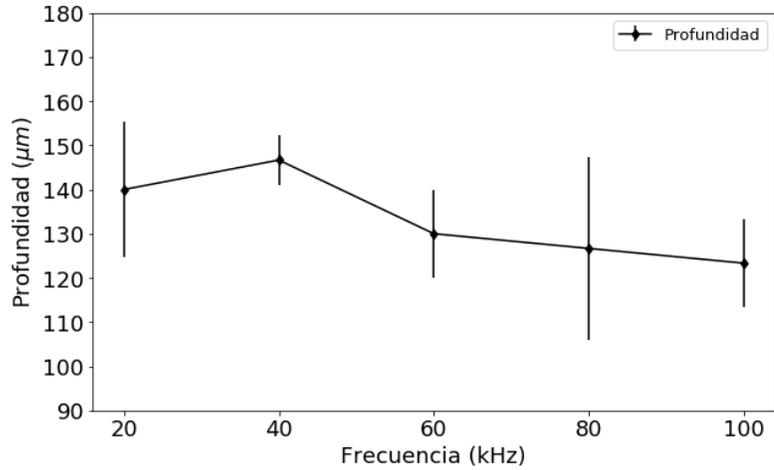


Figura 6. 4. *Dispersión de los datos de profundidad con respecto a la media.*

Una vez cuantificada la profundidad y la relación del diámetro final de maquinado generado, es posible estimar el valor del volumen de material retirado sobre la pieza de trabajo, el cual es aproximado mediante la ecuación número (6. 1).

$$\text{Volumen} = \left(\pi * \left(\frac{\text{Diámetro resultante}}{2} \right)^2 \right) * \text{profundidad resultante} \quad (6. 1)$$

De este modo sustituyendo en (6. 1) se calcula la media del volumen removido en las series experimentales, observando los resultados en el diagrama de la Figura 6. 5.

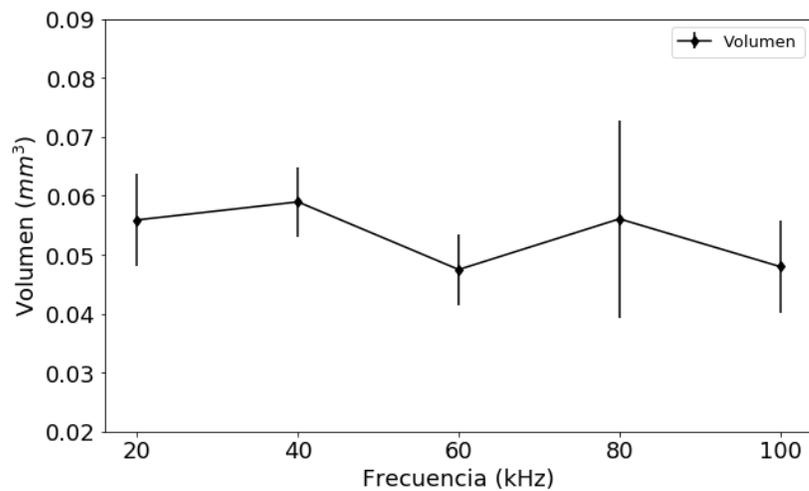


Figura 6. 5. *Dispersión del volumen con respecto a la media de los resultados obtenidos.*

Tal como se observa en la Figura 6. 5, el volumen desgastado en las frecuencias de 60 y 100 kHz es menor al observado en el resto de los intervalos con una media de 0.05 mm^3 , sin embargo, esta dependencia está estrechamente relacionada con las dimensiones del diámetro de sobre corte, ya que en esos valores se obtuvo mayor precisión y menor desgaste lateral en los resultados y por consecuencia se reflejará un menor volumen de material removido. De la misma manera, se visualiza una dispersión de los datos aproximada a la media con un rango de valores en el intervalo de $0.004\text{-}0.007 \text{ mm}^3$ con excepción de la frecuencia de 80 kHz donde existe una dispersión de 0.014 mm^3 , la cual representa una mayor dispersión con respecto a su media.

Por otra parte, se observó que durante el proceso de remoción de material existe un punto en el tiempo donde el descenso de corriente se interrumpe. Este comportamiento está relacionado con el incremento de la distancia inter-electrodos, el cual aumenta con relación al desgaste de material, por lo cual se estima que alrededor de los 13 mA la remoción de material se lleva a cabo con mayor lentitud. No obstante, es identificado que la interrupción gradual de corriente no ocurre en el mismo intervalo de tiempo para todas las frecuencias, lo cual se puede observar en las siguientes graficas.

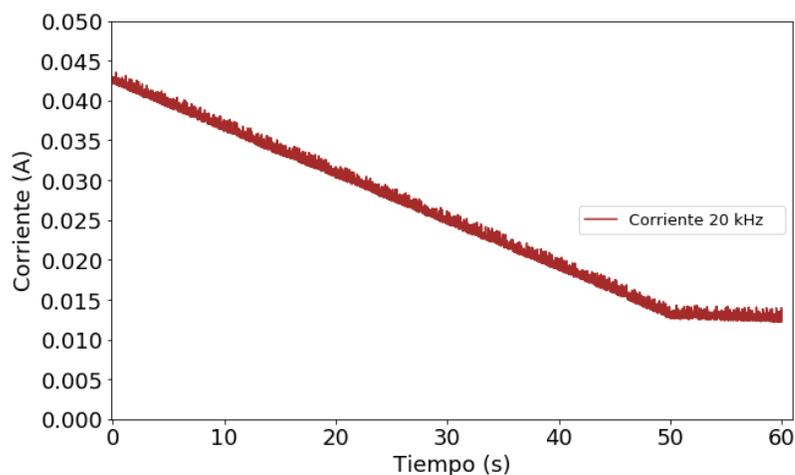


Figura 6. 6. Corriente RMS de maquinado observada en la frecuencia de 20 kHz.

Partiendo de los datos de la Figura 6. 6 se estima que el descenso de la corriente a los 20 kHz sufre una desaceleración notoria alrededor de los 50 segundos, comportamiento

relacionado con el incremento de la distancia inter-electrodos y a su vez, con el decremento en la remoción de material.

Por otra parte, en cuanto al intervalo de los 40 kHz se identificó lo descrito en la Figura 6. 7.

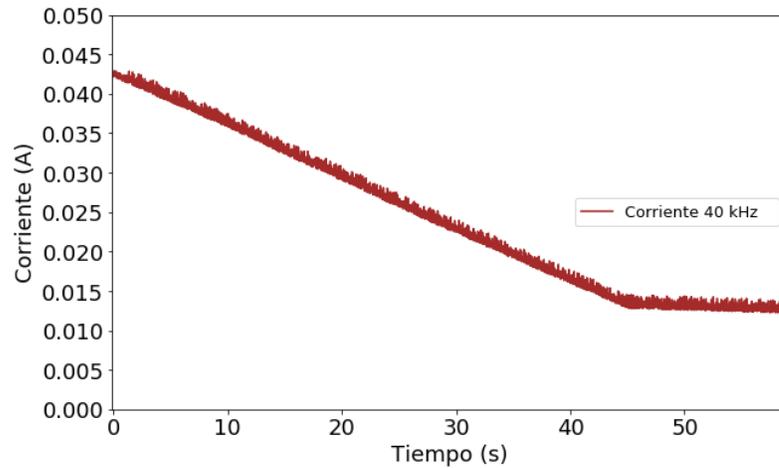


Figura 6. 7. Corriente RMS de maquinado observada en la frecuencia de 40 kHz.

Con relación a lo observado en la figura anterior se visualiza que la desaceleración de la corriente en la frecuencia de 40 kHz se inicializa en un tiempo estimado de 45 segundos. Si se contrasta con el intervalo de los 20 kHz se obtiene una diferencia de 5 segundos, lo que permite deducir que la remoción de material se realizó con mayor velocidad a los 40 kHz. Una tendencia similar es identificada en el intervalo de los 60 kHz, donde el tiempo de cambio en el comportamiento de la corriente se establece a los 46 segundos como se observa en la Figura 6. 8.

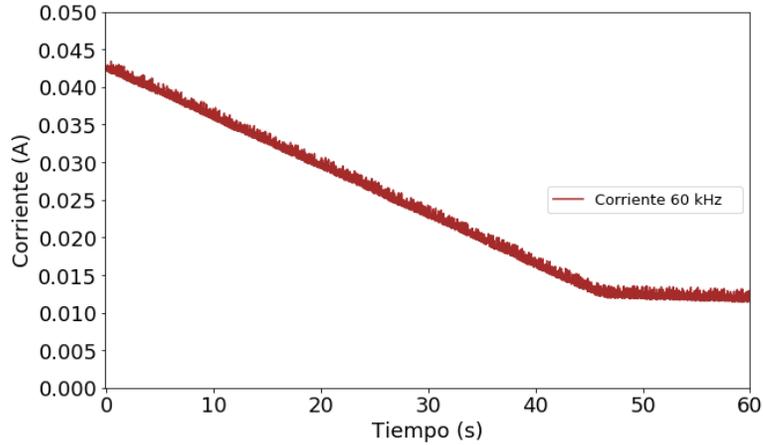


Figura 6. 8. Corriente RMS de maquinado observada en la frecuencia de los 60 kHz.

Por otro lado, en las frecuencias restantes correspondientes a los 80 y 100 kHz es necesario un mayor tiempo para identificar el cambio de comportamiento de la corriente, estableciéndose en el segundo 55 como se visualiza en la Figura 6. 9.

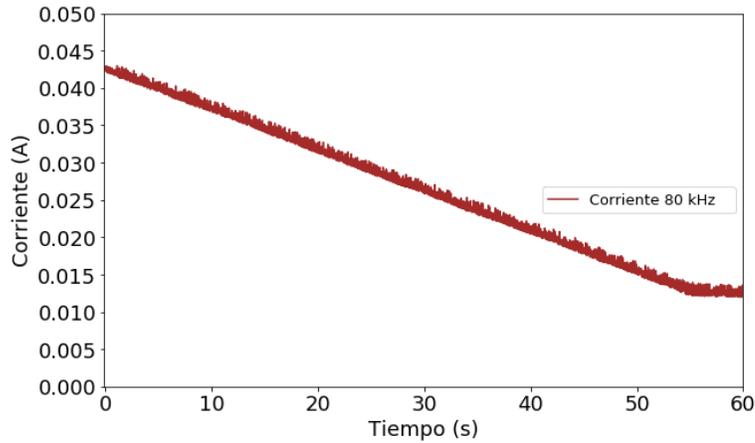


Figura 6. 9. Corriente RMS de maquinado observada en la frecuencia de los 80 kHz.

Finalmente, en el caso de la frecuencia correspondiente a 100 kHz se presenta el mismo fenómeno en el segundo 57, siendo el criterio que requiere mayor tiempo para observar este fenómeno. Esto es ilustrado mediante la gráfica de la Figura 6. 10.

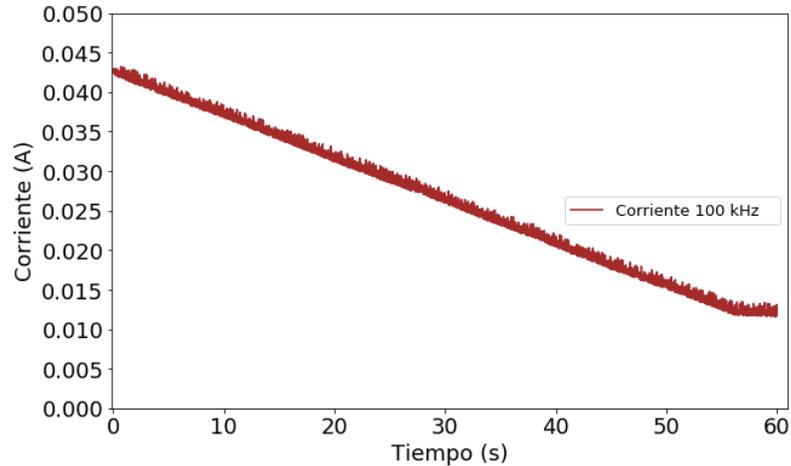


Figura 6. 10. Corriente RMS de maquinado observada en la frecuencia de los 100 kHz.

Con base en el análisis de los resultados se determinó que los rangos de frecuencia de 40 y 60 KHz son las frecuencias con mayor velocidad de remoción de material. Sin embargo, dentro de estos dos parámetros el segundo presenta menor efecto de sobre corte y un desgaste vertical promedio, por lo cual el parámetro de 60 KHz es seleccionado como frecuencia de trabajo para el proceso de maquinado electroquímico por pulsos con una relación de pulsos negativos de 12:1.

6.3 Documentación experimental para establecimiento de los conjuntos difusos

Para comenzar con el diseño de los conjuntos difusos se realizó el análisis de la pendiente de corriente para comprender el comportamiento de esta variable mediante la ejecución de un maquinado de 100 μm de profundidad, utilizando la frecuencia seleccionada y la configuración de parámetros descritos en la sección 6.2. Sin embargo, a diferencia del apartado anterior es tomado como criterio de ajuste de la herramienta el descenso de la corriente correspondiente a un paso del sistema mecánico obtenido en la sección 5.2, el cual es igual a un cambio aproximado de 20 mA en la intensidad detectada. En este sentido, al término del maquinado fue obtenida una perforación de 160 μm de profundidad y un diámetro de 775 μm como el que se visualiza en la Figura 5. 21.

