



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
UNIDAD ACADÉMICA PROFESIONAL TIANGUISTENCO

ALGORITMO MULTICRITERIO BASADO EN SOFT COMPUTING
PARA EL CONTROL DE UN PROCESO DE MAQUINADO
ELECTROQUÍMICO PULSADO

T E S I S

Que para obtener el Grado Académico de:

Doctor en Ciencias de la Computación

Presenta:

Octavio Catarino Aguilar

Director de Tesis:

Dr. Everardo Efrén Granda Gutiérrez

Tutores adjuntos:

Dr. José Arturo Pérez Martínez

Dr. José Luís Tapia Fabela

Mayo del 2023

Resumen

Los procesos de manufactura no convencional, como el mecanizado electroquímico pulsado bipolar, ofrecen la ventaja de mecanizar materiales metálicos conductores sin importar su dureza. El control preciso de este proceso es vital para lograr una remoción constante y uniforme. Uno de los parámetros clave es la distancia inter-electrodos, que se encuentra en el orden de los micrómetros.

En este documento de tesis, se presenta el diseño, desarrollo e implementación de un control basado en lógica difusa que utiliza 3 variables de entrada y 2 de salida, formando un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas con 27 reglas difusas. El objetivo del control es mantener la distancia inter-electrodos cercana a 240 μm , ajustando la elevación y el descenso de la herramienta de trabajo para lograr una remoción de material constante. Además, se describe el diseño y fabricación de una estación compacta de micro mecanizado electroquímico, adaptada a las necesidades físicas, como el área de trabajo y la resolución mecánica en el rango de micrómetros, así como aspectos operativos del proceso de mecanizado electroquímico.

La implementación de un controlador basado en lógica difusa demuestra ser una técnica eficaz para controlar una estación de micro mecanizado, dada la naturaleza no lineal de las variables eléctricas involucradas y la necesidad de estimar indirectamente la distancia inter-electrodos, imperceptible a simple vista. Se utiliza la corriente de mecanizado y el voltaje de polarización como variables eléctricas para estimar esta distancia. Los resultados muestran que es posible ajustar la distancia inter-electrodos en intervalos de 10 μm , la resolución máxima del sistema mecánico, y, en caso de necesitar un ajuste menor, es posible modificar el voltaje de polarización para cambiar la pendiente de la corriente de mecanizado y, por ende, la remoción de material.

El prototipo desarrollado utiliza materiales que sufren un menor desgaste debido a la corrosión generada durante el proceso de mecanizado, así como sistemas de filtrado, monitoreo y procesamiento para garantizar un funcionamiento adecuado.

Palabras clave: micro maquinado electroquímico pulsado, lógica difusa, distancia inter-electrodos, remoción de material, control multicriterio.

Abstract

Non-conventional manufacturing processes, such as pulsed bipolar electrochemical machining, offer the advantage of machining any conductive metallic material, regardless of its hardness. The precise control of this process is crucial to achieve consistent and uniform material removal. One of the key parameters is the inter-electrode distance, measured in micrometers.

This document presents the design, development, and implementation of a fuzzy logic-based control system that uses 3 input variables and 2 output variables, forming a multi-input multi-output system with 27 fuzzy rules. The control system aims to keep the inter-electrode distance close to 240 μm by adjusting the elevation and descent of the working tool to achieve constant material removal. Additionally, the design and fabrication of a compact electrochemical micromachining station are described, tailored to meet physical requirements such as workspace and mechanical resolution in the micrometer range, as well as operational aspects of electrochemical machining.

The implementation of a fuzzy logic-based controller proves to be an effective technique for governing a micromachining station, given the nonlinear behavior of the involved electrical variables and the need to indirectly estimate the imperceptible inter-electrode distance. The machining current and polarization voltage are used as electrical variables to estimate this distance. The results demonstrate the possibility of adjusting the inter-electrode distance in 10 μm intervals, which is the maximum resolution of the mechanical system. In case a smaller adjustment is required, the polarization voltage can be changed to alter the machining current slope and thus the material removal.

The developed prototype incorporates materials that exhibit reduced corrosion wear during the machining process, along with filtering, monitoring, and processing systems to ensure proper operation."

Keywords: pulsed electrochemical micromachining, fuzzy logic, inter-electrode distance, material removal, multicriteria control.

Productos académicos derivados del proyecto

Catarino Aguilar, O., Gallegos Miranda, I., Granda Gutiérrez, E., Tapia Fabela, J., & Pérez Martínez, J. (2020). Control difuso mediante la estimación mejorada de la distancia inter-electrodos en un proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos. *Research in Computing Science*, 879-891, año 19, volumen 149 No. 8, agosto del 2020.

Octavio Catarino-Aguilar Everardo-Efrén Granda, José-Arturo Pérez, José-Luis Tapia. Influencia del flujo del electrolito y flujo de aire en el acabado y sobre corte en un proceso de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar (aceptado para su publicación) *Revista DYNA*.

Modelo de utilidad en trámite de “Estación Compacta De Micro-Maquinado Electroquímico Pulsado” bajo el número de expediente MX/u/2022/000137 y folio 108657 (aceptado el examen de forma).

Participación como expositor en el 2do Foro de Egresados organizado por la licenciatura de ingeniería en computación del Centro Universitario UAEM Atlacomulco el 3 de diciembre del 2020.

Participación como instructor del taller “De lo teórico a lo practico: Las ciencias de la computación y su aplicación en el emprendimiento”, impartido los días 27 y 28 de octubre del 2021 en el marco del Coloquio de Investigación de Ingeniería y Ciencias de la Computación 2021 en el Centro Universitario UAEM Atlacomulco.

Participación como ponente del artículo “Control Difuso mediante la estimación mejorada de la distancia Inter-electrodos en un proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos” en el XII congreso Mexicano de Inteligencia Artificial COMIA 2020 celebrado en Cd. Juárez Chihuahua del 5-7 de agosto del 2020.

Índice general

Resumen	i
Abstract	ii
Productos académicos derivados del proyecto.....	iii
Índice general	iv
Índice de tablas.....	vii
Índice de figuras	viii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 REVISIÓN DE LA LITERATURA	3
2.1 Antecedentes	3
2.2 Conclusiones de la revisión de la literatura	15
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
3.1 Definición del problema.....	17
3.1.1 Preguntas de investigación.....	17
3.2 Objetivos de investigación	18
3.2.1 Objetivo general	18
3.2.2 Objetivos específicos	18
3.3 Justificación.....	19
3.4 Impactos	20
3.5 Hipótesis.....	20
4 MARCO TEÓRICO	21
4.1 Manufactura.....	21
4.2 Maquinado Electroquímico	21
4.3 Componentes de un proceso ECM asistido por computadora.....	24
4.4 Sistema computacional.....	27

4.4.1	Computadora de placa reducida	27
4.4.2	Ingeniería de Software	30
4.5	<i>Soft Computing</i>	31
4.5.1	Lógica difusa.....	32
5	MÉTODO	34
5.1	Estación de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar.....	34
5.1.1	Recipiente contenedor de electrolito sobre eje x.....	35
5.1.2	Cabezal eje z	37
5.1.3	Eje y	38
5.1.4	Sistema de recirculación del electrolito	40
5.1.5	Torreta de señalización	41
5.1.6	Unidad central de control	43
5.2	Circuito de control del sistema mecánico.....	44
5.3	Fuente de voltaje pulsada bipolar	45
5.3.1	Suministro y regulación de voltaje.....	45
5.3.2	Conmutación pulsada.....	46
5.4	Sistema de monitoreo	51
5.4.1	Variables eléctricas.	51
5.4.2	Suministro y control de flujo del electrolito	53
5.4.3	Presión de aire del sistema neumático	55
5.5	Diagrama de secuencia.....	58
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
6.1	Prototipo de la estación compacta de micro maquinado electroquímico pulsado 61	
6.2	Caracterización de PECM con variación de flujo de electrolito	62

6.3	Caracterización del proceso PECM con variación del flujo de aire del sistema neumático	65
6.4	Control difuso MIMO incorporado en estación compacta de micro maquinado electroquímico pulsado.....	69
6.4.1	Variables difusas	71
6.4.2	Conjuntos Difusos.....	71
6.4.3	Defusificación	76
6.5	Prueba de validación del sistema de control	76
6.5.1	Maquinados fijos de Profundidad específica	77
6.5.2	Maquinado lineal de profundidad específica	84
6.5.3	Maquinado lineal de profundidad variable	90
7	CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	98
	Referencias.....	100

Índice de tablas

Tabla 4.4.1. Características de Raspberry Pi 4B	28
Tabla 5.4.1 caracterización del caudalímetro 937-0820.	54
Tabla 6.2.1 Configuración de parámetros para experimentación PECM con flujo de electrolito variable.....	63
Tabla 6.3.1: Configuración de parámetros para experimentación PECM presión de aire variable.....	66
Tabla 6.4.1 Etiquetas lingüísticas de variables difusas de entrada y salida.	71
Tabla 6.5.1. Configuración de parámetros para experimentación PECM para pruebas de barrenos ciegos con profundidad de 100 μm, 200 μm, 300 μm.	77
Tabla 6.5.2. Resultados de las pruebas de barrenos ciegos de 100, 200 y 400 μm.	78
Tabla 6.5.3 Configuración de parámetros para experimentación PECM para pruebas con desplazamiento lineal de 10mm y profundidad de 100 y 200 μm.	85
Tabla 6.5.4. Resultados de profundidad en maquinado lineales de 100 y 200 μm.....	87
Tabla 6.5.5 Sobre corte resultante en pruebas de maquinado lineal.	88
Tabla 6.5.6. Parámetros de configuración para Prueba lineal con inclinación de 8.9° y profundidad de 250 μm.	91
Tabla 6.5.7: Medición de profundidad en los distintos puntos de la trayectoria maquinada.	93
Tabla 6.5.8. Sobre corte resultando sobre trayectoria de maquinado lineal con inclinación de 8.9°.	95

Índice de figuras

Figura 4.2.1 Principio de ECM (A) inicio del proceso (B) durante proceso.	23
Figura 4.2.2 Representación de las reacciones químicas que ocurren durante el proceso ECM, promoviendo la remoción de material de la pieza de trabajo.	24
Figura 4.3.1 Componentes del ECM asistido por computadora.	26
Figura 4.4.1. Estructura de la metodología de Modelos o Prototipos.	31
Figura 4.5.1. Comparación entre lógica clásica y lógica difusa.	33
Figura 5.1.1. Vista isométrica de la estación de micro maquinado pulsado.	35
Figura 5.1.2 Sección correspondiente al eje x del sistema de ejes coordenados.	36
Figura 5.1.3 Cabezal eje z.	38
Figura 5.1.4 Eje y	39
Figura 5.1.5 Sistema de recirculación del electrolito.	42
Figura 5.1.6 Torreta de señalización.	42
Figura 5.1.7 Unidad central de control.	43
Figura 5.2.1 Conexión de los circuitos de control con SBC	45
Figura 5.3.1 Suministro y regulación de voltaje.	46
Figura 5.3.2 Diagrama esquemático simplificado de la unidad de pulsos de la fuente pulsada bipolar.	47
Figura 5.3.3 Relación de los pulsos positivos y negativos, así como de la conmutación de la herramienta y pieza de trabajo.	49
Figura 5.3.4 Residuos y burbujas de hidrógeno acumuladas sobre la pieza de trabajo. ..	50
Figura 5.3.5 Conmutación de polaridad de la herramienta y pieza de trabajo.	50
Figura 5.4.1 Divisor de voltaje incorporado para garantizar un monitoreo de voltaje de maquinado no mayor a 5V.	52
Figura 5.4.2 Diagrama del sistema de monitoreo de la corriente y voltaje de maquinado.	53
Figura 5.4.3 Incorporación de caudalímetro en sistema de recirculación de electrolito. ..	54
Figura 5.4.4 Diagrama de conexión de sistema de monitoreo y control de flujo de electrolito.	55
Figura 5.4.5 Comportamiento de las concentraciones de electrolito entre herramienta y pieza de trabajo.	56

Figura 5.4.6 Incorporación de sistema neumático a proceso de maquinado.....	56
Figura 5.4.7 Incorporación de sistema neumático en proceso PECM.	57
Figura 5.4.8 Adecuación mecánica para el sistema de inyección de aire.	58
Figura 5.5.1. Diagrama de secuencia.	60
Figura 6.1.1 Estación Compacta de Micro Maquinado Electroquímico Pulsado.	62
Figura 6.2.1:Corriente de maquinado durante pruebas PECM con variación de flujo de electrolito.....	64
Figura 6.2.2 Resultado de la prueba PECM con variación de flujo de electrolito.....	65
Figura 6.3.1: Prueba de maquinado con una presión de flujo de aire menor a 6.2 kPa. ..	67
Figura 6.3.2 Corriente de maquinado durante pruebas PECM con variación de presión de aire.....	68
Figura 6.3.3 Resultado de la prueba PECM con variación de presión de aire.....	68
Figura 6.3.4: Efecto abanico presente en maquinados al aplicar un flujo de aire a una presión igual o mayor a 8.4 kPa.....	69
Figura 6.4.1 Diagrama representativo de control difuso para Proceso PECM.	70
Figura 6.4.2 Funciones de membresía usadas para evaluar el error de la pendiente de maquinado (mA/S).....	72
Figura 6.4.3 Funciones de membresía usadas para evaluar el área expuesta (mm^2).	73
Figura 6.4.4 Funciones de membresía usadas para evaluar el flujo de electrolito suministrado al proceso de maquinado (ml/min).	74
Figura 6.4.5 Funciones de membresía para la variable de salida gap (μm).	75
Figura 6.4.6 Funciones de membresía para la variable de salida Voltaje (V).	76
Figura 6.5.1. Corriente de maquinado de pruebas de barrenos ciegos con profundidad de 100, 200 y 400 μm	79
Figura 6.5.2. Micrografía, de las pruebas de barrenos ciegos para profundidad de 100, 200 y 400 μm	80
Figura 6.5.3. Aumento en área expuesta (A), efecto de sobre corte (B).....	81
Figura 6.5.4. Evolución del voltaje de polarización, durante pruebas de maquinado de barrenos ciegos.....	82
Figura 6.5.5. Flujo de electrolito en pruebas de barrenos ciegos.....	83

Figura 6.5.6. Comportamiento del flujo de electrolito en barreno ciego al inicio del proceso (A) tras un periodo de maquinado (B).	84
Figura 6.5.7 Desplazamiento lineal de herramienta de trabajo en Angulo de 90° respecto a pieza de trabajo.	85
Figura 6.5.8 Puntos de medición para pruebas de maquinado lineal.	86
Figura 6.5.9. Corriente de maquinado para pruebas lineales con profundidad de 100 μm (A) y 200 μm (B).	87
Figura 6.5.10. Micrografía de prueba de maquinado lineal de 100 μm de profundidad.	88
Figura 6.5.11 Micrografía de prueba de maquinado lineal de 200 μm de profundidad.	88
Figura 6.5.12 Evolución del voltaje de polarización para pruebas de maquinado lineales de 100 y 200 μm .	89
Figura 6.5.13. Flujo de electrolito para pruebas de maquinado lineal con profundidad de 100 y 200 μm .	90
Figura 6.5.14 Prueba de maquina lineal con inclinación de 8.9° al inicio del proceso (A), transcurrido un periodo de tiempo de maquinado (B).	91
Figura 6.5.15 Puntos de medición para prueba lineal con inclinación de 8.9° y 250 μm de profundidad.	92
Figura 6.5.16 Corriente de maquinado para prueba lineal con inclinación de 8.9° y profundidad de 250 μm .	94
Figura 6.5.17. Micrografía de la prueba de maquinado lineal de 8mm con inclinación de 8.9°.	95
Figura 6.5.18. Voltaje de polarización de la prueba de maquinado lineal con inclinación de 8.9°.	96

1 INTRODUCCIÓN

En el ámbito de las técnicas de manufactura no convencionales se encuentra el proceso de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar. Este proceso se utiliza, en términos generales, para la remoción de material en piezas metálicas conductoras mediante la aplicación de pulsos de voltaje de polarización entre la herramienta y la pieza de trabajo, conectadas respectivamente al cátodo y al ánodo de la fuente de voltaje. Para llevar a cabo la remoción de material, es necesario contar con una separación en la escala de los micrómetros y un flujo continuo de electrolito entre ambas.

Cabe destacar que esta descripción general no profundiza en la complejidad y en las condiciones específicas que deben cumplirse para lograr un proceso satisfactorio. Actualmente, uno de los mayores desafíos es minimizar el efecto de sobre corte, un indicador cuantitativo que se determina por el exceso de tamaño en el maquinado final en comparación con las dimensiones de la herramienta utilizada. Este indicador es determinante para la precisión del maquinado y, por lo tanto, es prioritario en esta investigación.

Tras realizar experimentos y revisar la literatura existente, así como basándose en la línea de investigación adoptada a lo largo de varios años, se incorporan el error de la pendiente de la corriente de maquinado, el voltaje de polarización, el flujo de electrolito y la presión del sistema de inyección de aire como parámetros de evaluación para una técnica de control multicriterio. Como variables de salida, se tiene a la distancia inter-electrodos, el voltaje de polarización y el control del ciclo de trabajo de las bombas encargadas del suministro de electrolito e inyección de aire. Dicha técnica de control se ha evaluado y validado en una estación compacta de micro maquinado electroquímico pulsado diseñada para procesos de manufactura no convencional.