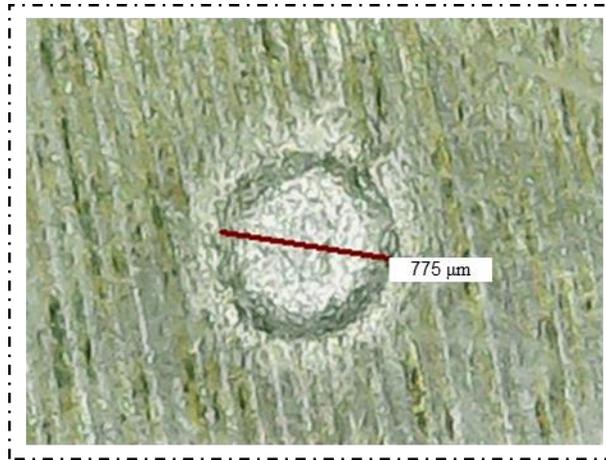


Figura 5. 21. Perforación resultante para la obtención de un maquinado de $100\ \mu\text{m}$ de profundidad movilizanddo el electrodo cada decremento de corriente de $20\ \text{mA}$.

Con base en la profundidad cuantificada en el maquinado resultante se observa que existe un excedente de $60\ \mu\text{m}$ sobre el parámetro establecido inicialmente. Para determinar las circunstancias de este resultado se presenta en la Figura 6. 11 la gráfica de la corriente de maquinado detectada para el experimento descrito.

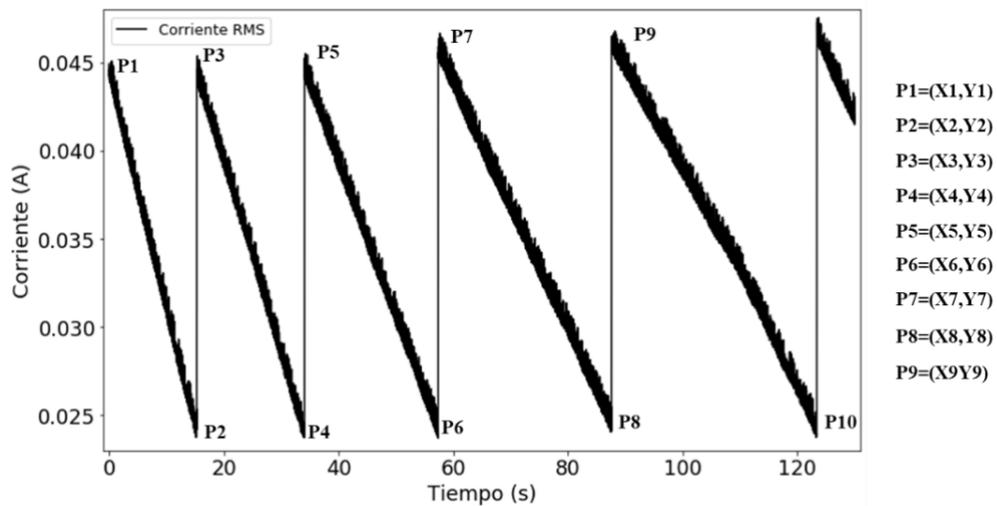


Figura 6. 11. Corriente RMS detectada en maquinado de $100\ \mu\text{m}$ tomando como parámetro de ajuste una ventana de corriente de $20\ \text{mA}$.

Tal como se visualiza en la gráfica de la figura anterior la corriente de maquinado descende desde la corriente inicial detectada hasta realizar un ajuste de $20\ \mu\text{m}$ cuando se observa un decremento de $20\ \text{mA}$. En cada limite donde se registra el cambio de corriente

abrupto ocasionado por la movilización del electrodo se estableció un punto de interés, el cual posteriormente es utilizado para analizar el comportamiento de esta variable mediante la obtención de su pendiente. Este nuevo valor permite analizar la razón con la cual va cambiando conforme se realiza el desgaste de material. Derivado de esto en la gráfica de la Figura 6. 12 se presentan las pendientes registradas durante cada uno de los ajustes realizados para el maquinado de prueba.

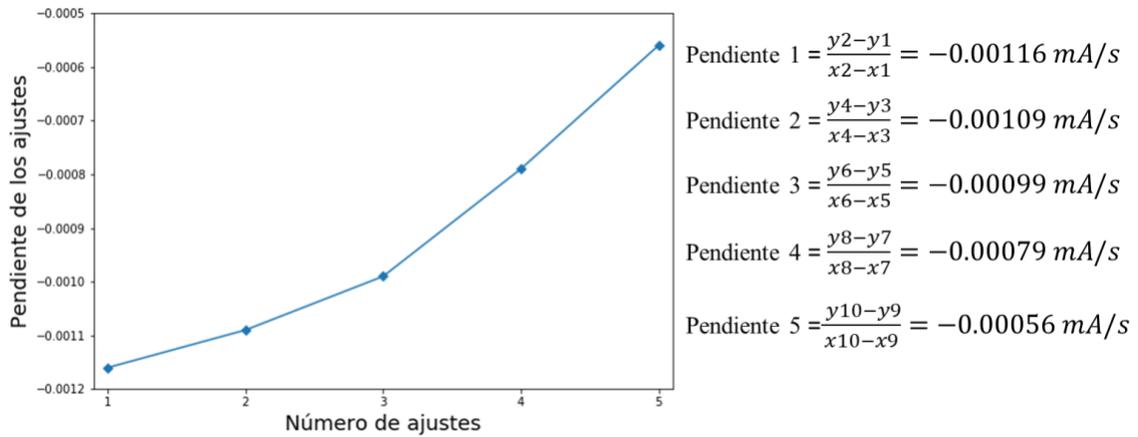


Figura 6. 12.. Comportamiento de la corriente de maquinado descrito por la pendiente en 5 ajustes.

Partiendo del comportamiento descrito en la gráfica de la figura anterior se observa que se requiere cada vez más tiempo para realizar el ajuste por la pérdida de la corriente establecida conforme avanza el maquinado, lo que es posible interpretarse como una diferencia en la velocidad de remoción. De igual manera, la desigualdad en la magnitud de este parámetro es provocado a consecuencia de la inconsistencia para mantener la distancia inter-electrodos lo más cercano a la distancia inicial, lo que significa que si es asegurada una pendiente constante es posible aseverar que tanto la remoción como la distancia inter-electrodos prevalecerá lo más aproximado al valor inicial. Por lo tanto, con el fin de delimitar un margen de error por el cual la pendiente de corriente puede establecerse como aceptable en función de un cambio significativo en su comportamiento fue como se delimito que la remoción de material es válida mientras no presente un cambio superior al 15 % del valor detectado inicialmente, el cual es igual a -0.00133 mA/s para cuando la remoción se realiza de manera acelerada y -0.00098 mA/s para cuando la velocidad de remoción comienza a visualizarse con mayor lentitud.

Por otra parte, la segunda variable de interés es el voltaje, por lo cual son considerados los avances reportados en (Xu, et al., 2017) y (Chen, et al., 2018) para la definición de los conjuntos difusos. Según las investigaciones reportadas es relacionado el voltaje de polarización con la precisión de maquinado y el efecto de sobre corte. Tomando en consideración lo anteriormente planteado se presenta la configuración de los parámetros seleccionados para la ejecución de pruebas experimentales como se muestra en la Tabla 6. 2 .

Tabla 6. 2. Parámetros de experimentales para la definición de conjuntos difuso

Variable	Magnitud
Amplitud de pulso (V)	3-5-7
Frecuencia (kHz)	60
Electrolito	H_2O y NaCl en 16.6% masa
Material de trabajo	AISI 1018
Dimensiones de electrodo (Diámetro μm)	603
<i>Gap</i> inicial (μm)	240
Ciclo de trabajo (%)	50
Amplitud de pulso bipolar (V)	3
Relación de pulsos bipolares	12:1

Como se observa en la Tabla 6. 2 los experimentos están clasificados mediante la aplicación de voltajes con una amplitud de pulso de 3, 5 y 7 V, lo cual permite analizar la relación del efecto de sobre corte, así como la precisión de maquinado final. Aunado a esto, es empleada la estimación de la pendiente de corriente para la movilización del electrodo correspondiente a una resolución del sistema mecánico cada vez que exceda un umbral del 15 % de la pendiente inicial, finalizando una vez que el descenso del prototipo sea igual al definido inicialmente para el experimento. Los parámetros monitoreados son la corriente y el voltaje de maquinado, para finalmente obtener las mediciones de profundidad y diámetro, lo cual permite estimar otras variables de interés como MRR, volumen y efecto de sobre corte.

Así pues, la prueba número 1 consistió en realizar un maquinado sobre la pieza de trabajo hasta alcanzar una profundidad aproximada de $80\ \mu\text{m}$, la cual es equivalente a un descenso del sistema mecánico de 4 pasos y finalizando según el esquema de la Figura 6. 13.

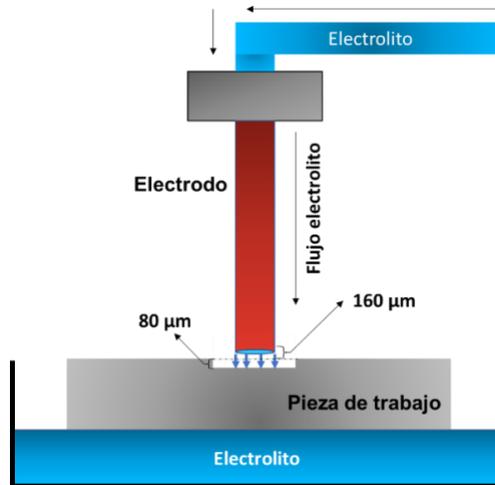


Figura 6. 13. Análisis de datos del proceso PECM en la prueba experimental número 2.

Como es visto hasta ahora, el área de exposición en este experimento es mantenida igual a la inicial debido a que la herramienta de trabajo no ha descendido lo suficiente para que las caras laterales tengan efecto en la dispersión de la corriente. Esto sucede durante la prueba ilustrada mediante la Figura 6. 14 donde la profundidad deseada para el experimento se define en los $160\ \mu\text{m}$.

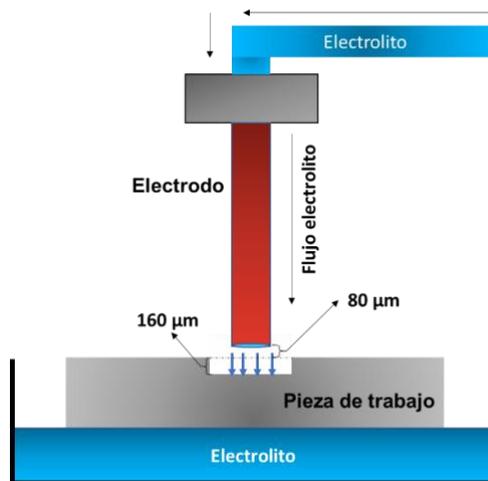


Figura 6. 14. Maquinado con una profundidad de $160\ \mu\text{m}$ y un área de exposición inicial.

Finalmente, en el diagrama de la Figura 6. 15 se observa el experimento donde el electrodo se mantiene al límite de la superficie de la pieza de trabajo, es decir, se encuentra en el punto límite antes de incrementar el área de exposición debido a la influencia de la superficie lateral.

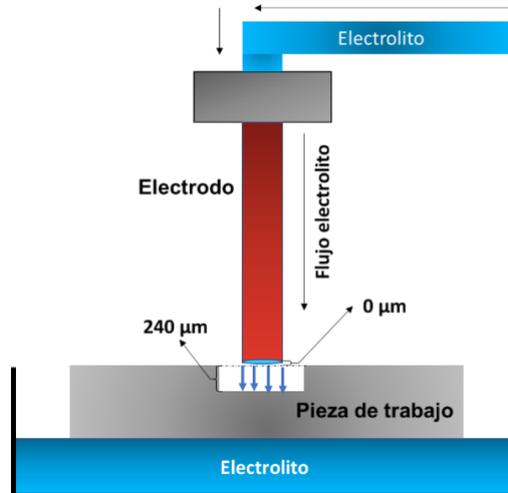


Figura 6. 15. Diagrama del experimento con una profundidad deseada de 240 μm y un área de exposición inicial en el límite de la superficie de la pieza de trabajo.

Para la siguiente prueba experimental es calculada el área de exposición total sobre la pieza de trabajo mediante la ecuación (5. 2), finalizando según el criterio visualizado en el diagrama de la Figura 6. 16.

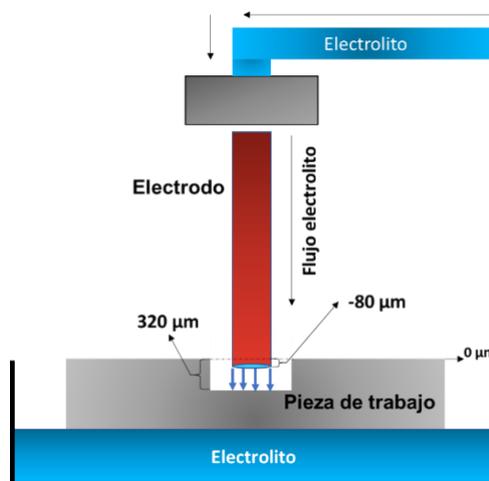


Figura 6. 16. Incremento del área de exposición del electrodo al descender mayor profundidad que el gap inicial.

Como se observa en la Figura 6. 16, el electrodo ha descendido $80\ \mu\text{m}$ por debajo de la superficie superior de la pieza, por lo que la profundidad del maquinado final debe ser la suma de la distancia entre electrodos inicial más la magnitud de la superficie lateral que se ha expuesto en la herramienta, dando un valor de $320\ \mu\text{m}$.