Las características mecánicas de esta estación permiten una resolución del sistema mecánico que posibilita el desplazamiento de la herramienta de trabajo en un rango de 1.25 a 10 μm , una escala en la que no se había podido trabajar anteriormente debido a las limitaciones mecánicas de los sistemas utilizados. Además, la estación incorpora sistemas de filtrado, recirculación de electrolito, inyección neumática y monitoreo simultáneo de múltiples variables de entrada. Se presenta información durante el proceso sobre la

evolución de las variables eléctricas, el flujo de electrolito y la presión del aire suministrado al proceso. Los datos de las variables de entrada y salida se almacenan y procesan en un sistema embebido."

La contribución principal de esta investigación es la propuesta de una técnica de control multicriterio basada en parámetros como el error de la pendiente de la corriente de maquinado, el voltaje de polarización, el flujo de electrolito y la presión del sistema de inyección de aire. Esta técnica permite controlar la distancia inter-electrodos, el voltaje de polarización y el ciclo de trabajo de las bombas en una estación de micro maquinado electroquímico pulsado, mejorando la precisión y ampliando la resolución mecánica permitiendo realizar maquinados a una escala menor.

Finalmente, cabe mencionar que esta investigación encuentra aplicación en los procesos de manufactura no convencional, específicamente en el micro maquinado electroquímico pulsado bipolar (PECM) y sus variantes. La técnica de control propuesta y validada en la estación de micro maquinado electroquímico pulsado permite realizar trabajos de alta precisión en piezas metálicas conductoras, mejorando la calidad y eficiencia de los procesos de remoción de material a una escala de micrómetros.

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Antecedentes

El desarrollo de técnicas de control para los procesos de manufactura avanzados se ha convertido en un desafío debido a la naturaleza de estos. Mientras algunos investigadores se centran en el perfeccionamiento en la obtención de barrenos, otros están incursionando en maquinados con geometrías específicas o de formas complejas, donde los resultados, si bien son aceptables, pueden ser mejores esto al desarrollar técnicas de control que tengan la capacidad de generar maquinados de la forma, longitud y profundidad deseada.

Las técnicas de manufactura avanzada, como el maquinado electroquímico y sus variantes, han surgido para satisfacer la demanda de piezas con características especiales en términos de material, tamaño y forma. Estas técnicas se han convertido en una alternativa a los métodos de manufactura tradicionales y también se implementan como técnicas complementarias en procesos convencionales. En el pasado, la fabricación de estas piezas era compleja y costosa, ya que se requería la creación de moldes específicos para su producción. Sin embargo, con el avance de las técnicas de manufactura no convencional, ahora es posible fabricar piezas con geometrías específicas de manera más rápida y económica. Estas técnicas de manufactura avanzada emplean sistemas computacionales que permiten al usuario ingresar los parámetros esenciales, dejando que el sistema actúe de manera autónoma. Esto ha simplificado el proceso de fabricación y ha reducido los costos asociados. Ahora es posible producir piezas personalizadas de forma más eficiente y flexible, lo que ha llevado a un aumento en la adopción de estas técnicas en diferentes industrias.

Como un ejemplo de lo anteriormente expuesto se analiza el trabajo titulado “*Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico*” (Catarino Aguilar, 2017), donde se desarrolla un sistema computacional que implementa un proceso de maquinado electroquímico (ECM). Dicho sistema es capaz de llevar a cabo una remoción de material controlada mediante la estimación de la distancia inter-electrodos; esto es posible debido a que el sistema toma la magnitud de las variables de voltaje de polarización y corriente de maquinado para

estimar en todo momento la distancia inter-electrodos y de esta manera mantenerla en aproximadamente 480 μm . El control del proceso se basa en dos condiciones, si la corriente de maquinado se eleva, significa que la distancia inter-electrodos disminuyó, por lo contrario, si la corriente de maquinado disminuye, se entiende que la distancia aumentó, y es mediante estas dos condiciones que el sistema determina en qué momento subir o bajar la herramienta de trabajo. El sistema permite realizar barrenos ciegos y maquinados lineales y/o de forma rectangular donde el usuario requiere ingresar los parámetros de profundidad y longitud deseada a través de una interfaz gráfica.

Trabajos como el anterior incursionan en el campo de la manufactura avanzada usando sistemas computacionales para controlarlos y obtener maquinados complejos, sin embargo, no se está exento de limitantes como lo es el tamaño del electrodo, o las imperfecciones y malformaciones que se presentan al final del maquinado. Esto debido a la misma naturaleza del proceso, es por ello por lo que investigadores del área han optado por enfocar su trabajo en determinadas secciones de los sistemas tal es el caso de Martínez-Alvarado R. (Martinez Alvarado, et al., 2015), quien en su trabajo titulado *“Pulsed Power Supply for Electrochemical Machining”* se enfoca en el desarrollo y validación de una fuente de voltaje en configuración de medio puente cuya frecuencia de trabajo puede ser variada en el intervalo de 20 kHz a 100 kHz. Su objetivo es comparar los resultados que se obtienen al emplear una fuente de voltaje de corriente directa con una que suministra voltaje pulsado. Se valida su viabilidad al generar barrenos, donde en su experimentación se realizaron barrenos ciegos y se demostró que al implementar una fuente pulsada las deformaciones en el diámetro final se reducen en un 14 %. Sin embargo, la frecuencia de la fuente pulsada es la misma desde el inicio hasta el final del proceso y deja la oportunidad de evaluar la posibilidad de implementar dicha fuente en un sistema computacional que reajuste la frecuencia de la fuente dependiendo de las condiciones y las imperfecciones físicas de la pieza de trabajo y la evolución del proceso de maquinado.

Los procesos de manufactura avanzada como el ECM y el maquinado por electroerosión (EDM, *Electrical Discharge Machining*) son complejos de controlar debido a que se trabajan en el orden de los micrómetros y se involucran múltiples variables físicas para su implementación. El uso de técnicas de control tradicionales no es viable debido a que el

comportamiento del proceso no es lineal; es por ello por lo que algunos investigadores evalúan la posibilidad de implementar técnicas de control no lineales como las redes neuronales, que ayudan a modelar el proceso para una posible incorporación en un sistema de control.

Por ejemplo, el trabajo *“Predicting Material Removal Rate of Electrical Discharge Machining (EDM) using Artificial Neural Network for High gap current”*, (Trias, et al., 2011) donde usan una red neuronal para predecir la cantidad de material removido en un proceso de maquinado por descarga eléctrica. El objetivo de esta investigación fue el de comparar los resultados de la implementación de la red neuronal con los resultados reales del maquinado. Para ello desarrollaron una red neuronal que acepta cuatro criterios de entrada: la corriente de maquinado, el tiempo de encendido de la fuente, el tiempo de apagado y la frecuencia. En su capa oculta, la red neuronal cuenta con tres neuronas y como salida se obtiene la tasa de remoción de material. Los investigadores hacen énfasis en la importancia del diseño de la red neuronal, ya que el número de neuronas y capas incorporadas influyen directamente en los resultados. En su experimentación, estos investigadores usaron 22 muestras provenientes de experimentos usando EDM, de las cuales 19 se usaron para entrenar la red neuronal y tres para validación de esta. En comparativa, la tasa de remoción que predijo la red neuronal con los resultados reales difiere en un rango del 1 al 5%, lo cual indica que es candidata para implementación en un sistema computacional. Si bien la técnica se empleó para un proceso EDM se podría ajustar a un proceso ECM usando la corriente de maquinado, el área expuesta y el tiempo de exposición entre la pieza y la herramienta de trabajo y de esa manera predecir la cantidad de material removido y con ello determinar la velocidad de avance de la herramienta de trabajo. Sin embargo, se requiere una cantidad de muestras mayor para entrenar y validar la red neuronal, además de que la red neuronal no considera que algunas piezas presentan deformaciones o perturbaciones físicas en su superficie lo cual pondría en riesgo el sistema ante la posibilidad de un corto circuito originado por el contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo.

Debido a la naturaleza y características que conforman a los procesos de maquinado electroquímico, los investigadores involucrados en el área han adoptado y establecido

parámetros propios basados en su conocimiento y experiencia. De este modo, parámetros como: voltaje de polarización, corriente de maquinado, concentración del electrolito, frecuencia de la fuente pulsada, ciclo de trabajo, velocidad de flujo del electrolito y distancia inter-electrodos, han sido auto establecidos sin estipular un estándar o parámetros idóneos para que los procesos se realicen adecuadamente, ignorando la necesidad de contar con parámetros validados resultantes de una caracterización y experimentación previa (Altena & De Silva, 2012).

Ante el avance de la tecnología, ha sido posible que múltiples investigadores puedan desarrollar técnicas basadas en *soft computing*, como las redes neuronales (Kasdekar, et al., 2018) (Kumar & Sahoo, 2014) (Xu , et al., 2014) (Shang & Sun, 2008), que son capaces de tomar como base de aprendizaje las magnitudes de las variables involucradas en los procesos de maquinado electroquímico, y con ello determinar el valor ideal de estos parámetros. Si bien es cierto que en cada trabajo se enfocan en un criterio específico, el tener como referente a todos, brinda la posibilidad de poder interrelacionar sus hallazgos, de tal manera que se puede crear un sistema que tome a consideración sus resultados y así no tener la necesidad de hacer una experimentación para cada caracterización. Poder implementar técnicas de esta naturaleza en trabajos previos y así obtener parámetros ideales de configuración para trabajos futuros resulta tentador, no obstante, se requiere una cantidad considerable de datos para poder entrenar a una red neuronal y así confiar en el resultado que esta genere.

En el trabajo “*Caracterización de Proceso de Maquinado Electroquímico por Pulsos (PECM)*” (Gallegos Miranda, et al., 2018) presentan los resultados de una caracterización del proceso de maquinado electroquímico por pulsos, permitiendo conocer bajo qué criterios de configuración el proceso se realiza de forma adecuada. Para tal fin, se realizaron diversos experimentos usando acero estructural AISI-1018, aplicando pulsos de 10 a 50 kHz, en intervalos de 10 kHz, manteniendo el voltaje de polarización constante en 5 V y un ciclo de trabajo ajustable entre 25 y 50%. Como electrolito utilizaron una solución acuosa de cloruro de sodio ($H_2O + NaCl$) en una concentración en masa del 16.6 %. El objetivo consistió en comprobar si al usar una fuente pulsada con frecuencia y ciclo de trabajo ajustables, el efecto de sobre corte (comúnmente presente al usar una

polarización con corriente directa) se reducía y en qué porcentaje. Para ello, se realizaron diez pruebas distintas: cinco de ellas con un ciclo de trabajo al 25 % y otras cinco al 50 %, iniciando con pulsos a 10 kHz y aumentando en cada prueba 10 kHz. Para comparar los efectos resultantes, se maquinaron barrenos ciegos con una fuente CD (corriente directa), donde el sobre corte obtenido fue de 1 mm (punto de referencia). Cada prueba duró 5 min y en cada una de ellas se pudo confirmar que el efecto de sobre corte se redujo significativamente, ya que sus resultados determinaron que al usar un ciclo de trabajo al 50 % y aplicando pulsos a 40 kHz, el efecto de sobre corte se reduce en un 47 %. Incluso si se aplican pulsos a mayor frecuencia, el efecto de sobre corte se mantiene aproximadamente en el mismo orden de magnitud. Con esta caracterización se tiene la certeza de los parámetros de los cuales se puede partir; si bien, las pruebas se aplicaron a barrenos ciegos, es posible aplicar esta misma configuración a maquinados lineales y poligonales, y dependiendo de las irregularidades de la pieza, poder reajustar la frecuencia de los pulsos a lo largo de la trayectoria del maquinado para de esa forma obtener una remoción controlada con el mínimo de sobre corte posible.

Mientras algunos investigadores tratan de abarcar el todo de un problema, otros se centran en un segmento específico del mismo, como sucede en el trabajo *“Tube electrode high-speed electrochemical discharge drilling using low-conductivity salt solution”* (Zhang, et al., 2015), donde con su experimentación logran comprobar que la concentración del electrolito así, como la velocidad del flujo, intervienen considerablemente durante un proceso de maquinado por descarga, llegando a la conclusión que de usarse un electrolito con alta conductividad, la herramienta de trabajo sufre un desgaste mayor así como una mayor remoción de material en lugares no deseados, causando deformidades o sobre corte excesivo en la pieza de trabajo.

El modelar los procesos de maquinado no convencional y así conocer su funcionamiento abre la posibilidad de predecir su comportamiento para obtener mejores resultados, por lo que el modelado por diversas técnicas se ha convertido en el objetivo de estudio en diversas investigaciones debido a que las variables involucradas tienden a cambiar su magnitud ante la mínima perturbación y presentan comportamientos no lineales. Diversos investigadores buscan en las técnicas de modelado no lineal esta respuesta, como lo

presentado en el trabajo “*Optimization of Material Removal Rate in Electrical Discharge Machining Using Fuzzy Logic*” (Kohli, et al., 2012) en donde se implementa una técnica difusa para la estimación de la tasa de remoción de material en un proceso de maquinado por descarga eléctrica. Su planta está basada en el modelo Mamdani y recibe tres parámetros de entrada, los cuales son: la corriente de descarga, el tiempo del pulso en alto, y el tiempo del pulso en bajo. Integra seis reglas de pertenencia que fueron establecidas basándose en experimentación empírica previa y son las encargadas de evaluar los criterios de entrada y determinar la tasa de remoción de material. Utilizaron acero al carbón AISI 1040 y un electrodo de cobre como electrodos. El sistema difuso fue evaluado usando el software Matlab y comparándolo con pruebas reales usando los mismos criterios de configuración en barrenos ciegos. Los resultados de tales experimentos son muy prometedores ya que el modelo difuso probó tener una predicción de remoción de material en un 97.36 % de similitud con las pruebas experimentales reales lo cual deja en claro que el implementar la lógica difusa es viable en este tipo de procesos no convencionales.

En la literatura especializada se han encontrado investigaciones que implementan técnicas de control y las contraponen con las pruebas reales de la experimentación; sin embargo, son muy pocos los que implementan dichas técnicas en un sistema operando en tiempo real. En el trabajo “*Control de la distancia inter-electrodos en un proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos (PECMM)*” (Gallegos Miranda, et al., 2019) usan una técnica de control difuso en un sistema computacional que implementa micro maquinado electroquímico por pulso (PECMM, *Pulsed Electrochemical Micro - Machining*). Su planta está basada en el modelo Mamdani y como criterio de entrada toma la corriente de maquinado que se usa para estimar indirectamente la distancia inter-electrodos. Luego, implementa tres reglas de pertenencia que se encargan de mantener la distancia inter-electrodos en 240 μm . La respuesta o salida de la planta es la elevación o descenso de la herramienta de trabajo, con la finalidad de mantener constante la distancia antes mencionada. Para su experimentación, se usó acero estructural AISI-1018 como pieza de trabajo y un electrodo de 700 μm de diámetro como herramienta. Como electrolito se utilizó una mezcla de $H_2O + NaCl$ en una concentración de masa del 16.6 %. Los parámetros de la fuente de voltaje fueron: amplitud de 5 V, pulsos a una frecuencia de 40 kHz y un ciclo de trabajo al 50%. La prueba experimental se basó en realizar

maquinados lineales, haciendo pasar el electrodo en una trayectoria lineal sobre canales verticales de 3.17 mm de ancho. El control implementado en el sistema computacional logró ajustar dinámicamente el desplazamiento, así como la elevación y descenso de la herramienta de trabajo ante estas perturbaciones físicas, ya que mientras realizaba el avance lineal y se presentaba una imperfección, el control difuso sube o baja la herramienta de trabajo, siempre manteniendo la distancia inter-electrodos en aproximadamente 240 μm , generando una remoción de material uniforme a lo largo de la trayectoria del maquinado.

Investigaciones como la anterior reiteran que el uso de lógica difusa para controlar un proceso de maquinado de esta naturaleza es viable. También validan que al implementar una fuente pulsada para el proceso como se hace en (Han, et al., 2018), se reduce el efecto del sobre corte en un 20 %, lo que mejora el acabado final del maquinado. Si bien el sistema proporciona resultados prometedores, el control difuso solo implementa un criterio de entrada y un solo criterio de salida, lo cual puede ser complementado y obtener un control aún más eficiente.

Conocer a detalle el comportamiento del proceso de maquinado electroquímico es de vital importancia, para que de esta forma se pueda predecir y ajustar el proceso de maquinado, conociendo la magnitud de las variables de interés y así obtener mejores resultados en los maquinados. Por esto, se han desarrollado trabajos como el presentado por (Rama Rao, et al., 2009), denominado “*Fuzzy Logic-Based Forward Modeling of Electro Chemical Machining Process*”, donde se presenta un modelo para predecir la tasa de remoción de material (también identificada por sus siglas, MRR, *Material Removal Rate*) y la rugosidad del acabado final en un proceso de maquinado electroquímico. Esto se realiza mediante la implementación de un sistema basado en lógica difusa, particularmente un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO, *Multiple Input – Multiple Output*). Dicho sistema tiene como entrada los parámetros: corriente de maquinado, voltaje de polarización, flujo del electrolito, distancia inter-electrodos; por otro lado, como salidas están: la tasa de remoción de material y la rugosidad del acabado final. El objetivo es que el modelo desarrollado pueda predecir estos dos últimos criterios lo más certero posible; para ello, usa un algoritmo genético que es empleado para elegir los parámetros

iniciales idóneos (Ravikumar, et al., 2008). Estos parámetros son adoptados por el modelo difuso y haciendo uso de 81 reglas de las que está compuesto el modelo. Para la validación se usó una base de conocimiento de 130 elementos provenientes de pruebas realizadas por el investigador, y con el uso del algoritmo genético se eligieron los parámetros iniciales para el proceso. Luego, con el modelo difuso fue posible estimar la tasa de remoción y la rugosidad. Estos resultados fueron comparados con los de maquinados reales que emplearon los mismos criterios que el modelo difuso, mostrando que la similitud entre los resultados predichos y obtenidos en la prueba dieron fue del 91 al 94%, dejando en claro que un modelo basado en lógica difusa genera resultados prometedores. Sin embargo, este modelo no considera las variaciones ni modificaciones que pueden sufrir las variables de interés durante el proceso, lo cual deja la oportunidad de implementar estas herramientas como técnicas de control en un sistema que lleve a cabo el proceso de maquinado lo más cercano al tiempo real.

Múltiples técnicas de *soft computing* han sido empleadas para poder desarrollar un modelo que describa eficazmente el comportamiento del proceso de maquinado electroquímico. Jeba rajan et. al. (2014) realizan un análisis de diferentes técnicas de *soft computing*, identificando las ventajas y desventajas que cada una presenta, no solo para modelar y predecir resultados, si no para optimizar y determinar los valores ideales para que el proceso se pueda llevar a cabo de una forma eficaz. Los autores concluyen que, para controlar un proceso de maquinado electroquímico y/o sus variantes, es necesario desarrollar sistemas híbridos que se apoyen de más de una técnica de control para que las deficiencias de una sean compensadas con las virtudes de la otra. Asimismo, se menciona la importancia de evaluar técnicas de control no empleadas hasta el día de hoy, esto debido a que, si bien los procesos de manufactura no convencional llevan años empleándose, pero es hasta tiempos actuales que las herramientas computacionales cuentan con la capacidad de hardware para desarrollar e implementar algoritmos de control que gobiernen los sistemas computacionales a cargo de los procesos de manufactura.

Las condiciones físicas, las sustancias químicas empleadas, las reacciones que ocurren durante el proceso entre otros factores han hecho que el desarrollar un modelo del proceso ECM sea necesario (Hinduja & Kunieda, 2013) y esto ha llevado también a explorar

nuevas técnicas de control para dicho proceso (Yusup , et al., 2012). En el trabajo “*Optimization of electrochemical machining process parameters: Combining response Surface methodology and differential evolution algorithm*” (Mehrvar, et al., 2016) se presentan los resultados obtenidos tras implementar un algoritmo de evolución diferencial, técnica poco usada en procesos de maquinado electroquímico y similares. Su objetivo, más que modelar, es encontrar los parámetros ideales bajo los cuales el proceso se puede desarrollar, y así optimizar al mismo, su algoritmo toma como entrada 4 criterios, voltaje de polarización, velocidad de descenso de la herramienta de trabajo, flujo y concentración del electrolito. Como salida, buscan maximizar la tasa de remoción de material y minimizar la rugosidad del acabado del maquinado. Para su experimentación, se usaron piezas metálicas de acero inoxidable y clorato de sodio ($NaClO_3$) como electrolito. Como base de conocimiento para entrenar a su algoritmo, emplearon datos provenientes de 31 pruebas realizadas empíricamente y estos datos fueron codificados mediante el software MATLAB. Para obtener los criterios ideales, se empleó una optimización multiobjetivo, donde en un principio se optimiza individualmente cada criterio y posteriormente se hace un cruzamiento para obtener los valores con los cuales se obtenga el valor deseado.

En el trabajo expuesto en el párrafo anterior, y tras la ejecución del algoritmo, se obtuvieron los valores de las 4 variables de interés, siendo: voltaje de polarización (24.78 V), velocidad de descenso de la herramienta de trabajo (0.49 mm/min), flujo del electrolito (6.84 L/min) y concentración del electrolito (134.15 g/L), estimando que la tasa de remoción de material es de (0.28 g/min) y la rugosidad del acabado final de 1.36 μm . Se obtuvo que la tasa de remoción de material en experimentos reales fue de 0.29 g/min, teniendo un margen de error de 3.45 % a la estimada mediante el algoritmo, mientras que la rugosidad del acabado final (1.43 μm) reportó un margen de error de 4.9 % a la estimada. Los resultados son muy prometedores el que se haya empleado y validado únicamente para barrenos, deja la oportunidad de considerar a esta técnica como candidata a implementación en maquinado lineales o compuestos, esto con el objetivo de obtener los parámetros ideales bajo los cuales llevar a cabo el proceso de maquinado.

Diferentes técnicas de *soft computing* han sido empleadas para intentar modelar, controlar u optimizar los procesos de maquinado electroquímico, donde técnicas como los

algoritmos genéticos, las redes neuronales, la lógica difusa, y el control clásico, entre otros, han sido validados como técnicas de control prometedoras. De todas estas, se puede concluir que es necesario desarrollar sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), ya que depender únicamente de una variable de entrada y generar una de salida no garantiza obtener los resultados deseados al momento de poner en funcionamiento el sistema; por ello se puede determinar que entre más variables de entrada tenga el sistema mejor serán los resultados.

Trabajos como (Asokan, et al., 2008) y (Yadav & Yadava, 2016), desarrollan sistemas multiobjetivo que permiten la entrada de múltiples variables, dentro de las que han destacado: voltaje de polarización, corriente de maquinado, flujo del electrolito, concentración del electrolito, tiempo del pulso de la fuente en alto y bajo, velocidad de movimiento de descenso. Por otro lado, como salida ambos tienen como objetivo maximizar la tasa de remoción de material y minimizar la rugosidad final del acabado del maquinado. Empleando técnicas como redes neuronales y algoritmos genéticos, pretenden encontrar una relación entre las variables involucradas y así determinar las condiciones óptimas del proceso. Al igual que los trabajos anteriores, Majumder A. (2014) realiza una comparativa de 3 algoritmos mediante el uso de una red neuronal y así optimizar los valores de la configuración inicial en un proceso de maquinado electroquímico.

Estos trabajos comparten la peculiaridad de que, para poder ejecutar los algoritmos y técnicas propuestas, se realiza mediante software y hardware externo, validando estos datos con pruebas donde el valor de las variables de interés no sufre cambios durante el proceso, considerando que el mismo es prácticamente estático durante su ejecución. Coinciden que al implementar múltiples variables de entrada e interrelacionarlas se puede mejorar considerablemente los resultados de los maquinados.

Contar con modelos, técnicas de control teóricas u optimización de procesos de maquinado electroquímico o similares no es suficiente. Se deben diseñar y desarrollar máquinas capaces de implementar dichas técnicas. Estas máquinas deben ser capaces de adquirir las variables de interés, monitorearlas y controlar el proceso en tiempo real, y así generar los resultados deseados, controlando el desplazamiento de la herramienta de trabajo y al mismo tiempo deben cumplir los criterios y parámetros de seguridad, como lo

son sistemas de protección que eviten corto circuito durante el proceso, diagnóstico de fallas, funcionar automáticamente sin la intervención de un usuario durante el proceso, contar con indicadores visuales que muestren en todo momento el estado del proceso y en su caso indicadores para el caso que se presente una posible falla (Chen, et al., 2008), (Zhang , 2010).

Ante la complejidad de incorporar técnicas de control, algunos investigadores han optado por desarrollar procesos de maquinado tomando únicamente como referencias constantes la velocidad de descenso de la herramienta de trabajo y/o mantener la distancia inter-electrodos fija basados en modelos de estimación, tal como lo hacen en (Saranya & Ravi Sankar, 2020) y (Abou Ziki & Wüthrich, 2015). Sin embargo, realizar el proceso de esta manera puede generar errores en profundidad, sobre corte excesivo, y rugosidad en el acabado final del maquinado; tampoco se considera que durante el proceso de maquinado se pueden presentar fenómenos físicos que pueden alterar el proceso. Uno de ellos es la aparición de burbujas de hidrógeno que se acumulan en la periferia y contorno de la herramienta de trabajo, tal como se presenta en (Shimasaki & Kunieda, 2016), donde se aborda la problemática que generar dichas burbujas ya que no pueden ser desplazadas por el mismo electrolito que fluye entre la herramienta y pieza de trabajo, a causa de un fenómeno físico denominado cavitación. Ante esta problemática, se sugiere incorporar una solución que permita retirar dichas burbujas sin interferir con el proceso de maquinado.

Debido a las ventajas que brindan los procesos de manufactura no convencional como el maquinado electroquímico, es más frecuente encontrarse con trabajos donde se propone el diseño y desarrollo de maquinaria capaz de realizar el proceso de manera automática, empleando herramientas de características industriales. Tal es el caso del trabajo titulado *“The design and implementation of ECM control system”*, (Chen , et al., 2014) que presenta un sistema de control para maquinado electroquímico usando un PLC (Controlador Lógico Programable) justificando su uso en la flexibilidad y facilidad de implementación y programación. El sistema implementa el PLC Siemens S7-224XP, drivers y servomotores compatibles con este módulo, para el proceso implementa una fuente de corriente directa y para la interfaz de usuario e interacción el módulo PC

UFP6310. Se incorpora un control condicional, en el que básicamente se cargan los parámetros de voltaje y corriente de maquinado, se establece la distancia inter-electrodos inicial y se inicia el proceso. La velocidad de descenso de la herramienta de trabajo es un parámetro constante, obtenido de manera empírica. En caso de que exista un contacto entre la herramienta y pieza de trabajo, el sistema eleva la herramienta hasta su distancia inter-electrodos inicial y el proceso continúa.

Una estrategia similar se presenta en el trabajo *“Design of the CNC System for Vertical Electrochemical Machining Tool Based on Siemens 802Dsl”* (Yang, 2017) que propone el diseño de un sistema de maquinado electroquímico empleado herramientas de carácter industrial como los PLC Siemens, así como sus accesorios. En este caso propone que su sistema será capaz de monitorear las variables de voltaje de polarización y corriente de maquinado, teniendo un funcionamiento condicional basado en el corto circuito entre la pieza y la herramienta de trabajo, activando y desactivando el descenso de la herramienta de trabajo y la activación o desactivación de la fuente de voltaje. El autor menciona la peculiaridad que su sistema tiene la capacidad mecánicamente de desplazarse sobre los 3 ejes del plano cartesiano; sin embargo, no presenta validación del uso de estos.

Ambos trabajos están orientados a aplicaciones de corte y barrenado en el orden de los centímetros, y una de las mayores desventajas es que su funcionamiento se basa en el uso de elementos de software y hardware comerciales compatibles entre ellos, sin la posibilidad de tener acceso al código fuente o diagramas eléctricos para realizar adecuaciones, siendo esto una desventaja ante una falla, actualización o mejora.

Cuando se trata del control en procesos de maquinado no tradicional, existen diversas alternativas y aplicaciones para el mismo proceso. Algunos investigadores se centran en el control de la distancia inter-electrodos, mientras que otros se enfocan en el control de la fuente de voltaje. Otros investigan el control del descenso y movimiento controlado de la herramienta de trabajo. Sin embargo, también hay investigadores experimentando con la inyección del electrolito, como se muestra en el estudio realizado por (Fang, et al., 2014), donde se prueba un método experimental de inyección lateral de electrolito. Este sistema es robusto y eficiente para eliminar los residuos generados durante el proceso, pero resulta ineficaz para maquinados que requieren mayor profundidad y/o movimientos

compuestos. Un caso similar se presenta en la referencia (Guixian , et al., 2019), donde se propone el uso de un sistema de inyección y succión de electrolito simultáneo. Esta técnica permite suministrar la cantidad ideal de electrolito entre la herramienta y la pieza de trabajo. Sin embargo, debido al tamaño y las características del sistema, está limitado a operar en el rango de centímetros.

A pesar de las limitaciones de estas propuestas, estas investigaciones han revelado la importancia de considerar el flujo del electrolito que circula entre la herramienta y la pieza de trabajo como un criterio relevante. La capacidad de incorporar este criterio en una técnica de control proporcionaría la capacidad de monitorear y mantener el flujo de electrolito dentro de un intervalo óptimo que contribuya a la mejora de los resultados. Sin embargo, es importante continuar investigando en este campo para desarrollar soluciones que superen las limitaciones actuales y logren una mayor eficacia y aplicabilidad en el maquinado electroquímico.

2.2 Conclusiones de la revisión de la literatura

Los estudios analizados en el apartado previo abordan diversas técnicas para controlar el proceso de maquinado electroquímico y sus variantes. Algunos utilizan enfoques de lazo abierto o controles basados en la linealidad predicha por modelos cuasiexperimentales desarrollados. Otros se centran únicamente en algunas de las variables involucradas en el proceso. Sin embargo, es escaso el número de trabajos donde se incorporan múltiples variables de entrada y salida.

Dentro de las variables analizadas en diversos trabajos, se determina que el flujo del electrolito, la pendiente de la corriente de maquinado y la presión del aire suministrado al proceso tienen un impacto directo en la velocidad y remoción de material. Además, las perturbaciones físicas en la pieza de trabajo, los desechos y los remanentes del proceso de maquinado pueden interferir o detener el proceso.

La incorporación de sistemas de control de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) basados en lógica difusa no solo permite detectar de manera más eficiente estas perturbaciones, sino también ajustar dinámicamente las variables de salida durante el

proceso. Esto proporciona un control preciso de la remoción de material, permitiendo obtener maquinados con la longitud, geometría y profundidad deseadas, al mismo tiempo que se minimiza el efecto de sobre corte. Al contar con una herramienta especializada diseñada y desarrollada para estos procesos, se realiza una contribución significativa al campo de la manufactura avanzada, apoyada por las Ciencias Computacionales. Esto abre la posibilidad de explorar variantes del maquinado electroquímico y su control mediante técnicas de *soft computing*.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 Definición del problema

La literatura especializada como la presentada en (Saranya & Ravi Sankar, 2020) y (Abou Ziki & Wüthrich, 2015), aborda el proceso de maquinado electroquímico en la manufactura avanzada y destaca la problemática y la necesidad de contar con una técnica de control que garantice una remoción de material controlada, la minimización del sobre corte (DOC por las siglas en inglés de *Diameter Over Cut*), la uniformidad del acabado final del maquinado y la capacidad de generar maquinados con formas complejas mediante el proceso de maquinado electroquímico pulsado.

Implementar un control en un proceso en escala micrométrica es un desafío debido a las diferentes variables involucradas y la complejidad de monitorear correctamente su magnitud. Estas variables cambian constantemente durante todo el proceso y son susceptibles a perturbaciones generadas por el propio proceso de maquinado. Ajustar dinámicamente los parámetros de salida simultáneamente aumenta la complejidad, ya que están correlacionados y ajustar uno implica compensar y ajustar todos los parámetros involucrados.

Adicionalmente, es de vital importancia contar con la infraestructura física y los componentes electrónicos necesarios para el monitoreo y control de los criterios de entrada y salida. Esto permitirá validar de manera práctica el correcto funcionamiento de la técnica de control desarrollada.

3.1.1 Preguntas de investigación

Con esta investigación, se pretende dar respuesta a las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son las técnicas de control que se han implementado en los procesos de manufactura avanzada similares al ECM?
2. ¿Qué variables inmersas en el proceso son vitales para la técnica de control?
3. Al conocer a detalle las características y condiciones que rigen al proceso de maquinado electroquímico pulsado, ¿Cómo es posible integrarlas dentro de una

técnica de control para ser implementadas en un sistema de cómputo y así generar maquinados de profundidad, longitud y geometría deseada?

4. ¿Con que características y parámetros debe contar un sistema asistido por computadora para poder controlar y desarrollar satisfactoriamente un proceso de maquinado electroquímico?
5. ¿El control basado en lógica difusa puede ser considerado como candidato para ser implementado en el sistema computación propuesto?

3.2 Objetivos de investigación

3.2.1 Objetivo general

Desarrollar un algoritmo de control de múltiples criterios de entrada y de salida, empleando técnicas de *soft computing*, que permita reajustar los parámetros involucrados en un proceso de maquinado electroquímico y del sistema mecánico encargado del desplazamiento de la herramienta de trabajo, para mejorar los criterios resultantes, tales como, tasa de remoción de material, uniformidad final del maquinado, distancia inter-electrodos y desplazamiento de la herramienta de trabajo.

3.2.2 Objetivos específicos

Para el cumplimiento del objetivo de la investigación, se plantean los siguientes objetivos particulares:

1. Desarrollar la instrumentación electrónica y la adquisición e interpretación de datos hacia la computadora para monitorear las variables; corriente de maquinado, voltaje de polarización, flujo de electrolito y presión de aire involucradas dentro del proceso de maquinado electroquímico pulsado (PECM).
2. Implementar una estación de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar en la cual sea posible el llevar a cabo un proceso de maquinado electroquímico.
3. Caracterizar el proceso de maquinado electroquímico pulsado para determinar la correlación que existen entre el flujo de electrolito, presión de aire, pendiente de

la corriente de maquinado y la remoción de material, así como con el sobre corte resultante.

4. Desarrollar el algoritmo de control multicriterio implementando lógica difusa adecuado a las restricciones físicas y mecánicas tanto del proceso de maquinado electroquímico como de la estación compacta de micro maquinado.
5. Implementar el algoritmo en la estación compacta de micro maquinado.
6. Evaluar el sistema comparando los resultados con el histórico de pruebas y versiones anteriores.

3.3 Justificación

En la actualidad, se han desarrollado diversas estrategias de control basadas en *soft computing*, como algoritmos genéticos, redes neuronales, algoritmos evolutivos y lógica difusa, que han demostrado ser alternativas prometedoras para modelar, controlar u optimizar procesos similares al maquinado electroquímico. Algunas de estas estrategias se enfocan en determinar los parámetros ideales para el correcto funcionamiento del proceso de maquinado, mientras que otras buscan optimizar criterios como la tasa de remoción, el funcionamiento de la fuente de voltaje o la reducción de la rugosidad del acabado final del maquinado.

Sin embargo, son escasas las técnicas de control que actualmente implementan sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Además, estas técnicas solo se aplican a maquinados de corte vertical y generación de barrenos ciegos, y algunas de ellas solo se utilizan para maquinados de dimensiones superiores a los centímetros y algunos milímetros, empleando sistemas robustos en términos de hardware y software.