Para culminar con los experimentos denotados por la configuración planteada se realiza 1 medición más, cuando la altura de la superficie lateral expuesta del electrodo ha alcanzado un total de $160\ \mu\text{m}$, estimando una profundidad de maquinado deseada de $400\ \mu\text{m}$ como se observa en la Figura 6. 17.

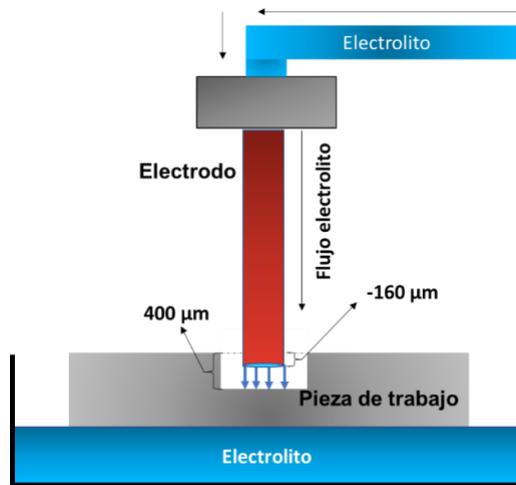


Figura 6. 17. Estado final para la prueba de maquinado con una profundidad de $400\ \mu\text{m}$.

La serie de experimentos descritos fueron realizados para las tres escalas de polarización establecidas en la Tabla 6. 2 obteniendo los resultados que a continuación se describen.

Para el caso donde la profundidad esperada es de $80\ \mu\text{m}$ se obtuvo la corriente de maquinado correspondiente a cada voltaje como se visualiza en la Figura 6. 18.

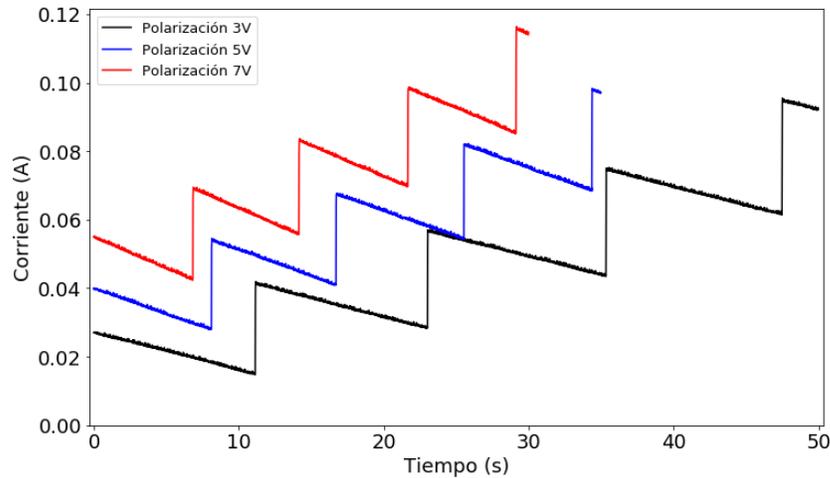


Figura 6. 18. Corriente de maquinado detectada para un descenso de 80 μm con voltajes de polarización de 3, 5 y 7 volts.

Para empezar, se observa en la gráfica de la figura anterior que el tiempo de maquinado para cada nivel de tensión es diferente, terminando en un estimado de 30 segundos para el caso de 7 V, 35 segundos para 5 V y 50 segundos en el criterio con menor polarización. Este comportamiento es generado por la diferencia en la magnitud de corriente observada en cada criterio, vislumbrando una relación de menor tiempo de maquinado para el experimento con una intensidad de 57 mA establecida por el parámetro de mayor voltaje y finalizando según lo descrito anteriormente. Agregado a lo anterior es notorio que el descenso de la corriente para cada uno de los experimentos se realiza de manera gradual desde el inicio del proceso hasta alcanzar un punto en el tiempo donde el electrodo es movilizado por primera ocasión, esto es realizado a consecuencia de un cambio significativo mayor al 15 % de la pendiente inicial calculada por el sistema, lo cual es utilizado para aproximar un proceso de remoción de material constante al mantener el *gap* lo más cercano a la distancia inicial (Gallegos Miranda, 2019). En este sentido, se establece que los cambios en el comportamiento de esta variable se deben al incremento de la distancia entre electrodos provocado por el desgaste de material, proyectando así el primer desplazamiento de la herramienta a consecuencia del sobrepaso del umbral de distanciamiento permitido para este prototipo, el cual es igual a la sumatoria del *gap* inicial y una resolución del sistema mecánico, es decir, excede una distancia de 260 μm . Un comportamiento similar es visible durante gran parte de las pruebas, no obstante, con

forme es aumentada la profundidad de maquinado y el efecto del área de exposición lateral se hace presente, observando una tendencia exponencial en la intensidad detectada, vislumbrándose como se presenta en la Figura 6. 19..

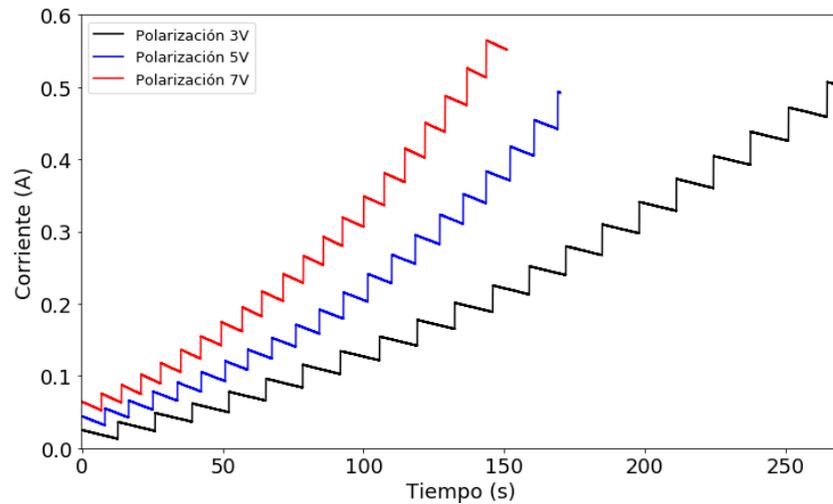


Figura 6. 19. Corriente de maquinado detectada para un descenso de 400 μm con voltajes de polarización de 3, 5 y 7 V.

Los tiempos observados para los maquinados con una profundidad de 400 μm también presentan discrepancias, finalizando en el segundo 149 para la polarización con 7 V, 175 segundos para la polarización con 5 V y 225 segundos para la menor tensión. Además, hay que matizar que, aunque en la corriente eléctrica presente este comportamiento la pendiente se mantiene desde el inicio hasta el término del maquinado. En consecuencia, se observan un número de ajustes del electrodo con este comportamiento hasta alcanzar la profundidad estipulada inicialmente. Este argumento es analizado mediante la obtención del error en la profundidad final para cada maquinado de prueba como se observa en la Figura 6. 20.

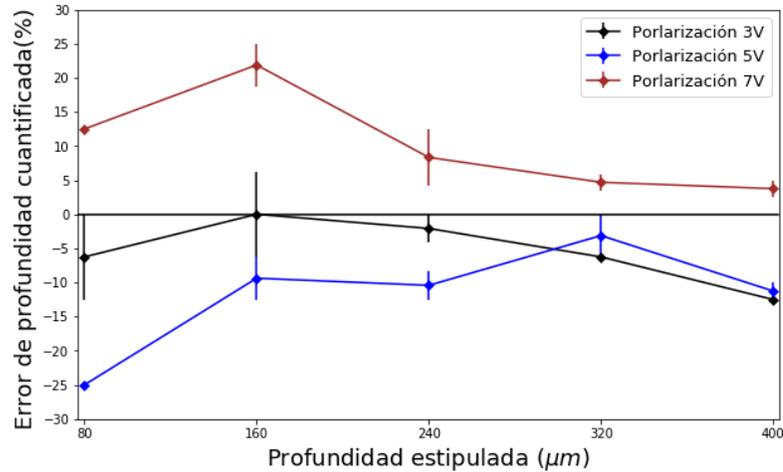


Figura 6. 20. Porcentaje de error en la profundidad cuantificada para cada ensayo de prueba.

Según las mediciones de profundidad realizadas para cuando el área de exposición es la inicial, el parámetro de tensión con menor error es el criterio de 3 V. Sin embargo, al verse afectado por el incremento del área lateral y el cambio de corriente para los ensayos de 320 y 400 μm el error disminuye para los voltajes con mayor magnitud, e incrementa para el de menor tensión. La imprecisión resultante para alcanzar la profundidad deseada en estos casos se relaciona con el incremento del área de exposición total, ya que al descender el electrodo en una magnitud de 160 μm bajo la superficie de la pieza de trabajo es generada una dispersión de la corriente por el área lateral de la herramienta, y en consecuencia la des focalización de la intensidad eléctrica únicamente por la superficie inferior, lo que contribuye a la errónea obtención de la profundidad estipulada por medio de la pendiente de corriente, siendo insuficiente la velocidad de remoción generada por parte de los parámetros de tensión de 3 y 5V, que por el caso contrario el criterio de 7V obtiene una profundidad válida alrededor de una media de 410 μm . Sin embargo, toda medición del error menor o igual a 20 μm se considera aceptable tomando en cuenta que este parámetro es equivalente a la resolución del sistema mecánico por medio de la cual se moviliza el electrodo. Agregado a lo anterior, estos resultados son analizados mediante la observación de la tasa de remoción de material para cada ensayo descritos en la gráfica de la Figura 6. 21.

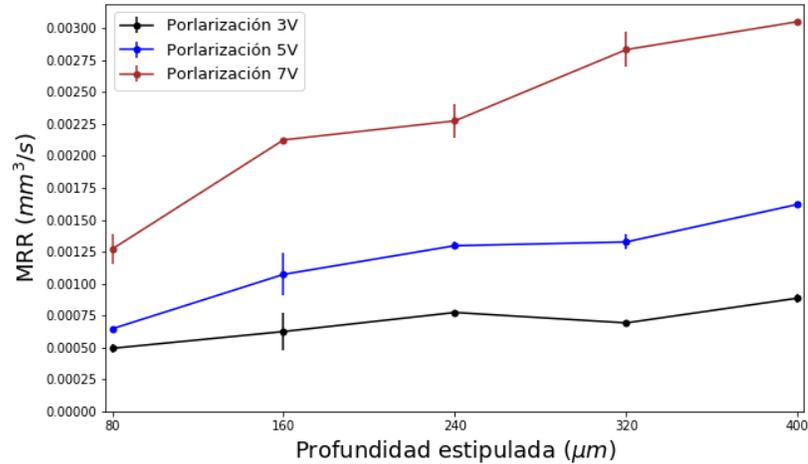


Figura 6. 21. Dispersión identificada del MRR promedio en cada experimento.

Tal como se observa, la remoción de material promedio con la polarización de 7 V es superior a la visualizada con los parámetros de 3 y 5 V, lo cual permite obtener la profundidad estipulada en los experimentos donde el área lateral está presente, ya que la dispersión de la corriente es compensada mediante el incremento de esta variable por medio del aumento de voltaje. Por lo tanto, si existe mayor transferencia de corriente se realizará mayor remoción de material a pesar de presentar dispersión de ésta por el área lateral del electrodo. Derivado de esto, conviene especificar que estos cambios en el incremento y decremento de la corriente al modificar el voltaje presentan una similitud a la relación establecida por la ley de Ohm, ya que al interferir la resistividad originada por el electrolito y una aplicación de tensión se genera una diferencia de potencial que permite la transferencia de intensidad eléctrica de un extremo a otro (Catarino Aguilar, 2017). En este sentido, si se realiza un cambio en la polarización se identificará un ajuste en la magnitud de la corriente detectada. No obstante, como es descrito en Gallegos (2019), al catalizar este proceso con pulsos eléctricos con frecuencias superiores a los 20 kHz, convierte esta relación en un fenómeno con mayor complejidad debido a la formulación de un esquema de resistencia-capacitor, pero que de la misma manera realiza cambios en la corriente transferida. Una vez establecidas estas circunstancias por las cuales la intensidad eléctrica sufre modificaciones, se establece que a pesar de obtener precisión en profundidades superiores a los 320 μm con una polarización de 7 V, no resulta conveniente emplearse para todo el proceso, ya que según el análisis del producto final es observada

una relación de efecto de sobre-corte mayor en los experimentos donde solo es expuesta la superficie inferior del electrodo. Esta singularidad se ve reflejada en el tiempo de maquinado, lo cual se detalla en la Figura 6. 22.

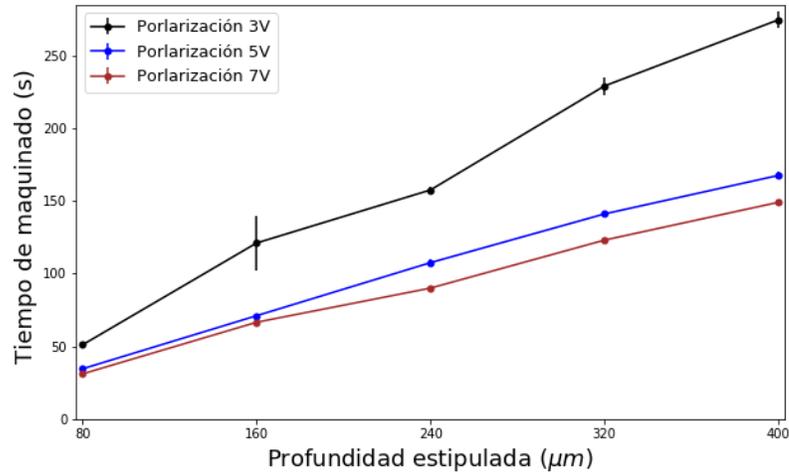


Figura 6. 22. *Dispersión promedio del tiempo de maquinado cuantificado para cada experimento estipulado.*

Según lo antes mencionado se puede notar un tiempo de maquinado mayor para la polarización de 3 V, incrementándose cada vez más conforme la profundidad es superior. Sin embargo, a pesar de ello en la tendencia del efecto de sobre corte no se vislumbra así, presentando menor relación de desgaste de material lateral para el parámetro con menor tensión como se presenta en la Figura 6. 23.