Por tanto, se plantea el desarrollo de un algoritmo de control MIMO utilizando técnicas de *soft computing*. Este algoritmo será capaz de recibir e interpretar las variables de corriente de maquinado, voltaje de polarización y flujo de electrolito, y generará múltiples criterios de control como la distancia inter-electrodos, la elevación y descenso de la herramienta de trabajo, así como su movimiento lineal sobre la superficie de la pieza de trabajo. Además, ajustará los parámetros de la fuente pulsada relacionados con la

estimación indirecta de la distancia inter-electrodos, lo que permitirá lograr una máxima remoción de material, reducir el efecto de sobre corte y tener la capacidad de generar maquinados con geometrías compuestas.

3.4 Impactos

- Científico: El desarrollo de un algoritmo de control que mediante la adquisición e interpretación de las variables eléctricas del proceso de maquinado electroquímico pueda reajustar la distancia Inter electrodos, el flujo de electrolito para así, generar una remoción controlada de material, permitiendo al sistema ajustarse ante las perturbaciones o irregularidades físicas que presente la pieza de trabajo.
- Tecnológico. Diseñar, fabricar y validar el correcto funcionamiento de una estación compacta de micro maquinado electroquímico pulsado capaz de desplazar la herramienta de trabajo en el orden de los micrómetros sobre los 3 ejes del plano cartesiano, así como comandar un sistema de recirculación de electrolito, un sistema neumático de inyección de aire sobre la superficie de trabajo, monitorear y procesar la magnitud de las variables eléctricas involucradas dentro del proceso de maquinado electroquímico todo mediante la implementación del algoritmo de control desarrollado.

3.5 Hipótesis

Si se implementa un algoritmo de control desarrollado mediante técnicas de *soft computing*, que brinde la posibilidad de regular simultáneamente los diferentes parámetros de los que está conformado el proceso de maquinado electroquímico, se podrá mantener la tasa de remoción de material, el desplazamiento coordinado sobre el plano cartesiano de la herramienta de trabajo, el flujo de electrolito suministrado al proceso de maquinado y así obtener maquinados con una profundidad uniforme reduciendo el efecto de sobre corte.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Manufactura

El término manufactura fue visto por primera vez en 1567; derivado del latín *manu factus*, que significa “hecho a mano” (Real Academia Española, 2021). Puede ser definido como el proceso de fabricación de un producto realizado a mano o mediante asistencia de maquinaria especializada (Kalpakjian & Schmid, 2008). Dentro de la manufactura existen dos métodos para realizarla (Grover P., 2010):

1. Métodos de manufactura convencional: Procesos en los cuales la herramienta y pieza de trabajo tienen contacto directo, teniendo una fricción entre ambas, lo cual origina una pérdida de material generalmente mayor en la pieza de trabajo. Ejemplos de este tipo de procesos son: fresado, barrenado, pulido y torneado mecánico.
2. Métodos de manufactura no convencional: Procesos en los que la herramienta y pieza de trabajo no entran en contacto directo, sino que existe una remoción de material mediante transferencia de energía en un medio auxiliar. Ejemplos de estos procesos son: corte por láser o chorro de agua, maquinado por ultrasonido, maquinado por descarga eléctrica y maquinado electroquímico.

La demanda de piezas con acabados complejos y de alta dureza, como las empleadas en el área automotriz, médica y aeronáutica entre otras (Katsuhiko, 2008), (Tanzila , et al., 2017), también hacen atractivo el uso de procesos de manufactura no convencional.

4.2 Maquinado Electroquímico

El maquinado electroquímico (ECM) es un proceso de manufactura no convencional en el que se remueve material de una pieza de trabajo conductora de electricidad mediante la disolución anódica. Este proceso permite obtener una réplica negativa de la forma geométrica de la herramienta de trabajo en la pieza de trabajo. Para que el proceso se lleve a cabo de manera adecuada, es necesario mantener una separación entre la herramienta y la pieza de trabajo, conocida como distancia inter-electrodos, que se encuentra en el orden de algunas centenas de micrómetros. Esta distancia permite un flujo continuo de

electrolito, el cual favorece la disolución anódica (Katz & Tibbles, 2010). El electrodo que actúa como herramienta de trabajo también debe ser un metal conductor de electricidad, como el cobre, el bronce o el acero inoxidable, y comúnmente tiene una estructura hueca para permitir el flujo del electrolito a través de él.

El principio básico de un proceso de maquinado electroquímico puede observarse en la Figura 4.2.1, donde se presenta un sistema conformado por una fuente de voltaje (generalmente de corriente directa), donde la herramienta de trabajo se polariza negativamente (formando un cátodo), mientras que la pieza de trabajo se polariza positivamente (formando un ánodo); esta última se encuentra inmersa en un electrolito. En la Figura 4.2.1(A) se puede observar el estado inicial del proceso de maquinado electroquímico, mientras que la Figura 4.2.1(B) se muestra el proceso una vez que ha iniciado y lleva un tiempo realizándose el proceso de maquinado. Gráficamente se observa cómo ocurre la remoción de material, mientras la herramienta de trabajo avanza gradualmente penetrando en la pieza de trabajo, generando en esta la forma geométrica negativa de la herramienta de trabajo. También se puede observar cómo durante el proceso es de vital importancia mantener la distancia inter-electrodos, y de esta forma mantener una remoción de material constante.

Durante el proceso ECM se generan reacciones químicas propias de su evolución, resultado de la polarización entre el ánodo y el cátodo, un intercambio de iones entre los materiales de los cuales están compuestos tanto la herramienta, la pieza de trabajo y el propio electrolito que fluye entre ambos. A continuación, se presentan las reacciones que ocurren de forma típica considerando que la pieza de trabajo (ánodo) sea de un material compuesto en su mayor proporción de hierro, y que el electrolito sea una solución salina acuosa de $H_2O + NaCl$. Al someter tanto a la herramienta como a la pieza de trabajo a una diferencia de potencial estando inmersas en el electrolito, se separan en los compuestos que se muestran a continuación (Hassan & Gawad , 2005):



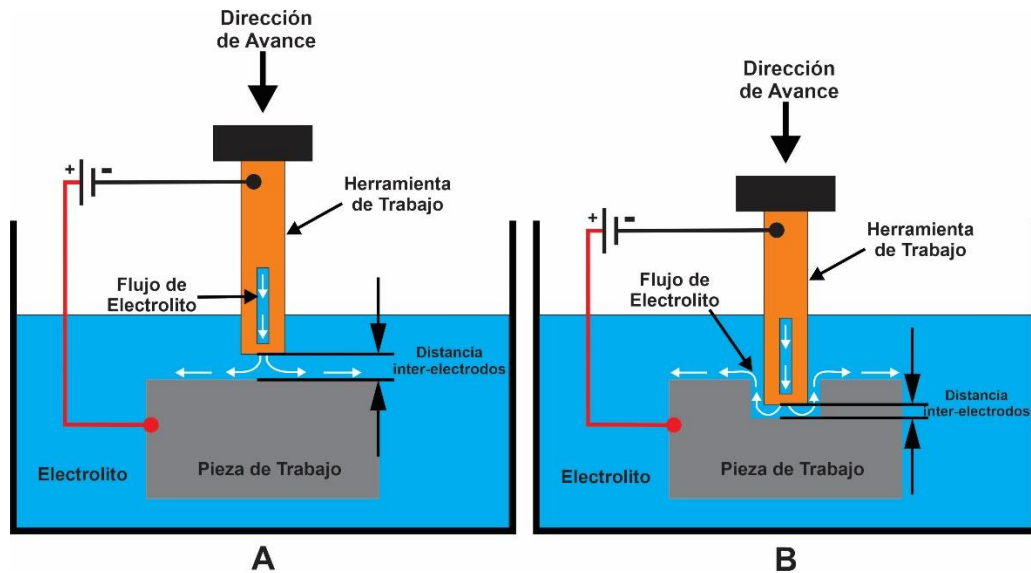


Figura 4.2.1 Principio de ECM (A) inicio del proceso (B) durante proceso.

Un intercambio de iones se presenta, favorecido por la diferencia de potencial entre herramienta y pieza de trabajo, que actúan como electrodos. Los iones positivos se mueven hacia la herramienta de trabajo, en tanto que los iones negativos se ven atraídos hacia la pieza de trabajo. Entre tanto, los iones de hidrógeno toman electrones de la herramienta de trabajo, liberando hidrógeno molecular, como se muestra enseguida:

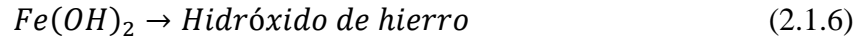


Los átomos de hierro de la herramienta de trabajo se desprenden de la estructura cristalina en la que se encuentran, formando la siguiente reacción química:



Después de que inicia el proceso de maquinado electroquímico se puede apreciar la aparición de compuestos parcialmente disueltos o formando precipitados. Estos compuestos son el resultado de la mezcla de los iones del acero con los iones del electrolito (Cl, Na, H, O) generando principalmente $FeCl_2$ (Cloruro ferroso) y $NaOH$ (Hidróxido de sodio), como se muestra enseguida:





Los compuestos antes mencionados se presentan en forma de residuos lodosos, cuya presencia es indicativo de que el proceso de maquinado electroquímico se está realizando de forma satisfactoria, ya que la pieza de trabajo está sufriendo pérdida de iones, lo cual representa una remoción de material de esta. En la Figura 4.2.2 se muestran, de manera representativa, las reacciones químicas antes descritas.

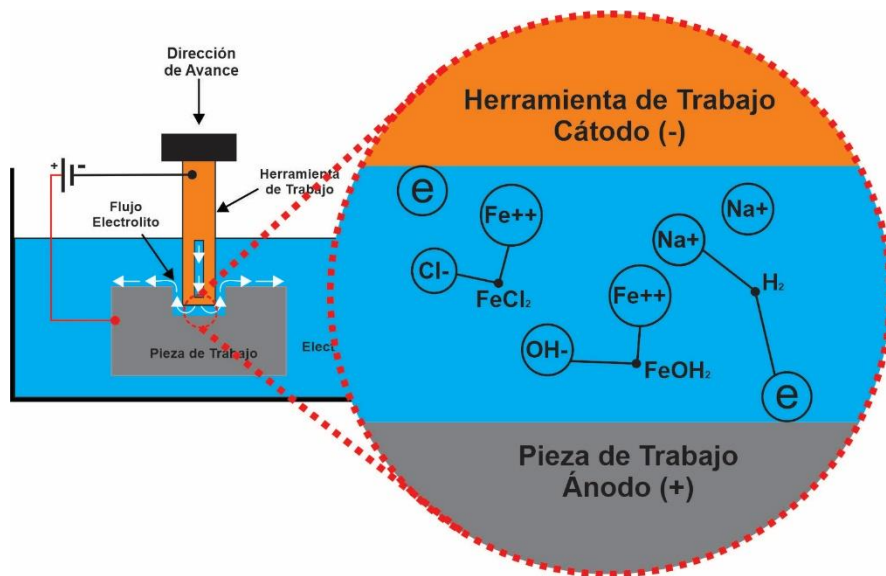


Figura 4.2.2 Representación de las reacciones químicas que ocurren durante el proceso ECM, promoviendo la remoción de material de la pieza de trabajo.

4.3 Componentes de un proceso ECM asistido por computadora

El desarrollo de sistemas que permitan realizar de forma automática los procesos de maquinado no convencional ha presentado un reto debido a las características que estos poseen. Esto ocurre porque para conocer la magnitud de las variables involucradas e inclusive conocer la distancia inter-electrodos no puede usarse alguna herramienta o instrumento de medición directamente colocado en la distancia inter-electrodos, a causa de que se trabaja en una distancia en el orden de los micrómetros. Por otro lado, posicionar un sensor directamente en la zona de trabajo no es del todo posible; sin embargo, debido

a los avances en la tecnología en términos de software y hardware, hoy es posible incorporar sistemas que de manera indirecta estimen la magnitud de estas variables y se correlacionen para ser ajustadas dinámicamente y así controlar los procesos de manufactura (Villagómez Galindo , et al., 2012) (Sun, 2009). Incorporar un sistema de cómputo a un proceso de maquinado electroquímico, brinda la posibilidad de trabajar en el orden de los micrómetros, mientras que posibilita el controlar simultáneamente parámetros como voltaje, corriente, movimiento de la herramienta de trabajo, distancia inter-electrodos y flujo del electrolito, entre otros.

Un sistema de maquinado electroquímico asistido por computadora está conformado de múltiples partes, misma que se mencionan en la siguiente lista (Parhami, 2007), y se ilustran gráficamente en la Figura 4.3.1:

1. Fuente de voltaje: es la encargada de proporcionar la energía para realizar el proceso de maquinado electroquímico, el voltaje puede estar dentro del rango de 1-100 V. Al hacer variar este parámetro, se presenta un cambio en la velocidad de remoción ya que, entre más voltaje y corriente, mayor es la velocidad de remoción de material, pero se incrementa el sobre corte.
2. Electrolito: disolución acuosa de ácidos, bases o sales, y es el encargado de que exista conductividad entre la herramienta y pieza de trabajo; este es el medio de transmisión de la energía y el catalizador de las reacciones químicas que producen la remoción del material de la pieza de trabajo.
3. Herramienta de trabajo: elemento metálico conductor hueco, fabricado en cobre, bronce, plata, entre otros, cuya función es la de realizar el proceso de maquinado, y por la cual en su interior fluye el electrolito; comúnmente se conecta al cátodo de la fuente de voltaje.
4. Pieza de trabajo: sección de metal conductora que se desea maquinar, la cual se conecta al ánodo de la fuente de voltaje.
5. Bomba(s) del electrolito: dispositivo encargado de mantener un flujo de electrolito durante el proceso de maquinado.
6. Sistema mecánico: conjunto de dispositivos encargados del libre movimiento de la herramienta de trabajo sobre los ejes del plano cartesiano.

7. Adquisición de datos: grupo de sensores encargados de obtener la magnitud de las variables de interés involucradas en el proceso de maquinado, tales como el voltaje de polarización y la corriente de maquinado.
8. Sistema de cómputo: encargado de interpretar los datos de la sección de adquisición de datos, evaluar y realizar el control del proceso de maquinado y controlar el sistema mecánico, entre otros sistemas secundarios.

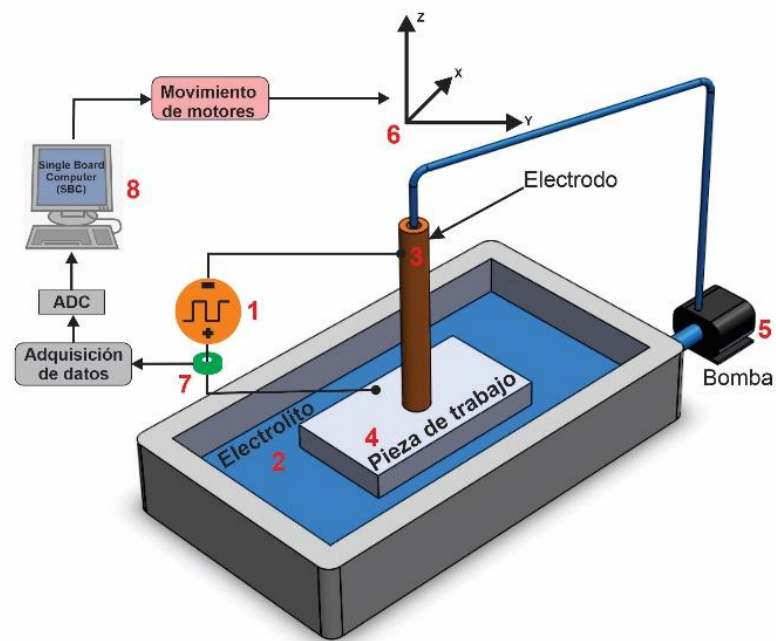


Figura 4.3.1 Componentes del ECM asistido por computadora.

Actualmente se han implementado variantes del proceso ECM, con la finalidad de mejorarlo en cuanto a precisión y productividad. El Maquinado Electroquímico Pulsado (PECM) (Feng, et al., 2016) (Zhiyong & Guangming , 2008) (Chithirai Pon, et al., 2017) emplea una fuente pulsada para suministrar el voltaje de polarización del proceso de maquinado, aplicando un tren de pulsos con ciclo de trabajo y una frecuencia que en la actualidad se investiga el intervalo que permita obtener los resultados con las mejores prestaciones. Es aplicado principalmente en micro perforaciones, donde ha demostrado

reducir el sobre corte (diferencia entre el diámetro de la herramienta y el diámetro final del maquinado).

4.4 Sistema computacional

Un sistema computacional es un conjunto de partes relacionadas que depende una de la otra: capital humano (usuario), recursos físicos (hardware), y recursos lógicos (software), que trabajan en conjunto para el procesamiento de información (Beekman, 2016) (Martos, 2012). Como partes de hardware se pueden considerar: el procesador, la memoria, periféricos de entrada/salida y/o sistemas de almacenamiento, entre otros (Patt N. & Patel J., 2004) , mientras que el software se integra por el sistema operativo, códigos fuente de función específica, bibliotecas, y recursos digitales. Por último, el capital humano, personal técnico especializado encargado de diseñar, desarrolla y brindar mantenimiento y soporte al sistema (programadores, arquitectos de software, analistas y operarios).

4.4.1 Computadora de placa reducida

Como unidad de procesamiento central del sistema computacional propuesto para esta investigación, se emplea una SBC (*Single Board Computer*) modelo Raspberry Pi 4 B, la cual es una computadora de tamaño compacto, o computadora de placa reducida (Schmidt, 2014). Se propone debido a que se puede modificar y usar sin restricciones el software y hardware con el que cuentan, lo que la hace ideal para monitorear y controlar un proceso de micro PECM. Las etapas y secciones de las que está conformado el sistema computacional, y las características principales de la Raspberry Pi 4 se muestran en la Tabla 4.4.1 (Raspberry Pi Org, 2021).