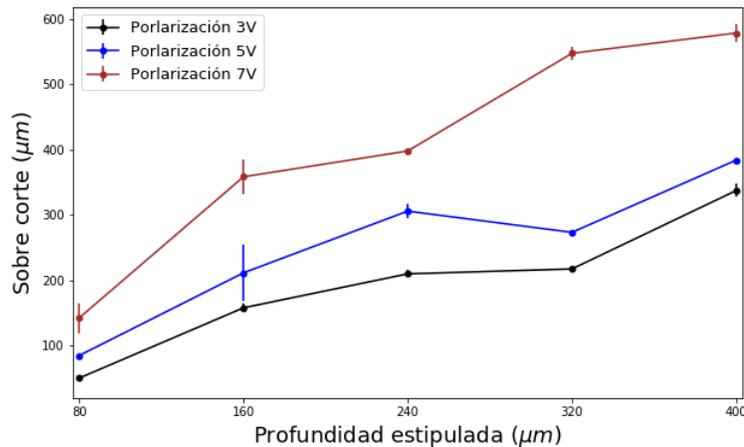


Figura 6. 23. *Dispersión del diámetro de sobre corte promedio observado en cada profundidad de maquinado estipulada.*

Según lo visto en la Figura 6. 23 el diámetro de sobre corte para la polarización con 3 V es menor a los obtenidos con 5 y 7 V a pesar del mayor tiempo requerido. No obstante, esto sugiere que el efecto de sobre corte excesivo en la tensión más alta se ocasionó por la exposición del electrodo por un lapso mayor, es decir, la distancia entre electrodos permitida superó el límite con mayor rapidez, exponiendo el electrodo por un tiempo mayor al requerido provocando mayor corte lateral.

6.4 Diseño de maquinados

En esta sección son descritos una serie de pruebas de maquinados para evaluar los criterios de desempeño correspondientes a la profundidad y el efecto de sobre corte obtenidos como resultado de la estimación del *gap* y el voltaje de polarización del proceso de PECM mediante un sistema de inferencia difuso de múltiples entradas y múltiples salidas. Son consideradas para estas pruebas la aplicación de perturbaciones físicas para analizar la respuesta ante cambios repentinos en el establecimiento de la distancia inter-electrodos y a su vez la delimitación del voltaje necesario para decrementar el efecto de sobre corte.

6.4.1 Especificaciones experimentales para maquinados lineales

Para comenzar, se realizaron una dupla de maquinados lineales con una longitud de 5 mm de largo por una profundidad de 240 y 400 μm estableciendo la pieza de trabajo paralelamente al electrodo sin presentar irregularidades significativas en la inclinación o en la superficie de trabajo como se visualiza en la Figura 6. 24. Aquí, se aprecia en términos generales las condiciones iniciales que posteriormente culminaran con el desgaste de material según los parámetros deseados.

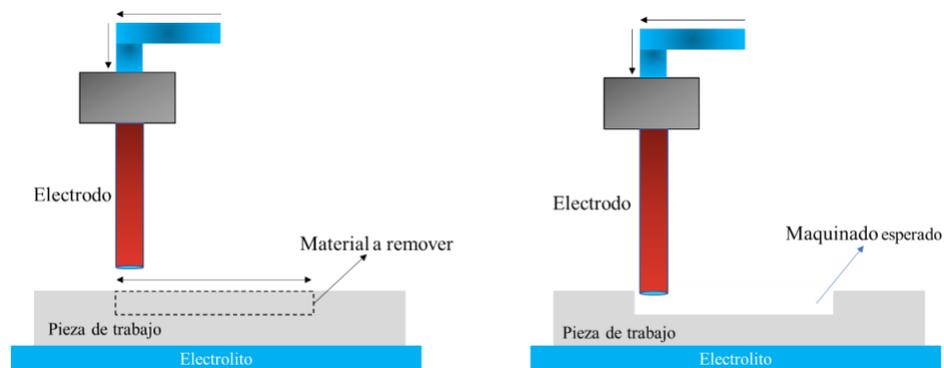


Figura 6. 24. Desgaste de material esperado al término del maquinado lineal sin perturbación.

26 una fotografía lateral y frontal de la pieza de trabajo donde se sitúa la perturbación de profundidad propuesta.

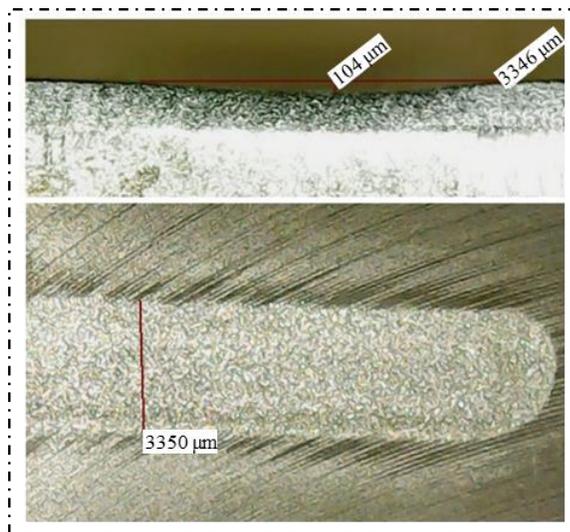


Figura 6. 26. Fotografía lateral y frontal de la perturbación sobre la superficie de trabajo obtenida con un microscopio digital ODAR63.

Por otra parte, como tercer criterio se planteó el desarrollo de dos maquinados lineales bajo las mismas condiciones de profundidad de 240 y 400 μm con una longitud de 5 mm. A diferencia de las pruebas anteriores el tipo de perturbación presentada al sistema consistió en establecer la pieza de prueba a una inclinación de 5° . Bajo este juicio se visualiza mediante el esquema de la Figura 6. 27 el principio de la perturbación de inclinación.

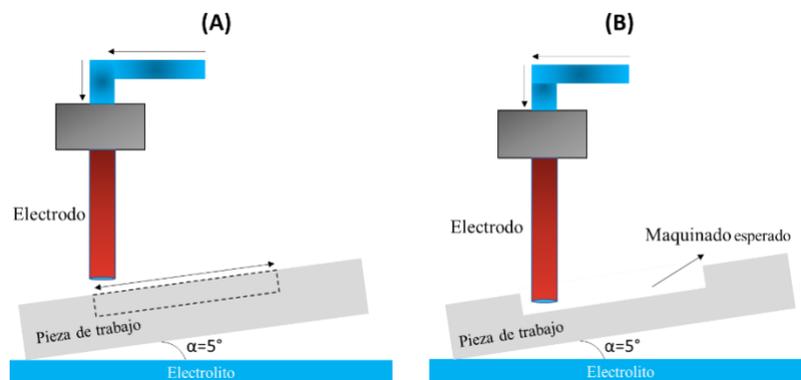


Figura 6. 27. (A) Condiciones iniciales en el maquinado lineal con una inclinación de la pieza de 5° y (B) Maquinado esperado al término del experimento.

Para los experimentos de la Figura 6. 27 al igual que los de la Figura 6. 25 se debe movilizar el electrodo según el *gap* estimado por el sistema difuso para regularlo a 240 μm como se establece inicialmente y modificar el voltaje según las reglas difusas para contribuir a obtener la profundidad deseada sin producir un efecto de sobre corte excesivo.

6.4.2 Criterios de desempeño

Los criterios de desempeño para la serie de maquinados son la profundidad y el efecto de sobre corte final. En este sentido son definidos un conjunto de puntos de interés mediante el esquema de la Figura 6. 28, donde son visualizadas las mediciones con las cuales se estimó el porcentaje de error en la profundidad y el efecto de sobre-corte promedio con respecto a los parámetros deseados.

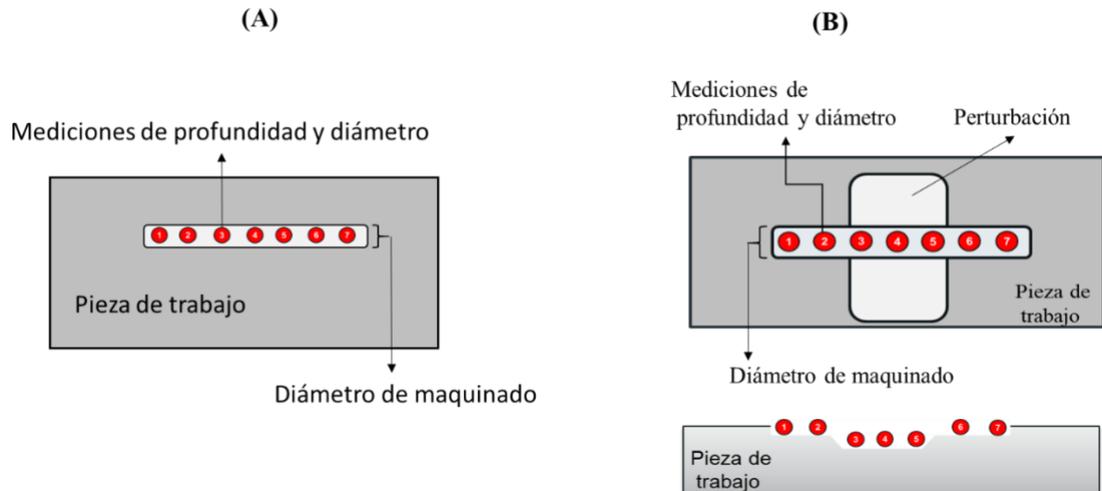


Figura 6. 28. Esquema general para la especificación de los puntos de medición de profundidad y diámetro de maquinado en desgaste sin perturbación (A) y con perturbación de profundidad (B).

Posteriormente al termino de los ensayos de prueba se presenta mediante la Tabla 6. 3 los porcentajes de error en la profundidad cuantificada para cada criterio propuesto. Dentro del porcentaje de error obtenido, merece la pena especificar que se establece un margen de error aceptable equivalente a una diferencia de 20 μm con relación a la profundidad deseada. Este parámetro es definido de esta manera con base en la resolución del sistema mecánico equivalente a esa magnitud. Por lo tanto, este parámetro de aceptación es calculado para cada experimento mediante la ecuación (6. 2)

$$mE = \frac{(e * 100)}{pr} \quad (6.2)$$

Donde mE es el porcentaje o margen de error aceptable, e la diferencia de la profundidad deseada (μm) y la cuantificada (μm) y pr , la profundidad de maquinado requerida (μm).

Tabla 6. 3. Porcentaje de error en profundidad cuantificada para cada uno de los experimentos propuestos.

N°	Tipo de perturbación	Profundidad Estipulada (μm)	Mediciones de profundidad (error %)							% de error aceptable
1	Sin perturbación	240	0	0	4.1	4.1	0	0	4.1	8.3
2	Sin perturbación	400	2.5	0	0	0	0	2.5	2.5	5
3	Profundidad (100 μm)	240	0	0	8.3	0	8.3	0	4.1	8.3
4	Profundidad (100 μm)	400	2.5	2.5	2.5	2.5	5	2.5	2.5	5
5	Inclinación $\alpha=5^\circ$	240	8.3	0	0	4.1	4.1	4.1	4.1	8.3
6	Inclinación $\alpha=5^\circ$	400	7.5	5	2.5	2.5	0	0	2.5	5

De acuerdo con los datos obtenidos en los maquinados que no presentan perturbaciones se observa un porcentaje de error del 4.1 y 2.5% respectivamente equivalente a +/- 10 μm . Por otra parte, para los experimentos lineales con la primera irregularidad de profundidad se percibe que la magnitud de desgaste de material es acorde a lo esperado, presentando un 8.3 % de error en los maquinados de 240 μm , y una diferencia máxima del 5 % para los ensayos de 400 μm . Mientras tanto, en los experimentos realizados con la pieza en un ángulo de inclinación de 5° se vislumbra un comportamiento similar al criterio anterior presentando un error máximo de 8.3 %. Sin embargo, para el caso donde se desea una profundidad de 400 μm se visualiza una medición en el extremo superior del canal con un error del 7.5 %, el cual presentó una profundidad de 370 μm , siendo la única medición que sobre pasa el error aceptable.

En cuanto al segundo discernimiento de desempeño se estimó el porcentaje promedio del diámetro de sobre corte con relación a las dimensiones del electrodo utilizado, el cual tiene 603 μm de longitud en su circunferencia externa. Por lo tanto, la relación promedio de este criterio es obtenido mediante la ecuación (6. 3).

$$ES = \sum_{i=1}^n \frac{\left(\frac{D_i - De}{n}\right) * 100}{De} \quad (6. 3)$$

Donde:

ES = Representa el diámetro de sobre corte promedio [μm]

D_i = El diámetro del maquinado en el punto de medición i [μm]

De = El diámetro exterior del electrodo [μm]

n = El número de muestras realizadas

Derivado de lo anterior, se presenta la Tabla 6. 4 con la media del porcentaje de sobre corte obtenido en los maquinados realizados.