Las funciones principales de la SBC, entre otras, serán las de monitorear las variables involucradas en el proceso de maquinado, ejecutar la estrategia de control desarrollada y modificar el movimiento sobre los 3 ejes del plano cartesiano del sistema mecánico, así como los sistemas de bombeo, almacenamiento de datos y presentación gráfica de la información.

La Raspberry Pi 4 cuenta con 40 terminales GPIO (General Purpose Input/Output, Entrada/Salida de Propósito General), de los cuales 25 puede ser configurados como entrada/salida, según sea necesario. Cuenta con puertos de comunicación como I2C, SERIAL, SPI, UART, lo cual la convierten una herramienta poderosa para el desarrollo de sistemas embebidos. La tensión de trabajo para un 1 lógico es de 3.3V y un 0 lógico es 0 V, en tanto que la corriente máxima que puede suministrar vía GPIO es de 50 mA.

Tabla 4.4.1. Características de Raspberry Pi 4B

Chip Integrado	Broadcom BCM2711
CPU	1,5 GHz con brazo Cortex-A72
Procesador Grafico	VideoCore VI
Memoria RAM	8 GB
Puertos USB	2 x USB 3.0, 2 x USB 2.0
Salida de video	2x mini HDMI 4k
Salida de audio	Jack de 3.5mm
Almacenamiento	SD mínimo 8 GB
Conexión de Red	Ethernet 100/100 (RJ45) gigabit e inalámbrica LAN
Pines I/O	8 x GPIO-UART
Voltaje útil desde pines GPIO	+3.3VDC/ +5VDC/ Tierra
Alimentación	5V a 2A vía USB C
Sistema Operativo	Distribuciones basadas en GNU/Linux

Para la adquisición de variables analógicas es necesario la adecuación de componentes externos como ADC (Convertidor Analógico a Digital) mismos que usan diferentes protocolos y puertos de comunicación como el I2C, que es un puerto y al mismo tiempo un protocolo de comunicación serial, donde se define la trama y las conexiones físicas para transferir bits entre 2 dispositivos digitales (Bautista Roldán & Jesús Gámiz Pérez, 2011) (Franklin, 2012). El protocolo únicamente requiere de 2 conexiones SDA (pin por el cual se envía la trama de datos) y SCL (pin propio del reloj), en una configuración Maestro – Esclavo, la cual permite recibir y enviar información de hasta 127 dispositivos usando únicamente un puerto I2C, siendo por ello, el protocolo más utilizado para

comunicarse con dispositivos digitales ya que entre otras virtudes la trama en la que se envían los datos incluye: el dato, la dirección del dispositivo que emite el dato, y un bit para confirmación envío y recepción del dato (Mcewen & Cassimally, 2014).

Como en todo sistema computacional, se requiere tener un referente histórico (memoria) que de la posibilidad de consultar los datos de los procesos de maquinado realizados. Los parámetros usados, así como el registro detallado del comportamiento de las variables involucradas, también deben ser conservados. Por ello, se implementó una base de datos utilizando MySQL, un gestor de base de datos de código abierto (Gilfillan, 2011) (Cuadra Fernández, 2013), el cual brinda la posibilidad de tener un registro histórico en una base de datos normalizada, para almacenar y consultar los datos de una manera rápida y eficaz (Armendariz & Pérez, 2019).

Al ser una computadora de tamaño compacto, la SBC Raspberry Pi 4 requiere de un sistema operativo. Se eligió Raspberry Pi OS en su distribución Búster, basado en Debian 10, como distribución de código abierto, con diseño minimalista. Asimismo, se propone el uso del entorno de desarrollo Thonny Python para el lenguaje de programación Python el cual mediante una interfaz amigable con el usuario y con mejoras propias del lenguaje lo hacen la herramienta eficaz para el desarrollo de aplicaciones (Annamaa, 2015) (Thonny Org., 2020).

La interfaz web, los recursos gráficos, la estrategia de control, el control del hardware, así como los sistemas secundarios, se requieren del uso de múltiples lenguajes de programación, como HTML, CSS, JavaScript ejecutándose de lado del cliente y generando los aspectos visuales del sistema. Entre tanto, lenguajes como PHP, SQL, ASP.NET, se requieren para ser ejecutadas del lado del servidor (Barba Soler, 2014) (Clemente, 2014). Python, al ser un lenguaje interpretado y de tipado dinámico (Chazallet, 2015), se emplea en el desarrollo de los ejecutables de la interfaz gráfica del sistema computacional, así como para llevar a cabo la estrategia de control y comandar todo el hardware.

4.4.2 Ingeniería de Software

La Ingeniería de Software es el conjunto de métodos (o prácticas) y herramientas que permiten a los profesionales en la materia, crear software de cómputo de calidad. Permite construir sistemas complejos en un tiempo razonable, empleando técnicas que permiten que el software se construya del mismo modo que cualquier otro producto exitoso, con la aplicación de un proceso ágil y adaptable para obtener un resultado de calidad que satisfaga las necesidades de las personas que usarán el producto (S. Pressman, 2012).

El sistema computacional desarrollado, al ser un proyecto multidisciplinario y con secciones de software y hardware desarrolladas desde cero, fue candidato para el uso de la técnica de desarrollo por modelo de prototipos. Este modelado se emplea en la mayoría de los casos en las que no se tiene definido en su totalidad el funcionamiento y apariencia final que tendrá el producto, así mismo permite generar diferentes versiones de este pudiendo mejorar el funcionamiento y eficiencia con cada versión fabricada. Es una de las técnicas más empleadas en la Ingeniería de Software por el poco tiempo que lleva desarrollar una versión preliminar de un producto, y por la ventaja de poder analizar el funcionamiento, errores y deficiencias al finalizar cada versión. Por otro lado, ofrece como una ventaja la de poder incorporar o eliminar características y procesos que no se tenían contemplados en una versión anterior o que se deseen quitar en una versión posterior (Roger, 2011).

El modelo por prototipos está conformado por 4 etapas las cuales son:

1. Análisis: Etapa donde se identifican las necesidades y requerimientos que debe cubrir el producto final.
2. Diseño: Etapa donde se realiza un modelado en forma de boceto cubriendo las necesidades solicitadas en la etapa de análisis, este modelado es la base para desarrollar una versión preliminar del sistema.
3. Codificación: Tomando como base la etapa de diseño se desarrolla una primera versión del producto, cubriendo todos los rubros que se establecieron en la etapa del análisis.
4. Pruebas: Se pone a prueba el prototipo, se evalúa el funcionamiento y con base en esto, se determina: si el prototipo satisface los requerimientos de las etapas anteriores

y su funcionamiento es el indicado se considera producto final y solo se acudiría al desarrollador para el mantenimiento, en caso contrario se evalúan las deficiencias, así como rubros adicionales que se deseen integrar en una versión posterior del prototipo volviendo de esta manera a la etapa de análisis de un nuevo prototipo.

En la Figura 4.4.1 se muestran las etapas de las que está conformado el modelo por prototipos, así como la secuencia en la que se desarrollan.

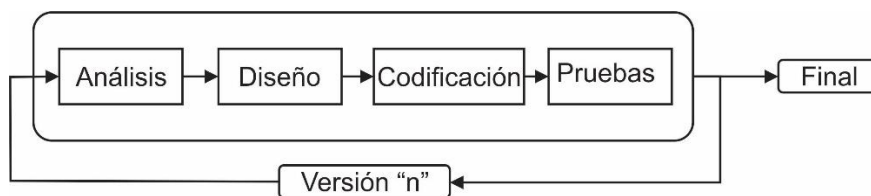


Figura 4.4.1. Estructura de la metodología de Modelos o Prototipos.

4.5 Soft Computing

El *soft computing* es una rama de la inteligencia artificial (IA) que engloba diversos elementos, como la lógica difusa, algoritmos genéticos, redes neuronales, computación evolutiva, teoría del caos y teoría del aprendizaje, entre otros (Pratihar, 2015) (Geron, 2019). Estas técnicas se caracterizan por su capacidad de tolerar la imprecisión, la incertidumbre y la verdad parcial. Su objetivo principal no consiste en determinar cuál de todas estas técnicas es la mejor, sino que se enfoca en la colaboración y en cómo, en muchos casos, un problema puede ser resuelto de manera más efectiva mediante la combinación de varias técnicas.

Un ejemplo de esta sinergia entre técnicas es el uso del procesamiento de lenguaje natural en combinación con redes neuronales para optimizar los resultados y los enlaces en una consulta en un buscador web (Olivas, 2005). Al combinar estas dos técnicas, se pueden mejorar los resultados de búsqueda al comprender mejor el contexto y las intenciones del usuario, brindando respuestas más precisas y relevantes.

En resumen, el soft computing aprovecha las fortalezas de diversas técnicas de IA para abordar problemas complejos que involucran imprecisión e incertidumbre, permitiendo soluciones más efectivas y colaborativas. La combinación de diferentes enfoques puede potenciar los resultados y llevar a mejores soluciones en diversas áreas de aplicación. En el caso particular del control de procesos, el uso de técnicas relacionadas con la IA es incipiente, pero ofrece un potencial enorme para mejorar los resultados y la eficiencia de estos.

4.5.1 Lógica difusa

También conocida como lógica borrosa, ya que utiliza expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas, es aplicada a conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que oscilan entre dos extremos, la verdad absoluta y la falsedad total (Jaimes Rueda, 2010). Permite tratar información imprecisa, como cuando se intenta determinar si una persona es alta o baja o si la temperatura es cálida o fría, esto mediante términos de conjuntos difusos, que se combinan en reglas conocidas como reglas difusas ya que presentan cierto nivel de incertidumbre (Rodríguez, 2018) para definir acciones, por ejemplo:

***SI** la temperatura es alta **ENTONCES** enfriar el ambiente*

Por ello, los sistemas de control basados en lógica difusa combinan variables de entrada, definidos en términos de conjuntos difusos, por medio de grupos de reglas que generar como salida uno o diversos valores (Del Brio & Sanz Molina, 2015).

Uno de los ejemplos más usados para comprender la lógica difusa es el de determinar si un individuo es alto o bajo; para ello se contraponen la lógica clásica con la lógica difusa tal y como podemos ver en la Figura 4.5.1. La primera determina que si un individuo tiene una altura mayor o igual a 180 cm pertenece al conjunto de los individuos altos, dejando fuera a todos aquellos individuos que no cumplan con este parámetro, sin importar si la diferencia radica en un centímetro o menos; es decir, que si un individuo mide 179.9 cm automáticamente la lógica clásica lo pone en el conjunto de individuos bajos. De este modo, no parece lógico determinar si un individuo es alto o bajo y menos si la diferencia

radica en una diferencia mínima como lo es 1 mm; sin embargo, así es como funciona la lógica clásica, determinando el resultado únicamente usando dos criterios: 0 o 1, falso o verdadero, si o no.

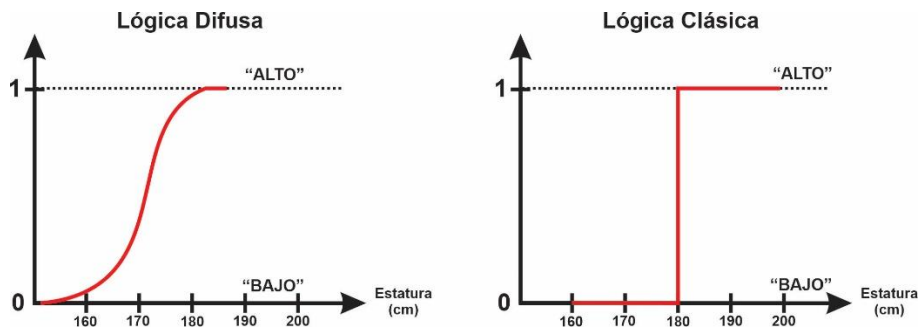


Figura 4.5.1. Comparación entre lógica clásica y lógica difusa.

Por otro lado, la lógica difusa, usando el mismo ejemplo, consideraría que el criterio “Alto” es un conjunto el cual no tiene una frontera clara para pertenecer o no pertenecer a el: mediante una función que define la transición de “alto” a “bajo” se asigna a cada valor de altura un grado de pertenencia, entre [0:1]. Así por ejemplo un individuo que mida 179 cm podría pertenecer al conjunto difuso “alto” con un grado de pertenencia de 0.8 y por el contrario un individuo que mida 150 cm tendría un grado de pertenencia al conjunto difuso “alto” de 0.1, lo cual basado en las reglas automáticamente lo posicionarían el conjunto difuso “bajo”.

Los conjuntos difusos pueden ser considerados como la generalización de los conjuntos clásicos; un conjunto clásico únicamente contempla la pertenencia de un elemento a un conjunto, a diferencia de un conjunto difuso que contempla la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto, es decir que cada elemento presenta un grado de pertenencia a un conjunto difuso que puede tomar cualquier valor entre [0:1]. El grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso:

“para cada valor que pueda tomar un elemento o variable de entrada x la función característica $\mu_A(x)$ proporciona le grado de pertenencia de ese valor de x al conjunto difuso A ”.

5 MÉTODO

Previo a la experimentación para la validación del algoritmo de control, fue necesario desarrollar el hardware con las capacidades necesarias para un proceso de maquinado electroquímico pulsado correcto, el sistema incluye una fuente de voltaje, sistema de monitoreo, sistema de inyección de aire, sistema de recirculación del electrolito; todo esto incorporado en un sistema embebido basado en una computadora de placa reducida, o computadora de una sola placa (SBC, *single board computer*) Raspberry Pi.

5.1 Estación de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar

Como parte indispensable del proyecto y una necesidad fundamental, se diseñó y construyó una estación compacta de micro maquinado electroquímico de 3 ejes coordenados para la incorporación y validación del algoritmo de control. Este prototipo satisface las necesidades presentes en esta línea de investigación. Su diseño compacto y estructura rígida permiten un fácil transporte, mientras que la integración de todas las secciones en una misma estructura facilita la operatividad. Además, la conexión concentrada de las secciones electrónicas en un solo punto permite un mantenimiento y actualizaciones sencillos. La Figura 5.1.1 muestra la estación de micro maquinado pulsado.

La estación de micro maquinado cuenta con 3 ejes coordenados especialmente diseñados para procesos de manufactura no convencional como el maquinado electroquímico y sus variantes. Se ha implementado un sistema de recirculación de electrolito que permite reutilizar dicho componente durante períodos prolongados. La torreta indicadora proporciona una visualización en todo momento del estado del sistema. El gabinete de control concentra todos los periféricos, estación de monitoreo de energía y control que rigen el funcionamiento de la estación.

Cada una de las secciones ha sido diseñada para cumplir con un rol específico. A continuación, se detallan las partes que conforman la estación de micro maquinado, así como su función específica.

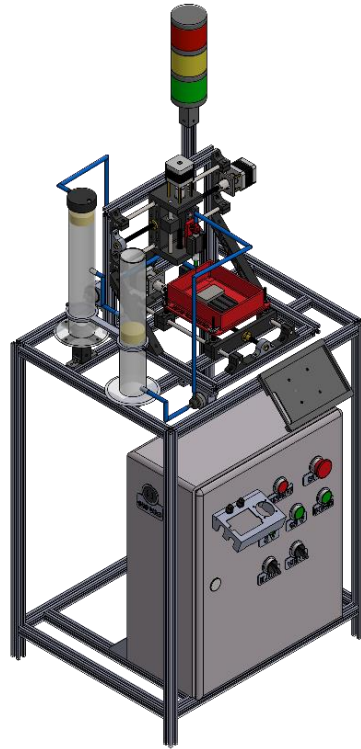


Figura 5.1.1. Vista isométrica de la estación de micro maquinado pulsado.

5.1.1 Recipiente contenedor de electrolito sobre eje x

En la Figura 5.1.2 se presenta la sección del eje x de la estación de micro maquinado, a diferencia de cualquier sistema mecánico de 3 ejes la cama de dicho eje fue reemplazada por el contenedor de electrolito mismo donde se posiciona la pieza de trabajo, con el desplazamiento lineal permisible se obtiene un área de trabajo de 140 cm^2 .

El contenedor del electrolito **37**, se diseñó y fabricó mediante técnica de impresión 3d usando polímero ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) plástico resistente al estrés e impactos, para evitar filtraciones producto de la impresión 3d se dio un tratamiento de vapor de acetona para dar una terminación espejo con el objetivo de sellar imperfecciones o grietas y de esta manera evitar que el electrolito se filtrara al exterior, para facilitar la recirculación del electrolito se colocó un pivote de drene **47** que se acopla con la tubería de la bomba encargada de drenar el electrolito ya usado, para posicionar la pieza de trabajo **34** y que esta se mantenga fija se fabricó la cama con un retén **40** que trabaja en conjunto con un prisionero plástico **38**, que al mismo tiempo es ajustable a diferentes medidas

gracias un sistema de tornillos milimétricos **39** que le permiten ajustar este desplazamiento.