Tabla 6. 4. Porcentaje de efecto de sobre corte promedio obtenido en los ensayos experimentales propuestos

Experimento	Tipo de perturbación	Profundidad Estipulada (μm)	Diámetro Electrodo (μm)	sobre-corte promedio %
1	Sin perturbación	240	603	36
2	Sin perturbación	400	603	42
3	Profundidad (100 μm)	240	603	37.9
4	Profundidad (100 μm)	400	603	44
5	Inclinación $\alpha=5^\circ$	240	603	35
6	Inclinación $\alpha=5^\circ$	400	603	38

Como se observa en la Tabla 6. 4, el efecto de sobre corte promedio se mantiene en un intervalo del 35 al 44 % con una media del 38.8 % con relación a las dimensiones del

electrodo utilizado. Esta reducción significativa en especial es atribuida a los cambios en la magnitud de polarización realizados a lo largo del proceso, ya que como se detalla en (Chen, et al., 2018), esto contribuye a la mejora en la precisión resultante. Derivado de lo anterior se visualiza mediante la gráfica de la Figura 6. 29 el comportamiento de la corriente de maquinado cuantificada para los ensayos lineales sin perturbación.

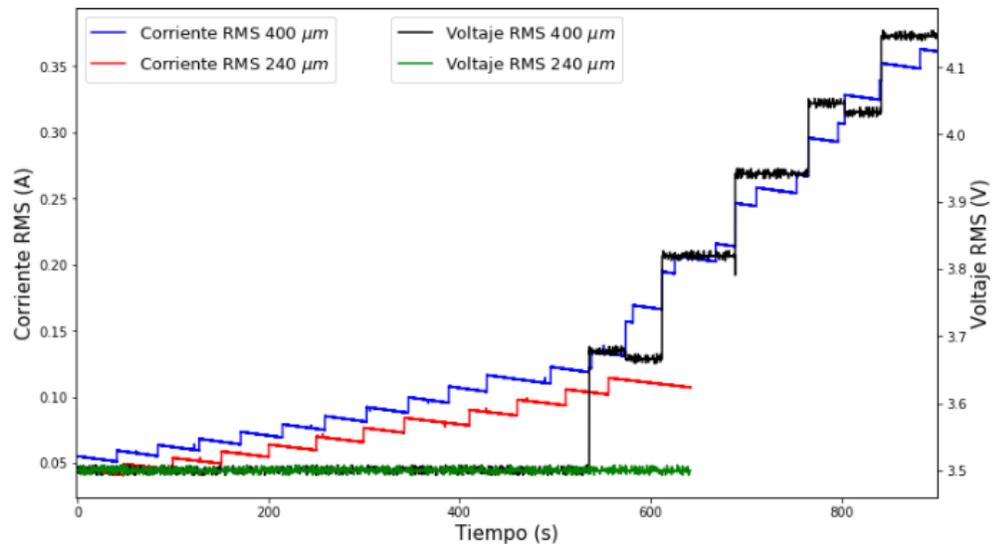


Figura 6. 29. Corriente y voltaje RMS de maquinado observada en los ensayos lineales sin perturbación.

En la figura anterior se describen mediante las señales de color rojo y azul las tendencias cuantificadas de la corriente al término del maquinado. Agregado a esto, se aprecia como el voltaje de polarización se mantiene constante a menos que el área de exposición sobrepase el umbral equivalente al *gap* inicial delimitado en las reglas difusas. Esto es verificable mediante la observación de la tensión eléctrica en el experimento número 2, donde al comenzar a incrementar la superficie expuesta se inicializa el incremento de voltaje para compensar la dispersión de la corriente por los costados laterales. Por otro lado, se vislumbra de igual manera menor tiempo requerido en la ejecución de los ajustes del sistema mecánico, los cuales son realizados cuando el sistema difuso establece que el *gap* ha sobrepasado +/- 20 μm de distancia inter-electrodos inicial debido al cambio de la pendiente de corriente evaluada en el sistema de inferencia, deteniéndose si y solo si, el error se mantiene estable en el conjunto CERO, el cual según la gráfica se satisface con

tan solo 1 ajuste. Para terminar con el análisis de este experimento se presenta mediante la imagen de la Figura 6. 30 el producto final de los ensayos lineales anteriormente descritos.

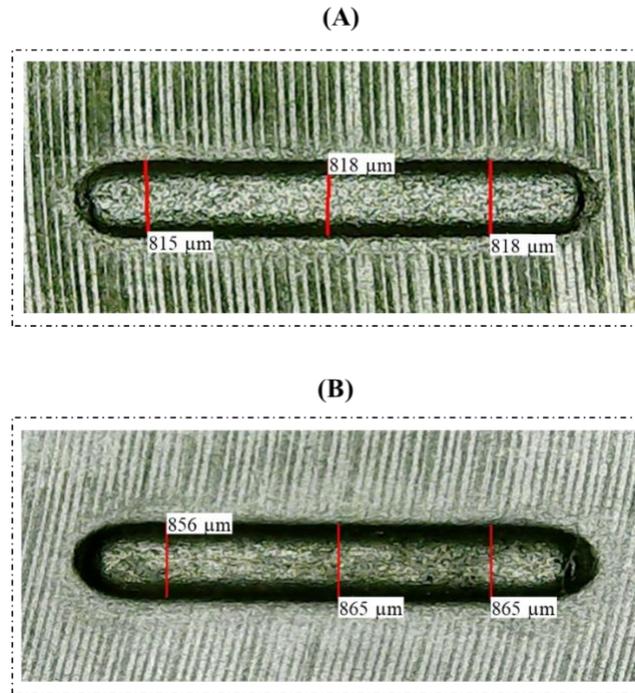


Figura 6. 30. Maquinados lineales sin perturbación con una profundidad de (A)240 μm y (B) 400 μm .

Continuando con el análisis de los experimentos se presenta la gráfica de la Figura 6. 31 con los valores de corriente cuantificados en los experimentos con una perturbación de profundidad, donde se alcanzan a apreciar rasgos de los ajustes continuos producidos a consecuencia de la irregularidad de la superficie.

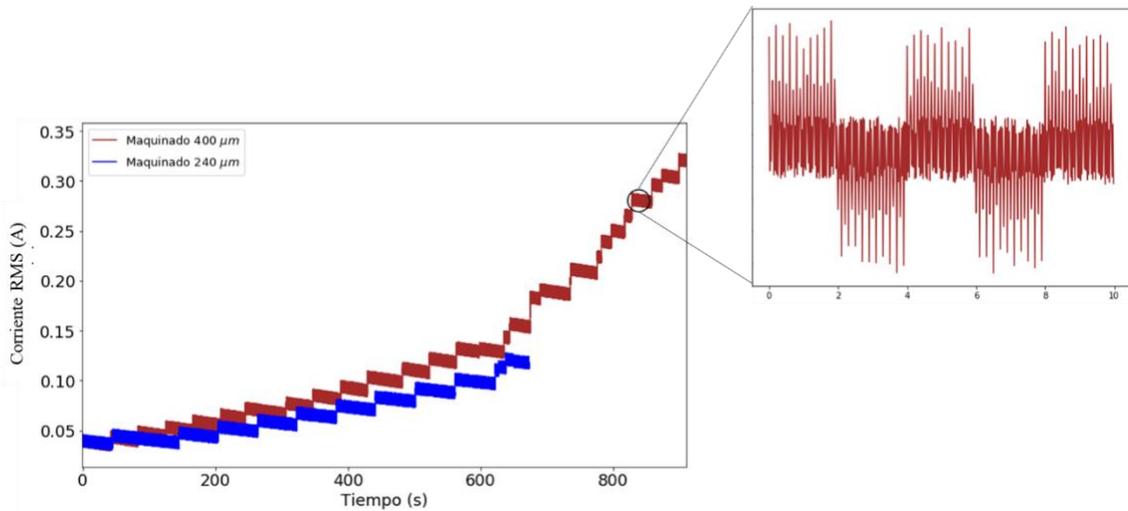


Figura 6. 31. Corrientes RMS observadas en maquinados lineales aplicando una perturbación de profundidad.

Tal como se menciona anteriormente, estos ajustes del sistema mecánico son realizados con mayor frecuencia con el objetivo de mantener el *gap* constante y a su vez un error de la pendiente de corriente en el conjunto CERO. Estas correcciones son realizadas con mayor antelación debido a la presencia de los picos abruptos visualizados a lo largo de la señal, los cuales son originados por el cambio repentino de la distancia inter-electrodos al incurrir en la perturbación de profundidad sobre la cual se realiza el maquinado lineal. Este comportamiento está fundamentado con la inferencia del sistema difuso al identificar un cambio en el primer descenso de corriente, provocando en este caso que la pertenencia del conjunto difuso de salida establezca una distancia en la etiqueta “LEJOS”. Para cuando la trayectoria de la herramienta alcanza el segundo límite de la perturbación, la distancia entre ambos elementos incrementa de manera significativa ocasionando el pico superior de corriente como se observa en la Figura 6. 31. Para este caso el conjunto difuso de salida corresponde a la etiqueta “CERCA”, reflejando que el *gap* actual es menor a los 240 μm. La respuesta del sistema para cada criterio consiste en movilizar la ubicación del electrodo hasta que el error de la pendiente obtenga una pertenencia en el conjunto central en la etapa de fuzzificación, reflejando que la remoción de material es aproximadamente igual a la inicial (Abdel & El-Hofy, 2005) (Gallegos Miranda, 2019).

Por otra parte, es presentada la gráfica de la Figura 6. 32 con la corriente y el voltaje RMS del experimento con mayor profundidad donde se aprecia con mayor detalle los cambios en el voltaje de polarización.

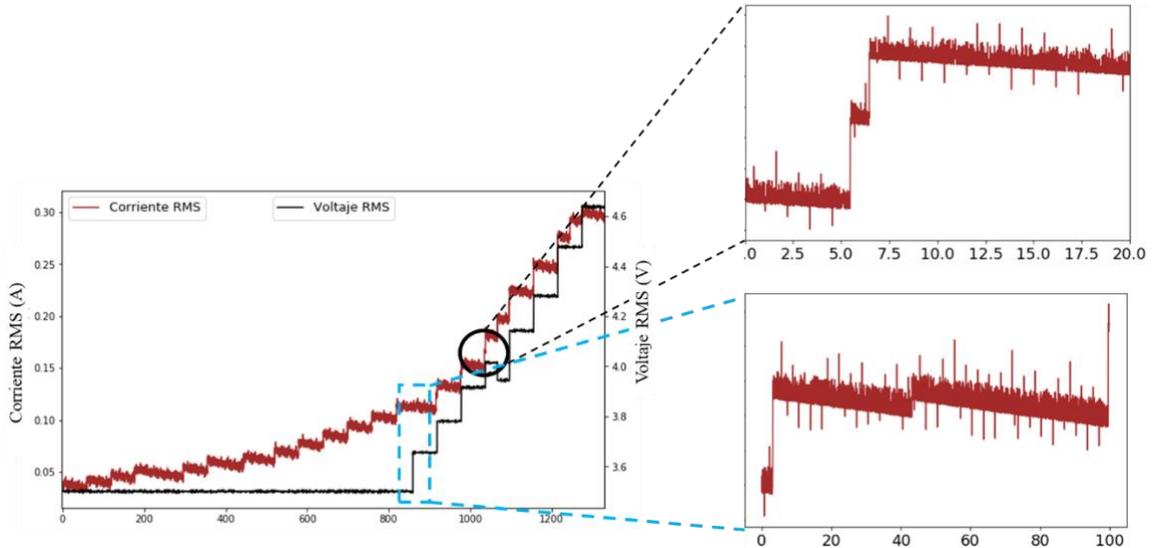


Figura 6. 32. Voltaje y corriente RMS observada en maquinado lineal de 400 μm aplicando una perturbación de profundidad.

Continuando con la descripción de la figura anterior, se presenta una vista específica de los instantes donde se regula la tensión aplicada sobre las herramientas de trabajo. Aquí, se logra vislumbrar un incremento poco significativo en el momento cuando se realiza el primer cambio de voltaje. Esto es así a consecuencia del momento en que fue originado, debido a que conforme el proceso se lleva a cabo la distancia inter-electrodos incrementa gradualmente, ocasionando menor impacto cuando el tiempo de exposición ha sido prolongado, pero no fuera de los límites aceptables de la distancia en el conjunto central. Sin embargo, en el segundo acercamiento se visualiza la influencia de la intensidad con mayor impacto en función a la cercanía del incremento de energía eléctrica y el ajuste del sistema mecánico.

Agregado a lo anterior, se presenta en la Figura 6. 33 los resultados de los maquinados lineales obtenidos al término del proceso de manufactura, donde en (A) se visualiza el ensayo con una profundidad de 240 μm y en (B) la prueba de 400 μm . De la misma manera se visualizan las dimensiones en el diámetro del barreno.

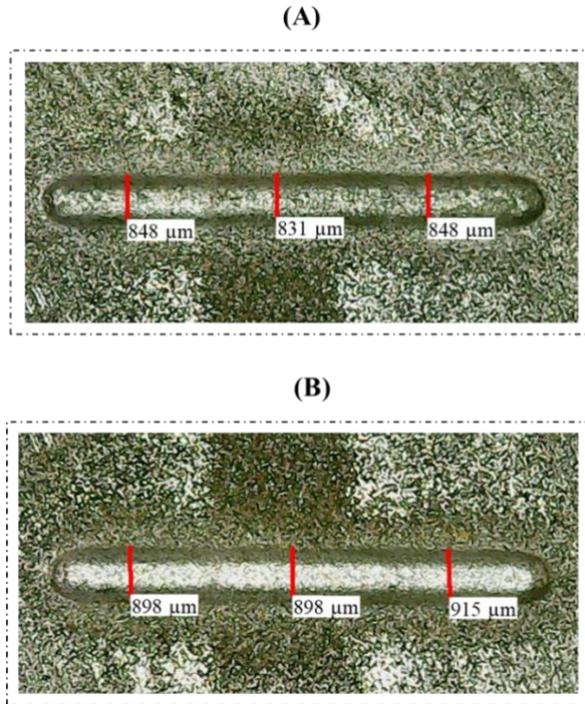


Figura 6. 33. (A) Maquinado lineal de 240 μm y (B) 400 μm de profundidad con una perturbación perpendicular de 100 μm de altura.

Para segundo criterio propuesto se presenta en la gráfica de la Figura 6. 34 los datos observados de la corriente de maquinado en las pruebas con la perturbación de inclinación de 5° .

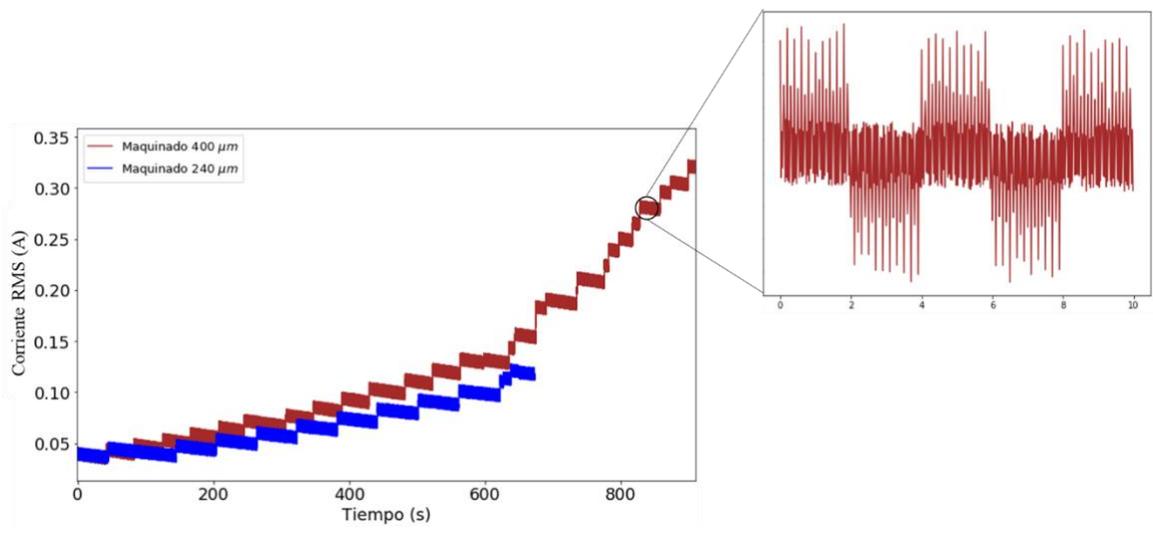


Figura 6. 34. Corriente RMS cuantificada en maquinados lineales aplicando una perturbación de inclinación de 5° .

Según lo identificado en la gráfica anterior se visualiza una tendencia de corriente ascendente y descendente cada periodo de tiempo, que a diferencia de las muestras de los ensayos con la perturbación de profundidad de la gráfica Figura 6. 31, se presentan de manera consecutiva durante un estimado de 2 segundos. Esto se debe a que es el tiempo requerido para realizar el recorrido correspondiente a la longitud del maquinado, que al estar a 5° de inclinación, presenta discontinuidades consecutivas en la distancia entre electrodos. Estos cambios en general provocan el cambio abrupto de la corriente originando los picos observados, que para el sistema difuso le permiten determinar un cambio en *gap*, el cual es corregido movilizándolo hasta que la fuzzificación del error se establezca en el conjunto “CERO”, aseverando el *gap* inicial nuevamente. De la misma manera que en el caso anterior, se describe mediante la gráfica de la Figura 6. 35 la corriente y el voltaje de maquinado cuantificado.

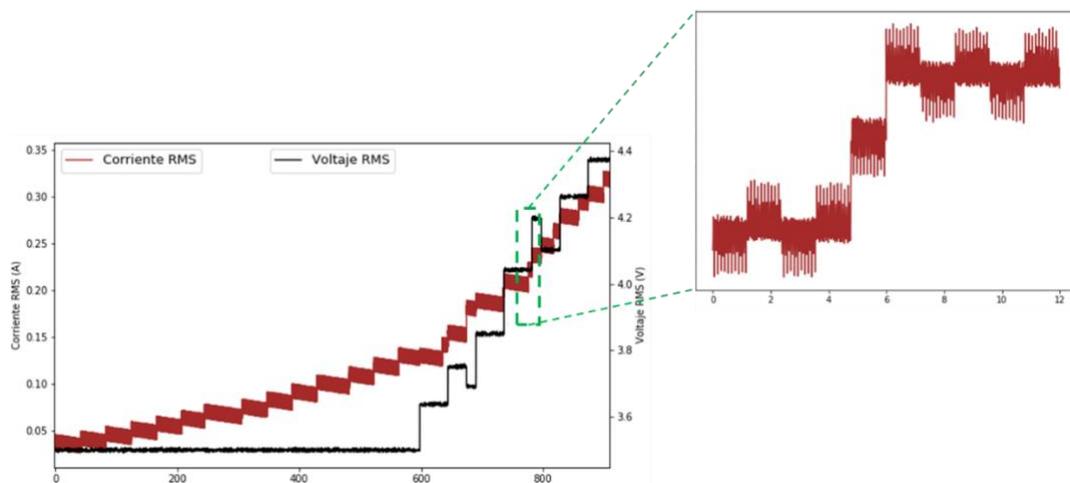


Figura 6. 35. Voltaje RMS observado para maquinados lineales aplicando una perturbación de inclinación.

Al igual que en los experimentos anteriores se visualiza el cambio de polarización cuando el área de exposición incrementa, y a pesar de los ajustes continuos a largo del recorrido se mantiene esta tendencia definida por el sistema difuso, validando la eficiencia a pesar de presentar alteraciones en las condiciones de trabajo. Finalmente, como resultado de los experimentos se presenta la Figura 6. 36 (A) con el maquinado final de $240\ \mu\text{m}$ y (B) con la prueba con una profundidad de $400\ \mu\text{m}$, así como el diámetro resultante empleado para la estimación del diámetro de sobre-corte descrito en la Tabla 6. 4.

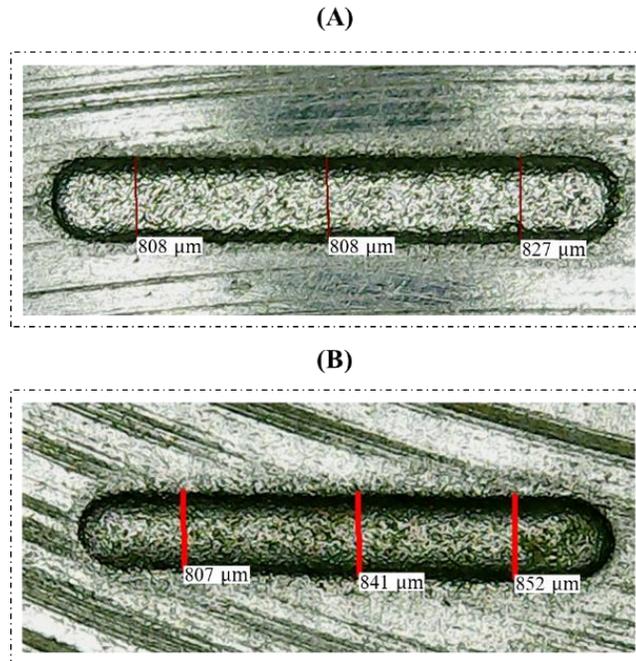


Figura 6. 36. (A) Maquinado lineal de 240 μm y (B) 400 μm de profundidad con una perturbación de inclinación de 5°.

6.4.3 Maquinados Poligonales

Como complemento del análisis del proceso de maquinado electroquímico por pulsos mediante un sistema MIMO se presentan el diseño de 3 maquinados poligonales. Estos tienen unas dimensiones de 5 x 5 mm de longitud por una profundidad de 300 μm . Al igual que los ensayos anteriores son considerados los criterios de evaluación de profundidad y efecto de sobre corte, delimitando los sitios de cuantificación según se visualiza en la Figura 6. 37.

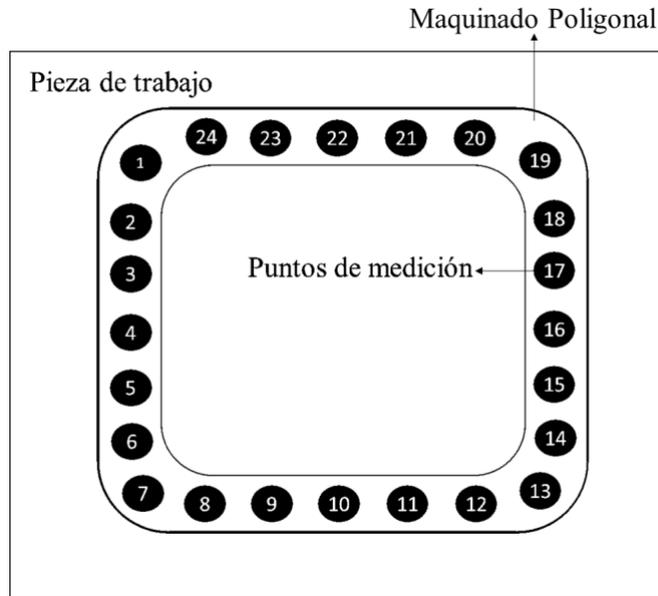


Figura 6. 37. Puntos de medición de profundidad y diámetro de maquinado poligonal.

Una vez definido lo anterior, se presentan en la Tabla 6. 5 los errores cuantificados para los puntos de medición acotados anteriormente, observando que gran parte de ellos se establecen dentro del error aceptable igual a 6.7 % equivalente a +/- 20 μm .

Tabla 6. 5. Porcentaje de error en la profundidad cuantificado para las pruebas de maquinados poligonales

Experimento	Tipo de prueba	Profundidad Estipulada (μm)	Mediciones de profundidad (error %)							% de error aceptable
1	Poligonal	300	6.7	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	6.7	6.7
			6.7	0.0	0.0	0.0	6.7	0.0	3.3	
			3.3	3.3	6.7	3.3	3.3	0.0	0.0	
			0.0	0.0	6.7	0.0	6.7	3.3	6.7	
2	Poligonal	300	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	6.7	0.0	6.7
			0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	3.3	0.0	
			0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	6.7	3.3	
			3.3	3.3	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	Poligonal	300	3.3	6.7	6.7	6.7	0.0	0.0	10.0	6.7
			10	6.7	6.7	3.3	0.0	0.0	6.7	
			6.7	3.3	0.0	3.3	3.3	3.3	0.0	
			0	3.3	6.7	6.7	3.3	3.3	0.0	

Por otra parte, a través de la Tabla 6. 6 son detallados los parámetros referentes al efecto de sobre-corte promedio obtenido para cada prueba poligonal, manteniendo una media de 37.4 % muy cercana a la obtenida en las pruebas de maquinados lineales la cual fue establecida en 38 %, verificando nuevamente la precisión obtenida con respecto a este parámetro.

Tabla 6. 6. Porcentaje de diámetro de sobre-corte obtenido en pruebas de maquinados poligonales.

Experimento	Tipo de prueba	Profundidad (μm)	Diámetro electrodo	Sobre-corte promedio %
1	Poligonal	300	603	39.4
2	Poligonal	300	603	38.4
3	Poligonal	300	603	34.6

Finalmente, se vislumbra mediante la gráfica de la Figura 6. 38 la corriente de maquinado y el voltaje cuantificado durante los maquinados poligonales, observando como los cambios de tensión son producidos una vez el área de exposición sobrepasa los 240 μm como en los maquinados lineales.

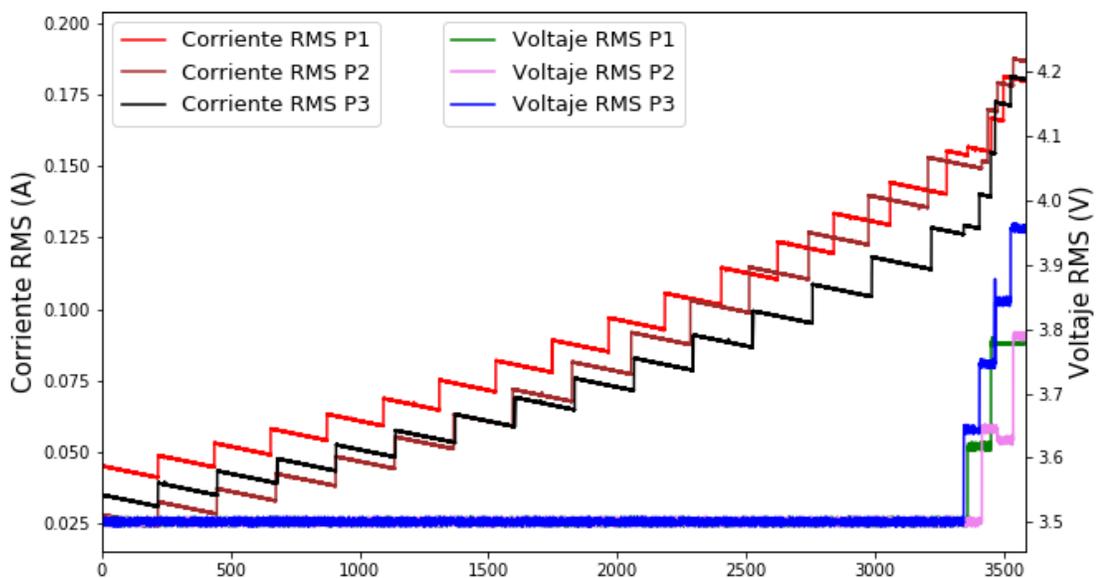


Figura 6. 38. Corriente y voltaje observado en las pruebas de maquinados poligonales.