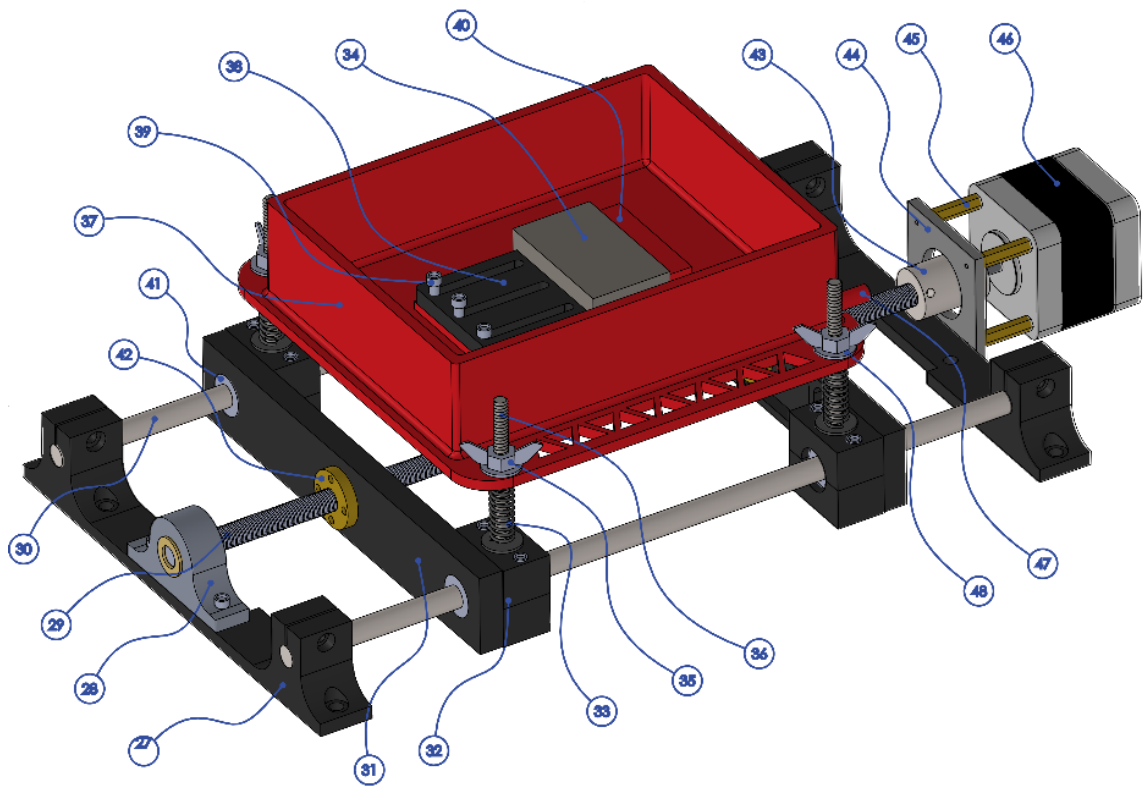


Figura 5.1.2 Sección correspondiente al eje x del sistema de ejes coordenados.

El contenedor del electrolito **37** logra su desplazamiento lineal debido a que se acopla a la cama del eje x mediante 4 tornillos milimétricos **36** que se sujetan a coples **32** que se aseguran fijamente a un balero **41** que se desplaza libremente por barras lineales de acero de 8 mm **30**, para ajustar la altura y nivelación del contenedor del electrolito, se usa un sistema de resortes **33**, tuercas mariposa **35** y rondanas **48**, que hacen ascender o descender de manera independiente las 4 esquinas del contenedor del electrolito. Un motor a pasos **46** Nema 17 (Scheider , 2015), de 200 pasos por revolución, es el encargado de movimiento lineal del eje x, fijado de forma horizontal gracias a un bracket metálico **44** y tornillos hexagonales M3 **45**, trasfiere su movimiento rotatorio a lineal mediante un esparrago de cuerda milimétrica **29** de 8 mm, de 1 hilo y de 30 cm de longitud, acoplada

al motor mediante un cople flexible **43**, en conjunto con el motor a pasos dan como resultado un desplazamiento lineal de $5\mu\text{m}$ por cada paso del motor. Para transferir este movimiento lineal, la cuerda **29** se acopla a la cama mediante 2 travesaños **31** mediante un husillo **42** de 8mm, que al mismo tiempo esta unido a los acoples **32** y a las barras lineales **30**, para que la cuerda **29** no se desvíe se usa una chumacera **28** al final de esta.

5.1.2 Cabezal eje z

Una de las secciones que recibió más atención fue el cabezal que está instalado sobre el eje z, debido a que es donde se posiciona la herramienta de trabajo. Brinda la posibilidad de asegurar la verticalidad de la herramienta de trabajo, así como garantizar que no se moverá ni desplazará como resultado del movimiento y vibraciones mecánicas propias del sistema. Su diseño modular permite intercambiar cabezales de diferente diámetro según sea necesario, así como cambiar la elevación de la herramienta de trabajo en caso de que esta tenga una longitud mayor o menor, las piezas. Al estar fabricadas con polímeros de ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y PLA (ácido poliláctico), además de la resistencia mecánica que ya poseen son impermeables y por lo cual no reciben desgaste o daño originado por los electrolitos usados lo que es común en piezas metálicas que sufren efectos de desgaste y corrosión. En la Figura 5.1.3 se muestra a detalle el cabezal instalado sobre el eje z.

El soporte **2** de la herramienta de trabajo, se diseñó y fabricó empleando polímero de ABS, aplicando un tratamiento de vapor de acetona para lograr la impermeabilidad de la pieza y el flujo de electrolito a través de ella, cuenta con un pivote **10** de acceso de electrolito donde se conecta la tubería proveniente de la bomba encargada de suministrar el electrolito necesario para el proceso de maquinado, el soporte **2** se acopla a la base **1** del eje z mediante 4 tornillos **6** milimétricos, este acople se puede realizar a diferentes alturas del soporte **1**, según sea la longitud de la herramienta de trabajo **7**, misma que se conecta a una base **4** de plástico hueca donde fluye el electrolito y que a su vez embona en el soporte **2**, para asegurar la verticalidad de la herramienta de trabajo se usa un prisionero rectangular **3** que corre sobre unos rieles del soporte **2** y se ajusta al diámetro de la base **4** de plástico hueca. Un par de varillas **9** de 8 mm con valeros **8** de rodamientos internos e

incrustados en el soporte **1** ayudan para el desplazamiento del soporte **1**, para transmitir el movimiento circular a desplazamiento lineal se emplea una varilla roscada **5**, de 1 hilo apoyada de un husillo **11** incrustado en el soporte **1**.

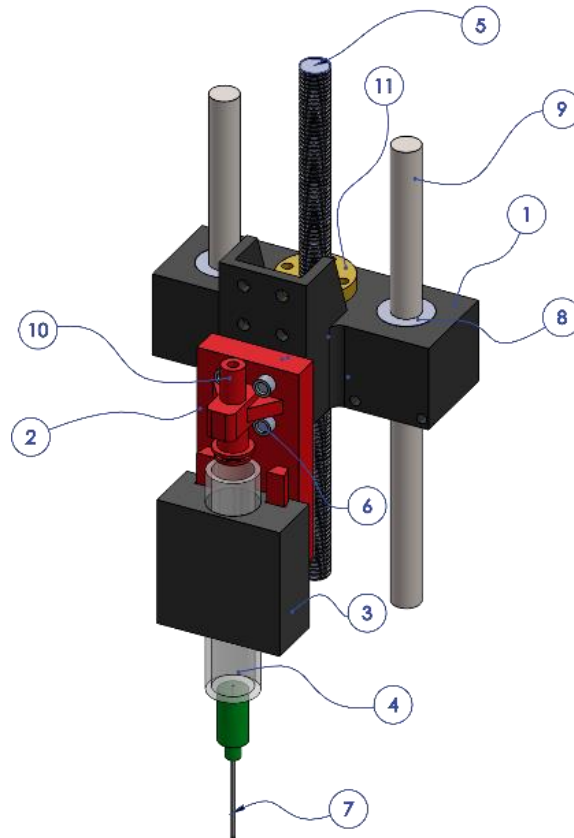


Figura 5.1.3 Cabezal eje z.

5.1.3 Eje y

La fabricación del eje y fue realizada bajo diseño y necesidades propias del proceso de maquinado electroquímico, el soporte instalado sobre el eje , se fabricó en polímero de PLA, empleando técnica de impresión 3D, su estructura completamente rígida e impermeable la hacen resistente a la corrosión, se diseñó y fabricó para que le fuera instalado el sistema mecánico y cabezal del eje z, su diseño modular e independiente a la estructura metálica que soporta el sistema mecánico, facilitan el mantenimiento o

reemplazo de cualquiera de sus piezas, por la naturaleza del proceso a desarrollar el conseguir de manera comercial estas y otras piezas que conforman al sistema mecánico no es posible, lo cual convierten a este sistema mecánico en una pieza de ingeniería única diseñada para ser empleada en el proceso de maquinado electroquímico y por ello se presenta el despiece y ensamble de todas y cada una de las partes para su posible reproducción. El eje y puede ser observado de la Figura 5.1.4.

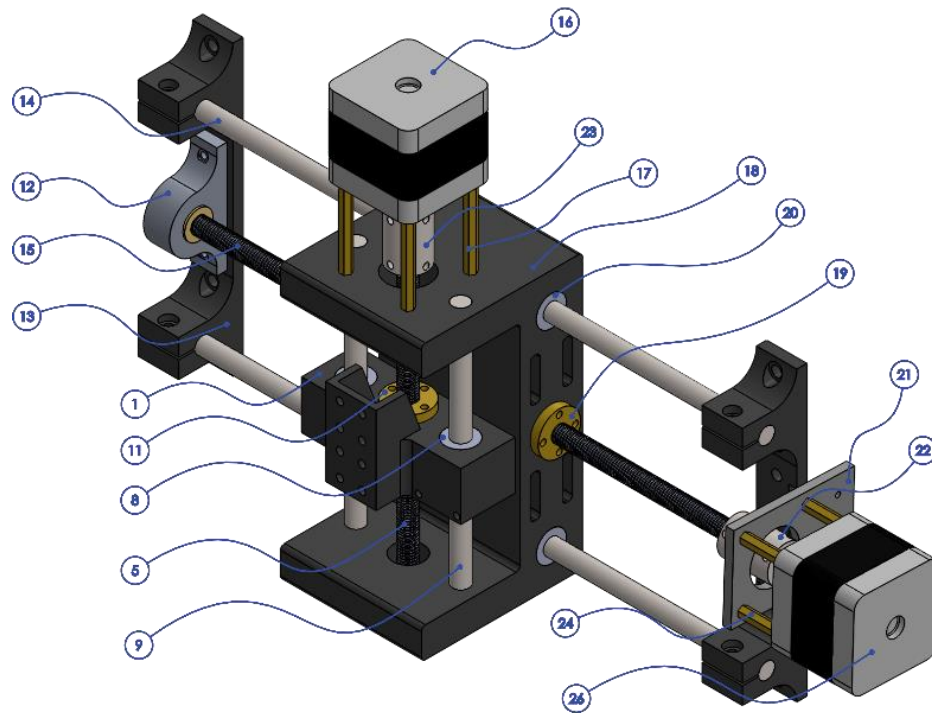


Figura 5.1.4 Eje y

Para el eje Y del sistema mecánico se diseñó un soporte **18** en el cual se empotra directamente el soporte **1** del eje “Z”, para asegurar el movimiento ascendente y descendente del mismo se fijó mediante **2** varillas **9** y **2** baleros **8** empotrados en la base **1**, un usillo **11** trasfiere el movimiento circular de la varilla roscada **5** a movimiento lineal del eje z, para dicho desplazamiento se usa un motor a pasos **16** (Scheider , 2015), instalado sobre el soporte **18** mediante tornillos hexagonales **17**, para acoplar el eje del motor a la varilla roscada **5** se usa un cople flexible **23**, el eje “Y” es fijado a la estructura

del sistema mecánico mediante 2 travesaños **13** unidos por 2 varillas **14** y por medio de las cuales el soporte **18** se desplaza linealmente debido a baleros **20** con rodamientos internos que aseguran un desplazamiento suave y sin desviaciones, un motor a pasos **26** (Scheider , 2015) se encarga del movimiento del eje, transfiere su movimiento circular a una varilla roscada **15** mediante un acople flexible **22**, dicho movimiento se trasforma en desplazamiento lineal por un husillo **19** incrustado en el centro del soporte **18**, para evitar que la varilla se desvíe se emplea una chumacera **12** con rodamiento interno instalado al final de la misma, el motor **26** se fija de manera horizontal empleando una Bracket metálico **21** y tornillos hexagonales **24**. Las varillas roscadas milimétricas **15** y **5** cuentan con un desplazamiento de 1.20 mm por revolución, en conjunto con los motores **16** y **26** se logra una resolución de desplazamiento lineal de $6 \mu m$.

5.1.4 Sistema de recirculación del electrolito

Uno de los elementos más importantes en el proceso de maquinado electroquímico es el electrolito empleado en el mismo y la dificultad de reutilizarlo por periodos prolongados. Esto es debido a que, mientras el proceso de maquinado se realiza, se generan residuos que son subproducto de las reacciones electroquímicas; estos se presentan en forma de lodos, los cuales, al ser bombeados a través de la herramienta de trabajo, quedan atrapados entre la pieza y herramienta de trabajo; al concentrarse en cantidades considerables, se llega a la conductividad directa entre ambas, lo cual obliga a detener el proceso.

Con esto presente se diseñó el sistema de recirculación, empleando una técnica de decantación y filtrado de partículas por retención de esponjas, esto con el fin de poder prolongar el tiempo de maquinado reutilizando el electrolito sin el inconveniente de los residuos lodosos que provocan el corto circuito. El sistema de recirculación de electrolito tiene la capacidad para almacenar 1.5 L de electrolito. En la Figura 5.1.5 se puede observar todos los elementos que conforman al sistema de recirculación del electrolito, así como su interacción con algunos otros elementos del sistema de maquinado, a continuación, se describe a detalle las piezas y funcionamiento de este.

El sistema de recirculación de electrolito se conforma por 2 contenedores **52** y **63** de 500ml de capacidad, el proceso de decantación se logra elevando el contenedor **65** empleando un

soporte **61** que lo pone en una posición más elevada con respecto a **52**, ambos contenedores se unen con 2 tensores **53** y **56**, una bomba **49** succiona el electrolito mediante la tubería **50** de la salida del contenedor **52**, bombea el electrolito usando la tubería **51** hasta el pivote de entrada **10** del soporte 2 del eje “Z”, el electrolito fluye por el soporte plástico hueco **4** que conecta con la herramienta de trabajo, el electrolito se deposita y concentra en el contenedor **37**, la bomba **60** succiona el electrolito mediante la tubería **47** que se conecta al pivote de drene **47** y la hace llegar al contenedor **63** por medio de la tubería **59** que se conecta a la entrada de la tapa **57** del contenedor **63**, la esponja **58** filtra el electrolito usado, atrapando los remanentes del proceso de maquinado que arrastra consigo, el electrolito se deposita en el contenedor **63** e inicia un proceso de decantación, cuando alcanza el nivel adecuado, el electrolito pasa al contenedor **52** usando la tubería **55**, la esponja **64** realiza un segundo proceso de filtrado que atrapa los residuos que alcanzaron a pasar el primer filtrado, las tapas **54** y **57** también desempeñan el rol de cubrir los contenedores **52** y **63** y así evitar el ingreso de partículas ajenas al proceso.

5.1.5 Torreta de señalización

Se instaló una torreta de señalización en la estación de micro maquinado pulsado, con la finalidad de tener alertas visuales que indiquen el estado operativo actual del sistema, y así evitar fallas o interrupciones externas, así como accidentes y daños a terceros, en la Figura 5.1.6 se observa la torreta de señalización.

La torreta de señalización se instala fijamente sobre la estructura rígida de la estación de micro- maquinado pulsado, esto fijando la zapata **70** y con ayuda del soporte **69** se asegura y evita se mueva o desprenda por el movimiento, se extiende una longitud de 30cm gracias a un segmento **71** cuadrangular de perfil de aluminio, donde al final se fija la base **65** de la torreta, el color verde **66** en su estado de encendido indica que el sistema se encuentra activo y funcionando, el color amarillo **67** en su estado encendido indica que el sistema está activo y en espera, y el color rojo **68** en su estado encendido indica se ha activado el paro de emergencia existe la restricción de que solo puede estar encendido un solo color.

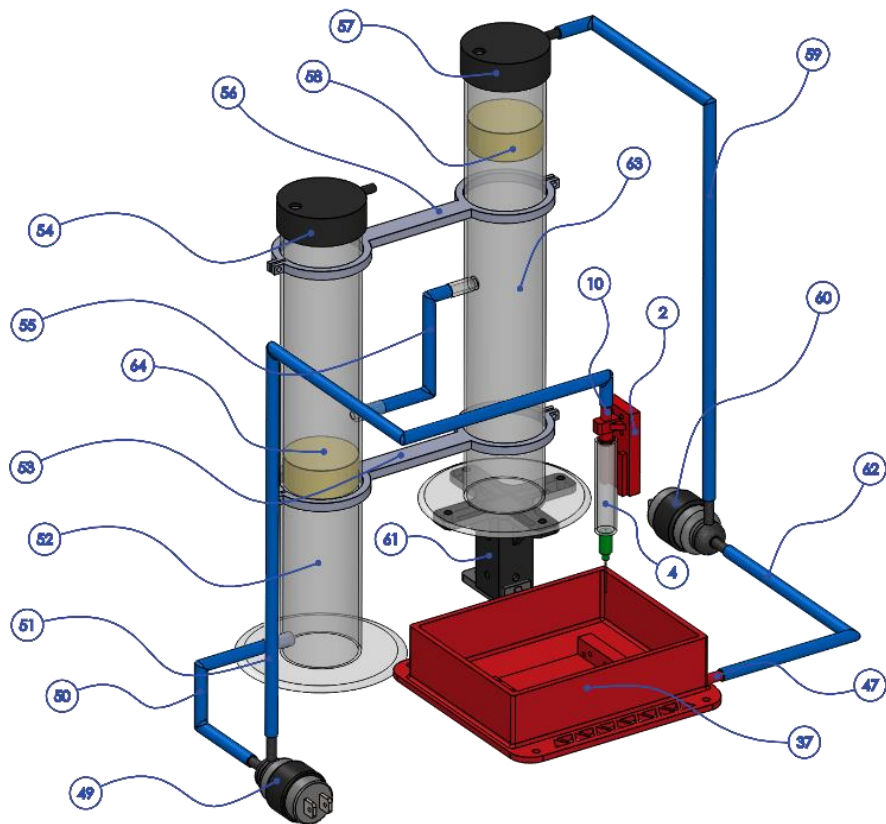


Figura 5.1.5 Sistema de recirculación del electrolito.