Por otro lado, se presenta mediante la gráfica de la Figura 6. 39 la potencia generada en los maquinados poligonales, apreciando un valor máximo de 0.6752 W y una mínima de 0.0984 W. Sin embargo, según la gráfica de potencia visualizada por el polígono P1 sobre los demás experimentos se obtiene el mayor efecto de sobre corte igual a 39.4 %, lo que en el caso del ensayo P3 se obtiene uno equivalente al 34.6 %, relacionado con la menor escala de potencia vislumbrada al término de la prueba.

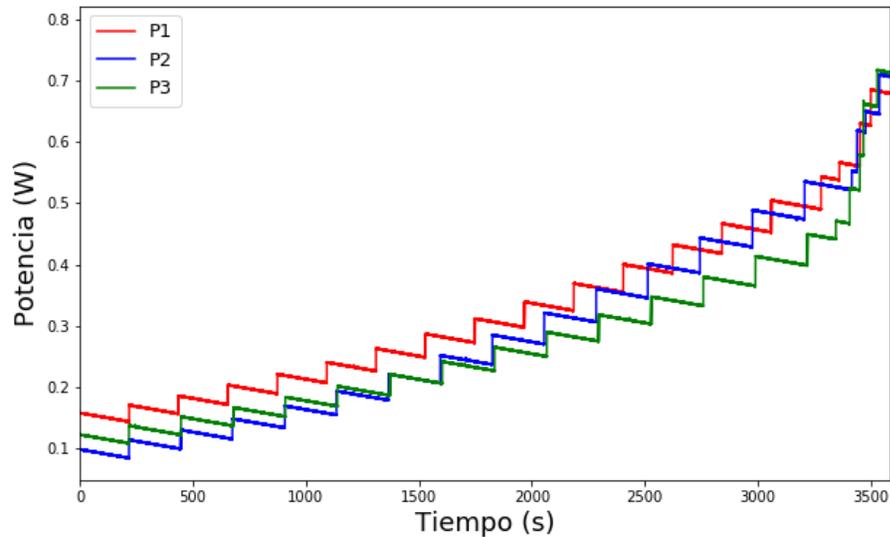


Figura 6. 39 Potencia generada en los maquinados poligonales.

Los resultados al término de los ensayos son visualizados mediante la Figura 6. 40, observando de manera general las dimensiones del diámetro resultantes en cada uno de los experimentos.

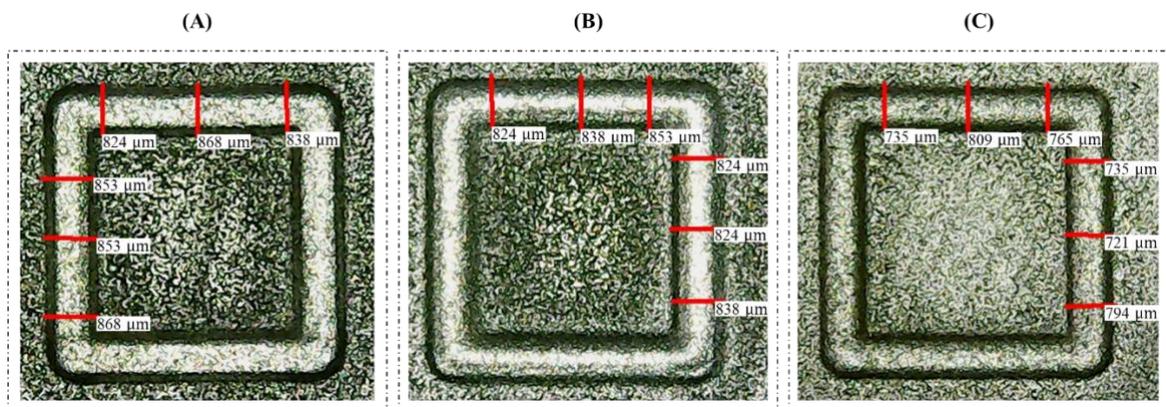


Figura 6. 40. Pruebas realizadas para validación de diseño de maquinados poligonales.

Esta serie de resultados son fundamentalmente generados por medio de la estimación de los parámetros mediante el sistema difuso, por lo cual se presenta la Figura 6. 41 y la Figura 6. 42 con el espacio de trabajo para las ponderaciones del *gap* y el voltaje de polarización.

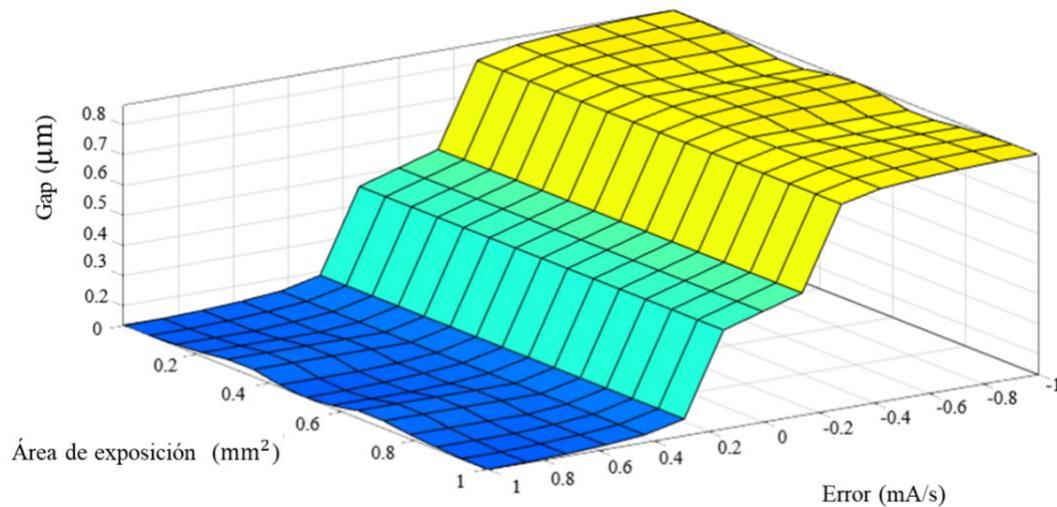


Figura 6. 41. Espacio de trabajo para la estimación del Gap del sistema de inferencia difuso.

Según se aprecia en la Figura 6. 41, la pertenencia deseada correspondiente al *gap* inicial se refleja en la superficie intermedia del espacio de trabajo en los intervalos de 0.45 a 0.55 correspondiente al conjunto NO, y la transición inferior de 0 a 0.45 como superior de 0.55 a 1 describe la aproximación y el distanciamiento de los electrodos, acotados por los conjuntos CR y LE respectivamente, los cuales son activados por el desgaste de material o la presencia de irregularidades en la pieza de trabajo según el criterio obtenido por el error de la pendiente y el área de exposición. Por otra parte, en la gráfica de la Figura 6. 42 se muestra la salida de voltaje estimado para cada valor de pertenencia del error y el área de exposición. En ella, es destacable que la magnitud de tensión deseada no se establece en un solo conjunto durante todo el proceso, sino que se establecerá en función a las condiciones identificadas por medio de la fuzzificación. Esto significa que para cuando se realiza una ponderación de un área por debajo de una afiliación de 0.6 y un error en el intervalo positivo, el valor de tensión se mantendrá en la pertenencia intermedia, siendo lo suficiente para conservar una remoción estable sin ocasionar un

incremento en el efecto de sobre-corte, siempre y cuando la superficie de exposición no supere la inicial. Sin embargo, conforme la pertenencia de este último parámetro incrementa, además de que el error se vuelve negativo, se requiere mayor voltaje, lo cual es verificable según los datos de corriente y tensión vislumbrados en los experimentos de la sección 6.3.

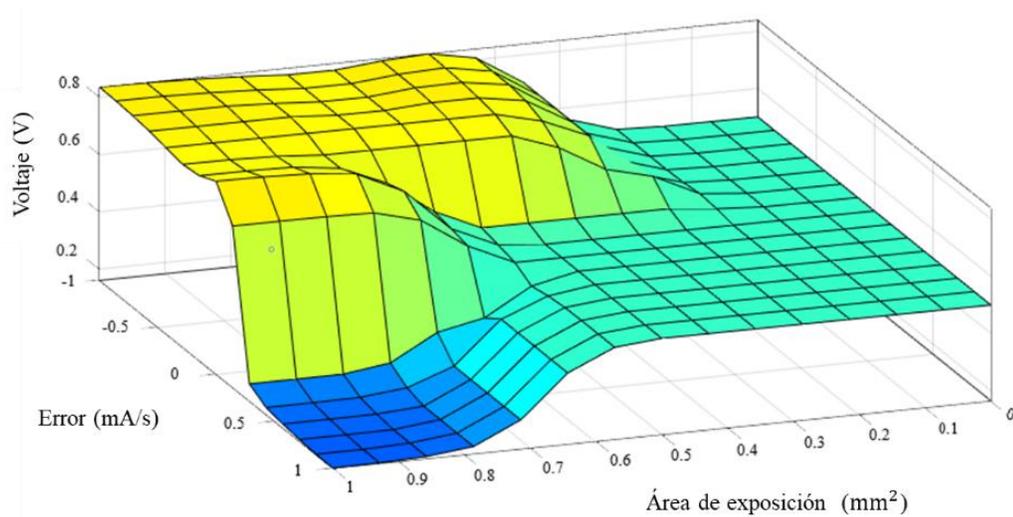


Figura 6. 42. Espacio de trabajo para la estimación del voltaje del sistema de inferencia difuso.

Bajo estos criterios mencionados anteriormente fueron realizados un par de maquinados finales con una estructura con mayor complejidad como se visualiza en la Figura 6. 43. Ambos diseños mantienen una profundidad de 300 μm y fueron desarrollados bajo la mismas circunstancias que los experimentos anteriores, delimitando únicamente la profundidad deseada y la estructura morfológica final mediante programación en la SBC.

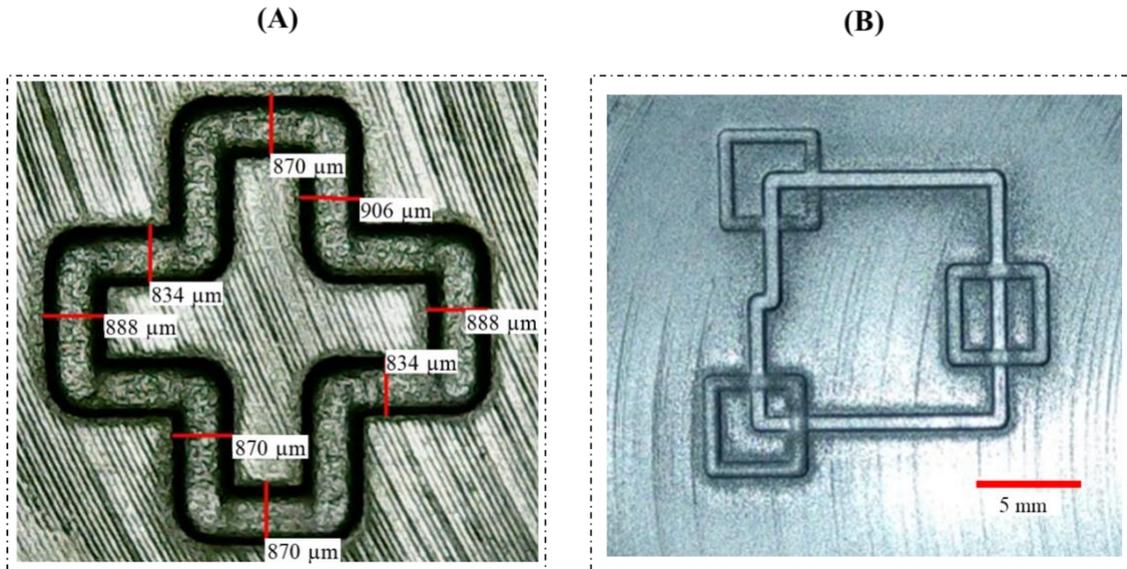


Figura 6. 43. Maquinados de 300 μm de profundidad en acero AISI1018 elaborados con el sistema MIMO difuso desarrollado.

Finalmente, tomando en cuenta los resultados obtenidos con relación al efecto de sobre corte, se presentan mediante la Tabla 6. 7 un contraste de los resultados generados en el sistema MIMO difuso y el método SISO descrito en (Gallegos Miranda, 2019).

Tabla 6. 7. Efecto de sobre corte obtenido en ensayos experimentales con un sistema MIMO y datos reportados en maquinados con un método SISO.

Experimento	Sistema MIMO		Sistema SISO	
	Profundidad (μm)	Porcentaje de sobre corte promedio %	Profundidad (μm)	Porcentaje de sobre corte promedio %
Lineal	240	36	240	51
Perturbación de inclinación	240	35	240	54
Poligonal	300	35	240	83

Con base en la información descrita en la tabla anterior se observa un mayor porcentaje de error en el diámetro final al realizar maquinados poligonales con el criterio SISO, que por el contrario en el método MIMO no sucede así, estableciendo una precisión cercana

al 35 % en estas tres modalidades de experimentos. En este sentido, tomando en cuenta esta serie de parámetros y los datos presentados en la Tabla 6. 6, se obtiene una media del 39 % en el efecto de sobre corte final por parte del sistema de múltiples entradas. Por otro lado, derivado del porcentaje identificado en el sistema SISO se alcanza una media del 62 %, acotando una reducción del 23 % entre ambas técnicas.

El decremento significativo observado con el método MIMO es atribuido en gran parte a la regulación del voltaje y la estimación de la distancia inter-electrodos de manera difusa, ya que la no linealidad o los cambios errantes en la condiciones del proceso producidos por la misma anatomía de la técnica, no interfieren de manera significativa en la estimación de los parámetros. No obstante, como es demostrado en la sección 6.1 y 6.2, la agregación de pulsos bipolares y la selección de una frecuencia de trabajo en un intervalo de los 60 kHz contribuyó de manera conjunta a la obtención de los resultados alcanzados.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de control de múltiples entradas y múltiples salidas con un criterio de inferencia acotado por la técnica de *soft-computing* denominada Lógica Difusa, para un proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos. En dicho sistema, fueron evaluadas como entrada el área de exposición del electrodo y el error de la pendiente de corriente obtenida de manera continua por medio de tres conjuntos difusos del tipo Z, S y Gaussianos para cada variable en la etapa de fuzzificación, generando como salida la distancia inter-electrodos y el voltaje de polarización representados por funciones del mismo tipo, generando finalmente un criterio numérico mediante la defuzzificación con una ecuación centroide. Ambas consideraciones fueron adoptadas en atribución al análisis exhaustivo de la literatura, la cual describe la sustancial correlación de la corriente de maquinado con la distancia entre electrodos, y por otra parte los beneficios procedentes de la polarización en el producto final de los maquinados. Mediante estas circunstancias y en adición de pulsos bipolares como apoyo para la eliminación de residuos no metálicos sobre los electrodos, fue seleccionada una frecuencia de 60 kHz para el desgaste de material a través experimentación, y validados por medio de una serie de ensayos donde se aprecian los beneficios de aplicar la técnica en contraste con un método de control difuso de una entrada y una salida identificado en la literatura.

En este sentido, como parte de la validación se presentaron los resultados obtenidos con mayor relevancia en las investigaciones realizadas por Gallegos (2019), mediante las cuales se identificaron las discrepancias entre un enfoque convencional SISO y uno de múltiples variables MIMO. Dentro de éste, se logró verificar que con ayuda de la continua consideración del voltaje de polarización así como de la correcta estimación del *gap* es posible reducir el efecto de sobre corte en maquinados lineales, obteniendo una media de este error equivalente al 39 % con respecto a las dimensiones del electrodo utilizado en el sistema MIMO, y un porcentaje total del 62 % en la técnica SISO, calculados respectivamente con las dimensiones de la herramienta y los parámetros reportados en las investigación citada anteriormente. Por lo tanto, un porcentaje promedio igual al 23 % es reducido considerando más de una variable de entrada al sistema de inferencia encargado de llevar a cabo la retroalimentación de los parámetros de mayor relevancia en el sistema de maquinado no convencional.

Aunado a lo anterior, merece la pena resaltar que los beneficios obtenidos al término de la investigación fueron alcanzados gracias a la agrupación de diferentes tecnologías, citando los sistemas embebidos, utilizando una SBC para realizar el cómputo del sistema de control difuso mediante codificación en lenguaje Python y a su vez el lenguaje C para la comunicación mediante protocolos SPI y serial entre el sistema embebido y los circuitos de polarización gestionados por tecnología PIC (*Programmable Integrated Circuited*, por sus siglas en Inglés).

Finalmente, como trabajo a futuro se vislumbra el desarrollo de la optimización del sistema de movilización del electrodo, que al establecerse en el ámbito del micro-maquinado se requiere de la mayor precisión posible, planteando la posibilidad de disminuir los 20 μm por paso ya existentes. En este sentido, con la precisa respuesta de los dispositivos electrónicos y el continuo desarrollo de la técnica de gestión de control, ampliará el campo de estudio para las ciencias computacionales aplicadas en el proceso de manufactura no convencional PECMM.

REFERENCIAS

Abdel, H. & El-Hofy, G., 2005. *Advance Machining Processes*. 1 ed. Alexandria: McGraw-Hill.

AG, I. T., 2020. Infineon Technologies AG. [En línea] Available at: <https://www.infineon.com/> [Último acceso: 10 05 2020].

Altas, I., 2017. *Fuzzy logic control in energy systems*. 1 ed. Croydon: CPI Group.

Ashby, M., 2005. Department of Engineering, Mechanics, Materials and Design; University of Cambridge. [En línea] Available at: <http://www-mech.eng.cam.ac.uk/mmd/> [Último acceso: 09 03 2017].

Blázquez, V., Lorenzo, V. & Rio, E., 2014. *Ingeniería y Ciencia de los Materiales Metálicos*. s.l.:Dextra.

Boby, M., Yakushev, A. & Milostnaya, N., 2018. Fuzzy Logic Control of Three-Axis CNC Milling Machine. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*.

Burkert, S., Schulze, H., Grmrlin, T. & Leone, M., 2009. The pulse electrochemical micromachining PECMM, specifications of the pulse units. *Springer Link*, 2(1), pp. 645-648.

Butkiewicz, B., 2001. About MIMO Systems with Fuzzy Inference. *Warsaw Universe of Technology*, pp. 1165-1170.

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

Chen, W., Han, F. & Wang, J., 2018. Influence of pulse wavefom on machining accuracy in electrochemical machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. *Springer-Verlang*, 96(4), pp. 1367-1375.

Emil, R. & Tomescu, M., 2014. Stable fuzzy logic control of a general class of chaotic systems. *Springer-Verlag London*, 26(3), pp. 541-550.

Fang, J., Zhang, L., Zhili, L. & Wang, M., 2018. Fuzzy adaptative sliding mode control for the precision position of a piezo-actuated nano positioning stage. *Internacional Journal of precision engineering and manufacturing*, 19(10), pp. 1147-1456.

Feng, Z., Granda, E. & Wayne, H., 2016. Experimental Investigation of Vibration-Assisted Pulsed Electrochemical Machining. *Procedia Manufacturing*, Volumen 5, pp. 798-814.

Foundation, P. S., 2021. Python documentation. [En línea] Available at: <https://docs.python.org/3/> [Último acceso: 11 05 2021].

Foundation, T. R. P., 2021. Raspberry Documentation. [En línea] Available at: <https://www.raspberrypi.org/documentation/> [Último acceso: 11 05 2021].

Gallegos Miranda, I., 2019. Sistema Computacional para la remoción controlada de Material en un proceso de Maquinado Electroquímico por Pulsos. Tesis de Maestria. Universidad Autónoma del Estado de México.

Genero Bocco , M. F., Cruz Lemus, J. A. & Paittini Velthuis , M., 2014. *Métodos de Investigación en Ingeniería de Software*. 2nd ed. MAdrid: Ra-Ma Editorial.

Granda Gutierrez, E. y otros, 2015. Remoción de material en diversos electrolitos durante el maquinado electroquímico de aceros de alta resistencia.. *Congreso Internacional en Ingeniería Electronica*, Volumen 37, pp. 25-30.

Grande Meza , A., 2003. Observadores difusos y control adaptable difuso basado en observadores. Tesis de Maestria. Centro de investigación de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Mexico, DF.

Groover, P., 2010. *Fundamentos de manufactura moderna*. 4 ed. México: McGrawHill.

Han, F., Chen, W., Ying, W. & Zhang, J., 2018. Effects of polarization on machining accuracy in pulse electrochemical machining. Bilbao, 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, Spain, 23-27 Abril 2018.

Hongyou, L., Kaiyong, J., Yimbiao, G. & Yungfeng, P., 2009. Research of Bipolar Current Electroforming in Precision Molds and Dies. *Tsinghua Science and Technology*, 14(1), pp. 144-148.

Hongyou, L. y otros, 2009. Research on Technique of Pulse Electrochemical Surface Finishing. *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. 11-12 de Abril de 2009, Zhangjiajie, Hunan, China*, pp. 677-680.

Idrosov, T., Zaitzev, A. & Zhitnikov, V., 2004. Estimation of the process localization at the electrochemical machining by microseconds pulses of bipolar current. *Journal of Materials Processing Technology*, Volumen 149, pp. 479-485.

Jimenez, J., Haber, R. & Alique, J., 2004. A MIMO Fuzzy Control System for High-Speed Machining Processes. Result of a case of study. *International Conference on Fuzzy Systems*. Budapest, Hungary, 2004, pp. 901-905, IEEE.

Kats, Z. & Tibbles, C., 2005. Analysis of micro-scale EDM process. *Springer-Verlag London*, Volumen 25, pp. 923-928.

Keasberry, V., Labib, A., Atkinson, J. & Frost, H., 2004. A Fuzzy Logic Control Approach to Electrochemical Machining. *Proceedings in the 34 International MATADOR Conference*. London, s.n.

Klocke, F., Heidemanns, L., Zeis, M. & Klink, A., 2018. A Novel Modeling Approach for the Simulation of Precise Electrochemical Machining (PECM) with Pulsed Current and Oscillating Cathode. 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 23-27 April 2018, Bilbao, Spain. pp. 499-504.

Kubica, E., Madill, D. & Wang, D., 2005. Designing Stable MIMO Fuzzy Controllers. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 35(2), pp. 372-380.

Liu, L., 2008. *An Intelligent Control Design for Non-Linear MIMO Processes*. Conference on Human System Interactions. Krakow, Poland, pp. 400-404.

Li, Z., Jiang, X., Ge, J. & Wang, Y., 2019. Research of small deep curved hole electrochemical machining based on pulse power supply. *22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Harbin, China, pp. 1-4.

- Lohrengel, M., 2005. Pulsed Electrochemical Machining of Iron in NaNO₃: Fundamentals and New Aspects. *Materials and Manufacturing Process*, 1(8).
- Martinez Alvarado , R., Granda Gutierrez , E. E., Zuñiga, L. M. & Guerrero , R., 2015. Pulsed Power Supply for Electrochemical Machining. *2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 3(15), pp. 1-6.
- McGeough, J., 1974. Principles of electrochemical machining, CRC Press, 1974. ISBN 9780470584132.
- Meng, L., Zeng, Y. & Zhu, D., 2019. Wire electrochemical micromachining of Ni-based metallic glass using bipolar nanosecond pulses. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volumen 146, pp. 1-7.
- Mortazavi, M. & Ivanov, A., 2019. MECM process investigation considering pulse signal features and EDL capacitance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 10.1007/s00170-019-03864-2.
- Muhamad, R., 2004. Circuitos amortiguadores. En: *Electronica de potencia: Circuitos dispositivos y aplicaciones*. México: Pearson.
- Ogata, K., 2010. *Ingenieria de control moderna*. Madrid España: Pearson.
- Qin, Y., ed., 2015. Micro -EDM. En: *Micromanufacturing Engineering and Technology*. s.l.:William Andrew, pp. 39-58.
- Rama, S., Sravan, C., Pandu, V. & Padmanabhan, G., 2009. *Fuzzy Logic-Based Forward Modeling of Electro Chemical Machining Process*. 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC). Coimbatore, India, 1431-1435.
- Samir, K. R. & Musalem, R. M., 2002. Control mediante lógica difusa. *Técnicas Modernas en Automática. Trabajo de Ingenieria Civil Electrónica. Universidad Técnica Federico Santa María*.
- Soriano, J., Olarte, A. & Melgarejo, M., 2005. *Fuzzy Controllers for MIMO Systems using Defuzzification based Boolean Relations*. *International Conference of Fuzzy Sistems*. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Bogota, Colombia, 1.

Technology, M., 2021. Microchip. [En línea] Available at: <https://www.microchip.com> [Último acceso: 11 05 2021].

Trillas, E. & Eciolaza, L., 2015. *Fuzzy Logic. An Introductory Course for Engineering*. Londres: Springer.

Trillas, E. & Gutierrez, J., 1992. *Aplicaciones de la Lógica Borrosa*. España: RAYCAR.

Wah, B., 2008. Fuzzy logic control systems. *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, pp. 1344-1355.

Xu, L., Bai, X. & Zhao, C., 2017. Communication-Electrochemical Micro-Machining with Adjustable Resistance. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(14), pp. 572-574.

Yang, L. & Li, J., 2017. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Nano-positioning of Piezoelectric Actuators. *International Journal of Fuzzy Systems*, Volumen 19, pp. 238-246.

Yonghua, L. & Kai, L., 2010. Fuzzy Controlling Interelectrode Gap of ECM Based on 6 Dimensional Forces and Machining Current. *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application. Changsha*, pp. 775-779.

Younas, T., Manzoor, M. & Kumari, J., 2017. Non Conventional Machinig Processes as Expedient Alternatives for Conventional Machining Processes. 3rd International Conference on Engineering Technologies and Social Sciences (ICETSS). *IEEE*, p. 5.

Zadeh, L., 1965. Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), pp. 338-353.

Zadeh, L., 2008. Is there a need for fuzzy logic. *Elseiver*, Volumen 178, pp. 2751-2779.

Zaytzev, A. y otros, 2004. Precise pulse electrochemical machining by bipolar current: Aspects of effective technological aplication. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(3), pp. 419-425.

Zhmark, Y., Manuzov, V. & Bogomolov, V., 2004. Fuzzy Logic in Voltage Control. The 8th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. Novosibirsk, Russia. pp. 323-325.