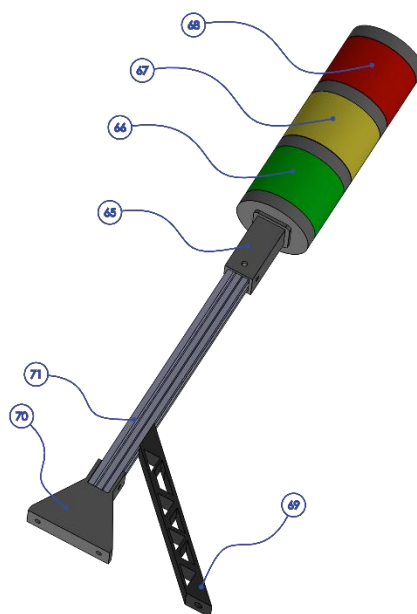


Figura 5.1.6 Torreta de señalización.

5.1.6 Unidad central de control

Concentrar todos los componentes electrónicos, como lo son: fuentes de voltaje, sensores, unidades de procesamiento, actuadores y controladores, facilita el acceso, ya sea para mantenimiento o reemplazo de alguno de ellos. Además, al estar aislados herméticos e impermeables en un gabinete, este los protege del entorno y del mismo proceso de maquinado y sus elementos líquidos. El poder ser retirado físicamente de la estación de micro maquinado permite hacer modificaciones sin la necesidad de remover alguno de los otros elementos, en la Figura 5.1.7 se puede apreciar de forma completa como está constituido la unidad central de control.

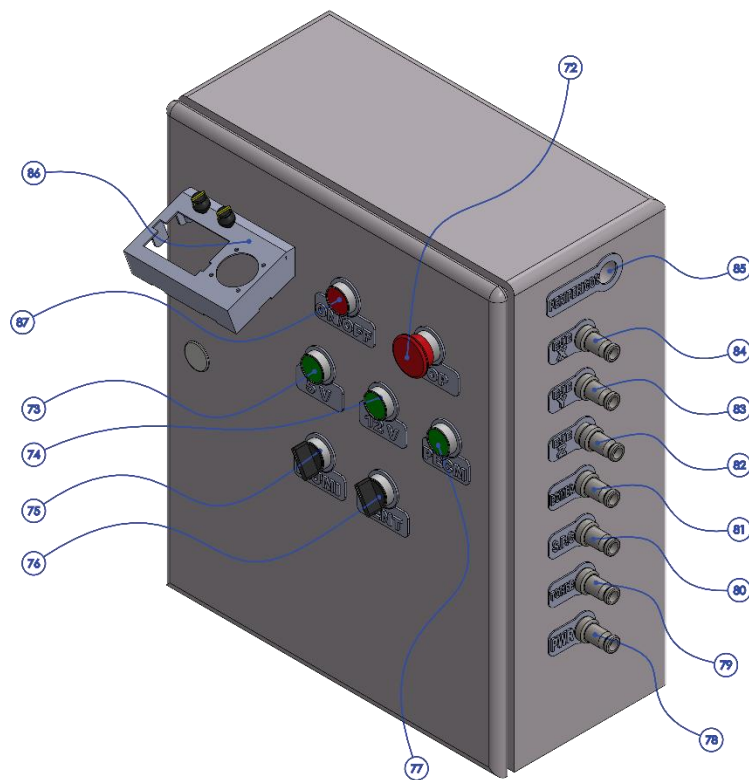


Figura 5.1.7 Unidad central de control.

El control del sistema de recirculación del electrolito se hace de manera independiente en **86**, el botón **87** es el encargado del encendido general del sistema, el botón de paro de emergencia **72** cumple con la función de que, en el caso de ser presionado, todo el sistema

se detiene sin importar el proceso que se esté realizando, el botón **73** activa la fuente principal que suministra 5V de corriente directa, el botón **74** activa la fuente principal que suministra 12V de corriente directa, el botón **77**, activa la fuente pulsada encargada de suministrar la energía que requiere el proceso de maquinado electroquímico, el selector **75** es el encargado de activar o desactivar la iluminación interior del gabinete, el selector **76** activa o desactiva la ventilación, en caso de ser necesario. Los conectores **84**, **83** y **82** corresponden a las conexiones de los motores de los ejes X, Y, Z respectivamente, el conector **81** corresponde a las conexiones de las bombas del sistema de recirculación de electrolito, el sistema cuenta con interruptores de final de carrera que sirven para establecer el límite físico de los ejes mecánicos y se conectan a la unidad central de control mediante el conector **80**, la torreta de señalización se conecta mediante el conector **79**, la fuente que suministra la energía para el proceso de maquinado electroquímico pulsado se conecta mediante el conector **78**, la salida de los periféricos como cables de video, cable de red y cables USB tienen salida por el acceso **85**.

5.2 Circuito de control del sistema mecánico

Para controlar la dirección, velocidad y número de pasos de los motores empleados en cada eje coordinado se usó un controlador encapsulado que toma como base el integrado TB6560 (ver Figura 5.2.1). Su voltaje de operación está entre 10 y 35 V y su corriente de salida pico es de 3.5 A, lo que ofrece la posibilidad de controlar los diferentes modelos y matriculas de motores disponibles en el mercado. Cuenta con un acoplamiento óptico de alta velocidad basado en el optoacoplador 6N137 con lo cual se asegura su operación a alta velocidad sin pérdidas de pasos. Cuenta con la posibilidad de configurar la resolución en términos de movimiento lineal que en conjunto con las varillas roscadas dan como resultado un desplazamiento lineal de $1.25 \mu - 10 \mu m$ por paso del motor. Los tres controladores pueden ser comandados directamente por la SBC Raspberry de esta manera se obtiene un movimiento coordinado de la herramienta de trabajo por toda la superficie disponible.

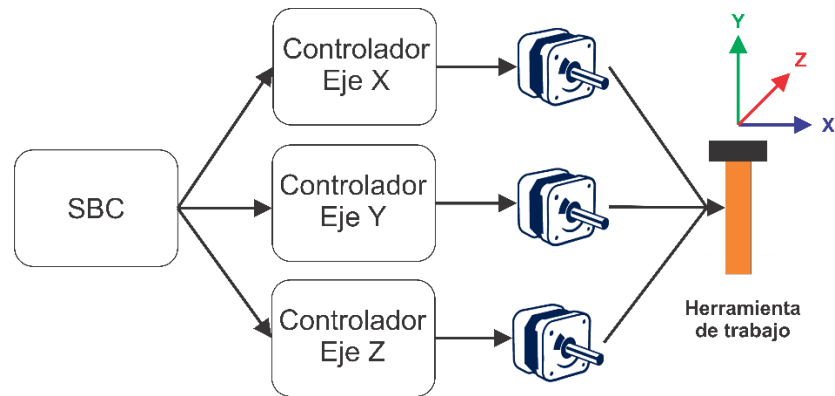


Figura 5.2.1 Conexión de los circuitos de control con SBC

5.3 Fuente de voltaje pulsada bipolar

Para que el proceso de maquinado electroquímico pueda desarrollarse de manera adecuada se implementó una fuente de voltaje pulsada bipolar a puente completo similar a la empleada en (Martinez Alvarado, et al., 2015). Siguiendo las especificaciones detalladas por el fabricante (Infineon Technologies, 2020), la fuente se puede describir como un sistema formado por dos secciones: la primera consiste en la regulación y suministro del voltaje primario, en tanto que la segunda sección es la encargada de la conmutación mediante pulsos para lograr el comportamiento bipolar. Ambas secciones son descritas detalladamente a continuación.

5.3.1 Suministro y regulación de voltaje

La fuente pulsada bipolar incorpora dos suministros independientes de voltaje, que para fines prácticos se definirán como voltaje de corte y voltaje de limpieza. En el primero, la polarización de la herramienta y pieza de trabajo es positiva y negativa respectivamente mientras que en la segunda la polarización es inversa. Para ambos suministros de voltaje se emplea un regulador de voltaje CD-CD basado en el integrado LM2596, teniendo una tensión de salida de 1.5 a 12 V; este voltaje de salida puede ser ajustado mediante la implementación de los potenciómetros digitales X9C103S, que incorporan una red divisora a base de resistencias. Ambos son comandados simultáneamente por un

controlador que tiene comunicación directa con la SBC, tal como se presenta en la Figura 5.3.1.

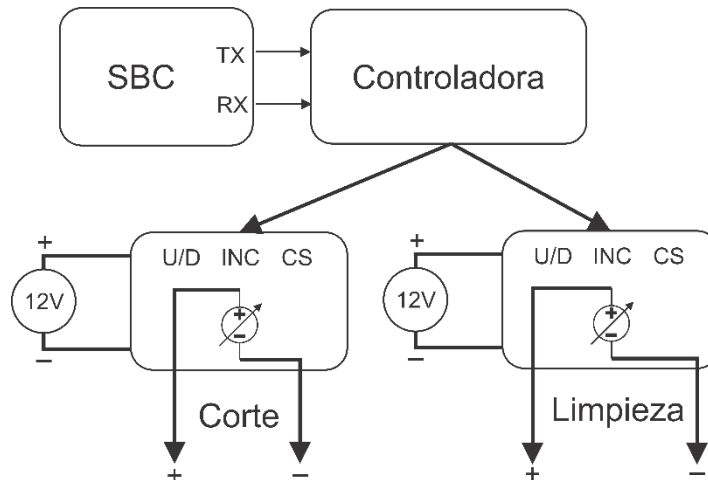


Figura 5.3.1 Suministro y regulación de voltaje.

5.3.2 Conmutación pulsada

Para lograr una conmutación de la polaridad entre la herramienta y pieza de trabajo, se incorporó una fuente pulsada en puente H completo tal como la desarrollada en (Martinez Alvarado, et al., 2015). Los pulsos de control son suministrados directamente por la SBC, los cuales al llegar a los controladores IR2110 y que en conjunto forman el puente H completo, logran el corte y la saturación de los MOSFET modelo IRFZ44N y permiten la conducción de corriente apoyados por los diodos de alta recuperación con matrícula FR305. En la Figura 5.3.2 es posible observar estos componentes y su interconexión.

Como resultado se obtiene una fuente de voltaje bipolar con las siguientes características:

- Voltaje variable de 1.25 a 10 V.
- Corriente máxima de 3A.
- Frecuencia de trabajo en el intervalo de 10 kHz a 100 kHz.
- Ciclo de trabajo ajustable de 10 a 90 %.

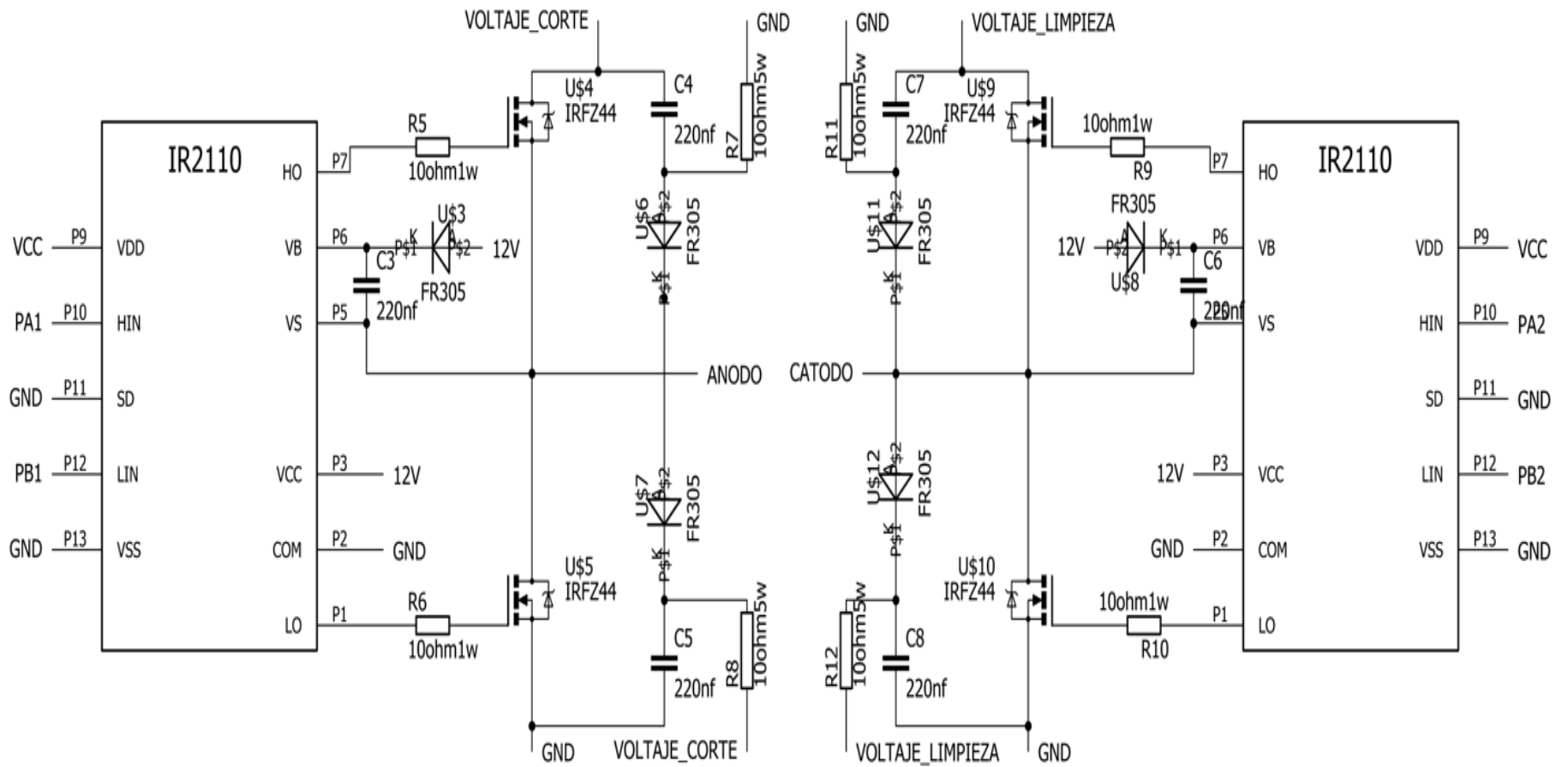


Figura 5.3.2 Diagrama esquemático simplificado de la unidad de pulsos de la fuente pulsada bipolar.

La finalidad de incorporar una configuración de puente H completo con los integrados IR2110 es la de conmutar la polaridad de la herramienta y pieza de trabajo y con ello poder cambiar el sentido de la corriente. Durante un determinado tiempo la herramienta y pieza de trabajo se mantienen con una polaridad negativa/positiva respectivamente, para enseguida cambiar la polaridad a positiva/negativa, con la particularidad de que el periodo de tiempo es menor en una proporción de 12 a 1. Tomando como referencia la Figura 5.3.2, los pulsos cuadrados de control PA1 y PA2 son generados por la SBC, mientras que los pulsos cuadrados de control PB1 y PB2 son los complementos de estos pulsos obtenidos gracias a la incorporación de una compuerta 74LS04 y son de utilidad para lograr la polarización independiente de cada medio puente.

La conmutación de la polaridad de la herramienta y pieza de trabajo inicia cuando se establece el voltaje y frecuencia de operación de la fuente pulsada es decir los valores para PA1 y PA2, el cambio de polaridad debe sincronizarse para evitar daños y corto circuitos que lleven a paro al proceso de maquinado y es por ello por lo que para calcular los tiempos de conmutación se emplea las siguientes ecuaciones:

$$\text{Tiempo de Polarización}_{\text{corte}} (s) = \left(\frac{1}{f}\right) (12) \quad (4.3.2.1)$$

donde:

$\text{Tiempo de Polarización}_{\text{corte}} = \text{Tiempo de polarización positiva} - \text{Tiempo de polarización negativa [s]}$

$f = \text{frecuencia para fuente pulsada [Hz]}$

$$\text{Tiempo de Polarización}_{\text{limpieza}} (s) = \left(\frac{1}{f}\right) \quad (4.3.2.2)$$

donde:

$\text{Tiempo de Polarización}_{\text{limpieza}}$

$= \text{Tiempo de polarización negativa} - \text{Tiempo de polarización positiva [s]}$

$f = \text{frecuencia para fuente pulsada [Hz]}$

La relación de 12 a 1 entre el tiempo de corte y limpieza fue establecido con base a experimentación previa, obteniendo los mejores resultados usando esta configuración. En la Figura 5.3.3 se aprecia gráficamente cómo se da la conmutación de la polaridad de la herramienta y pieza de trabajo. Es visible cómo se hace un ciclo de 12 a 1 entre los pulsos

positivos y negativos que suministran la corriente para el proceso de maquinado electroquímico y es por esta misma razón que adopta el termino de pulsado bipolar.

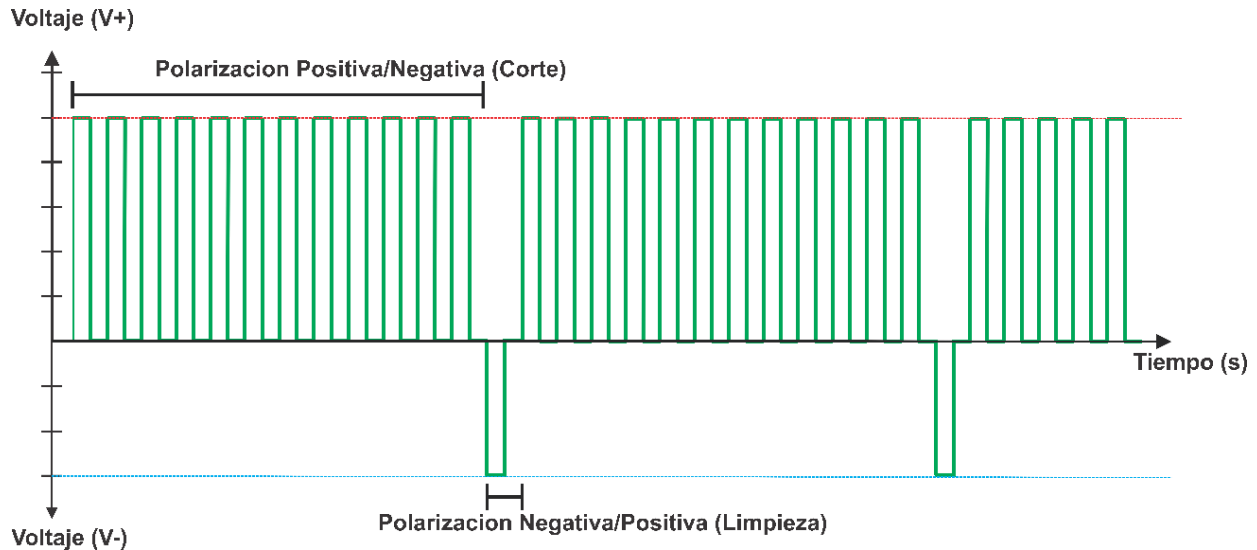


Figura 5.3.3 Relación de los pulsos positivos y negativos, así como de la conmutación de la herramienta y pieza de trabajo.

La implementación de una conmutación de polaridad basada en la experimentación da como resultado una mejora en el proceso de maquinado, reduciendo el efecto de sobre corte y prolongando el proceso de maquinado, ya que anteriormente y trabajando bajo una única polarización, el proceso de maquinado se veía interrumpido por la acumulación de micro residuos entre la herramienta y pieza de trabajo, así como la generación de microburbujas de hidrogeno, resultado del mismo proceso mismo. Estos residuos al estar en una polarización negativa/positiva de la herramienta y pieza de trabajo respectivamente se acumulan en su mayoría sobre la herramienta de trabajo tal como lo podemos apreciar en la Figura 5.3.4.

Al lograr la inversión de la polaridad por una fracción de tiempo, la herramienta y pieza de trabajo tienen una polaridad inversa, lo cual permite que estos residuos y burbujas se dirijan a la pieza de trabajo. Al ser muy corto el tiempo con respecto al tiempo de corte, estos residuos y burbujas no alcanzan a depositarse del todo sobre la pieza de trabajo y

son arrastrados por el flujo del electrolito presente entre la herramienta y pieza de trabajo. La conmutación de polaridad entre herramienta y pieza de trabajo puede ser apreciada gráficamente en la Figura 5.3.5, donde la sección (A) la herramienta y pieza de trabajo están polarizadas de forma negativa y positiva respectivamente, mientras en la sección (B) se aprecia como se cambia de polaridad quedando de forma inversa, esta conmutación se realiza de forma cíclica durante todo el tiempo que se realiza el proceso de maquinado electroquímico.

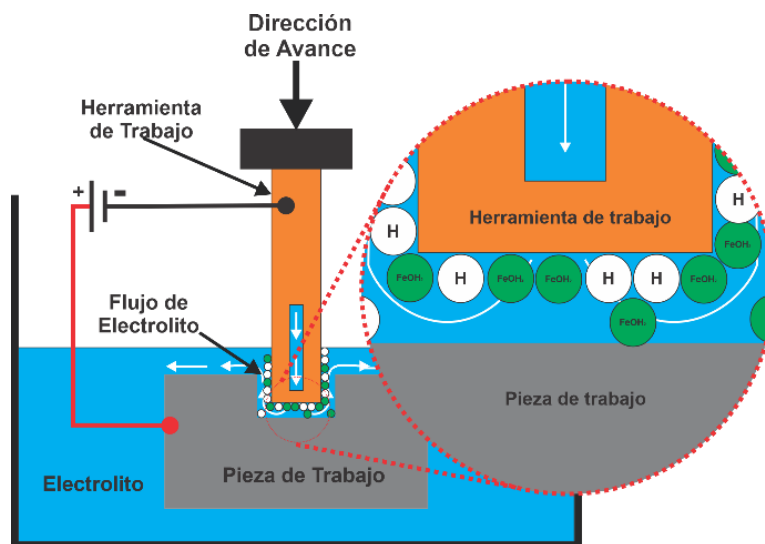


Figura 5.3.4 Residuos y burbujas de hidrógeno acumuladas sobre la pieza de trabajo.

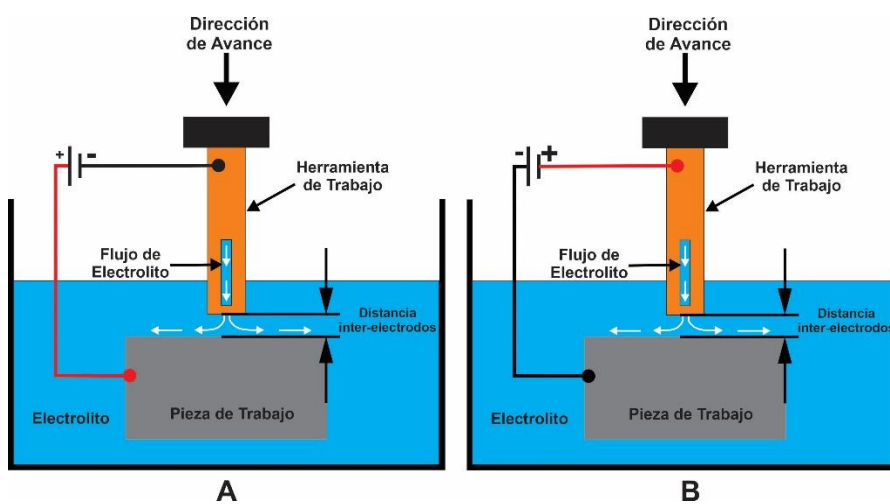


Figura 5.3.5 Conmutación de polaridad de la herramienta y pieza de trabajo.

5.4 Sistema de monitoreo

En este apartado se describe el proceso de diseño e implementación del sistema de monitoreo de las variables del sistema. Al no ser posible colocar un sensor directamente entre el espacio inter-electrodos, la adquisición de estas variables es determinante para que el sistema realice la estimación de la distancia inter-electrodos y el sistema de control establezca la respuesta adecuada para compensar perturbaciones que pueden ocurrir durante el proceso.

5.4.1 Variables eléctricas.

Parte medular de la estación de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar es el monitoreo continuo de las variables eléctricas involucradas en el mismo proceso. Para ello, se incorporó un sensor de corriente de efecto Hall con matrícula T-60404-N el cual al ser conectado en serie con la herramienta y pieza de trabajo proporciona el voltaje RMS en función de la corriente detectada y de esta manera se estima indirectamente la magnitud de la corriente de maquinado.

Para el voltaje de maquinado, se obtiene el valor eficaz de la señal de entrada usando un circuito integrado matrícula AD536. El sistema de monitoreo, así como el sistema lógico de la estación de micro maquinado, se polarizan con un voltaje lógico de 5 V. Teniendo esto en consideración es necesario asegurar que las magnitudes monitoreadas no sobrepasen este valor debido a que los sensores trabajan con valores lógicos que van de 0 a 5 V, y en el caso particular del voltaje de maquinado, se incorpora un divisor de voltaje asegurando de esta manera no sobrepasar el límite y provocar daños al sistema lógico. El diagrama esquemático del divisor de voltaje empleado se puede apreciar en la Figura 5.4.1.

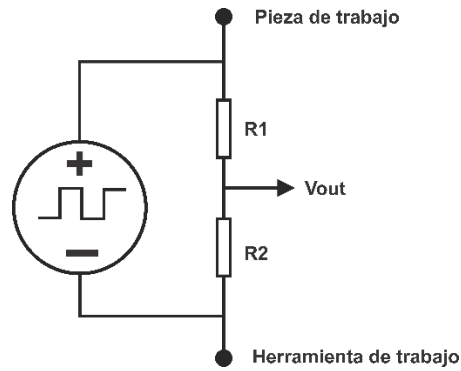


Figura 5.4.1 Divisor de voltaje incorporado para garantizar un monitoreo de voltaje de maquinado no mayor a 5V.

El voltaje de salida se obtiene usando la fórmula 4.4.1.

$$V_{out} = \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right) (V_{in}) \quad (4.4.1)$$

donde:

V_{out} = voltaje de salida [V]

V_{in} = Voltaje de entrada [V]

$R1, R2$ = Resistencias para obtener la ganancia de voltaje [Ω]

Para muestrear la magnitud de ambas variables se usa el convertidor analógico a digital MCP3204 el cual cuenta con una resolución de 12 bits y 4 canales disponibles, a una frecuencia de 100 kHz. Este convertidor se acopla directamente a la SBC mediante el puerto de comunicaciones SPI, donde el voltaje de maquinado es adquirido por el canal Ch0 proveniente del convertidor AD536, que estima el valor eficaz de la señal pulsada que pasa por el divisor de voltaje. Por otro lado, la corriente de maquinado llega al canal Ch1 del MCP 3204 directamente del sensor T60404-N. En la Figura 5.4.2 se presenta el diagrama eléctrico de los componentes esenciales para el monitoreo de las variables eléctricas. La SBC adquiere la magnitud de estas variables, procesa y almacena en un archivo que posteriormente puede ser usado para el análisis de estas.

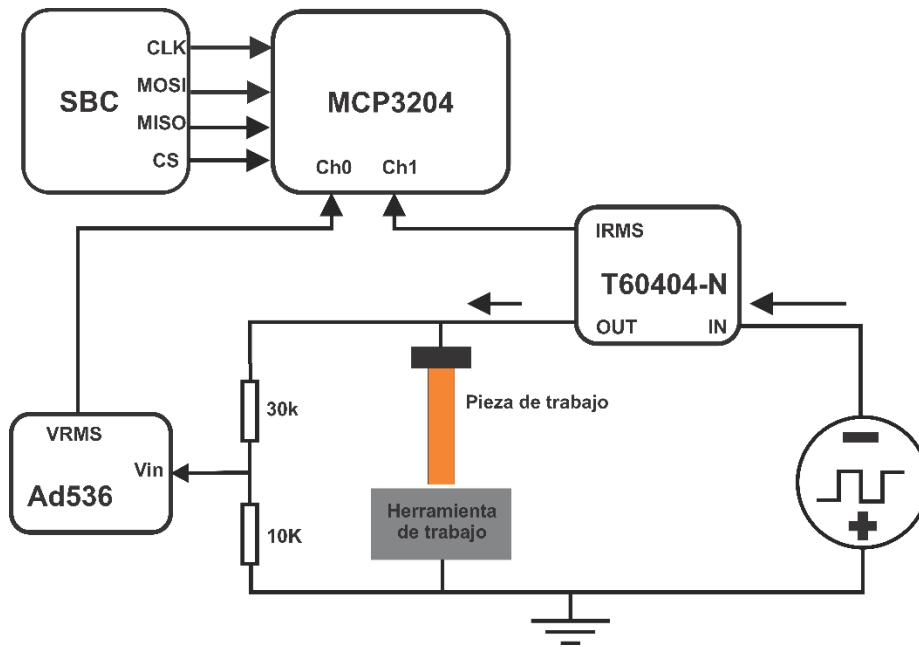


Figura 5.4.2 Diagrama del sistema de monitoreo de la corriente y voltaje de maquinado.

5.4.2 Suministro y control de flujo del electrolito

El flujo de electrolito inyectado al proceso puede interferir en la magnitud de las variables eléctricas, así como en el comportamiento y resultado final de los maquinados. Por ello, para este trabajo se propuso incorporar el flujo del electrolito como variable y criterio a controlar, ya que experimentaciones previas, así como el análisis de la literatura, permitieron identificar que el variar el flujo de electrolito entre la herramienta y pieza de trabajo permiten desplazar fácilmente los residuos que se concentran entre herramienta y pieza de trabajo, así mismo con las burbujas de hidrógeno que se generan durante este proceso y que depositan en su mayor parte en la herramienta de trabajo. Mientras el proceso de maquinado se desarrolla y la herramienta penetra en la pieza de trabajo, es necesario modificar el flujo de electrolito y con ello evitar la concentración de este, así como desbordamientos y derrames. La incorporación del caudalímetro 937-O820 se realizó entre el contenedor de electrolito y la bomba de suministro del electrolito para el proceso de maquinado tal como se observa en el diagrama de la Figura 5.4.3.

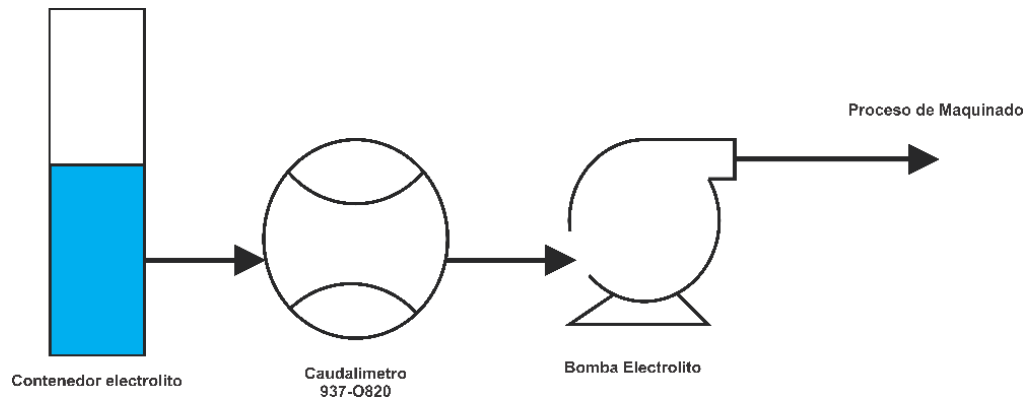


Figura 5.4.3 Incorporación de caudalímetro en sistema de recirculación de electrolito.

El flujo de electrolito puede ser ajustado debido a que se puede ajustar el ciclo de trabajo de las fuentes que suministran el electrolito y con ello el flujo de este, Para conocer la relación entre flujo y ciclo de operación de la bomba se realizó una caracterización de funcionamiento del caudalímetro los resultados de esta caracterización se muestran en la Tabla 5.4.1.

Tabla 5.4.1 caracterización del caudalímetro 937-0820.

Ciclo de trabajo de la bomba [%]	Flujo de electrolito [ml/min]
40	69
50	85
60	92
70	105
80	120
90	132
100	147

La magnitud del flujo del electrolito es muestreada directamente por la SBC a través de uno de los GPIO que cuentan con interrupción externa. La SBC procesa y almacena la magnitud de esta variable, por medio de un controlador conectado por uno de los puertos

seriales comanda el ciclo de trabajo de las bombas del sistema de recirculación del electrolito ajustándolo según lo demande el proceso de maquinado, la interconexión del sistema de monitoreo y control del flujo del electrolito se observa en la Figura 5.1.7.

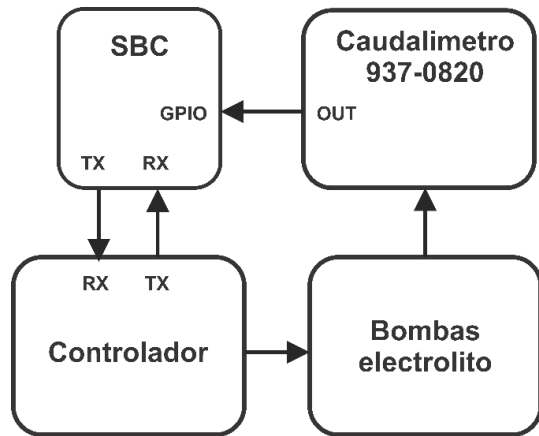


Figura 5.4.4 Diagrama de conexión de sistema de monitoreo y control de flujo de electrolito.

5.4.3 Presión de aire del sistema neumático

Durante el proceso de maquinado se da lugar a fenómenos físicos como la generación de burbujas de hidrógeno e hidróxidos que se acumulan en la herramienta de trabajo, tal como se presenta en la Figura 5.4.5 (A), producto de un efecto de cavitación. Asimismo, debido al bajo flujo del electrolito que puede ocurrir por la acumulación de los subproductos y por el hecho de que la herramienta va penetrando en la pieza de trabajo, se genera una acumulación de electrolito y desprendimientos abruptos del mismo, como se ilustra gráficamente en la Figura 5.4.5 (B). Además de los residuos generados durante el proceso de maquinado, es posible que se produzcan cortocircuitos o estancamientos que interrumpen el flujo continuo del electrolito. Estas situaciones pueden afectar el rendimiento del sistema e incluso provocar la interrupción completa del proceso.

Se ha incorporado un sistema neumático basado en las técnicas de manufactura tradicional y sus componentes. Este sistema suministra un flujo de aire focalizado sobre el área de trabajo, lo que permite desplazar el excedente de electrolito que se acumula entre la

herramienta y la pieza de trabajo. Además, de forma indirecta, se favorece el desplazamiento de los residuos y burbujas de hidrógeno que se acumulan en la herramienta de trabajo, tal como se muestra en la Figura 5.4.6. Con ello se mantiene la cantidad necesaria de electrolito entre la herramienta y pieza de trabajo eliminando los excedentes de este y prolongando el tiempo de maquinado entre cambios de electrolito.

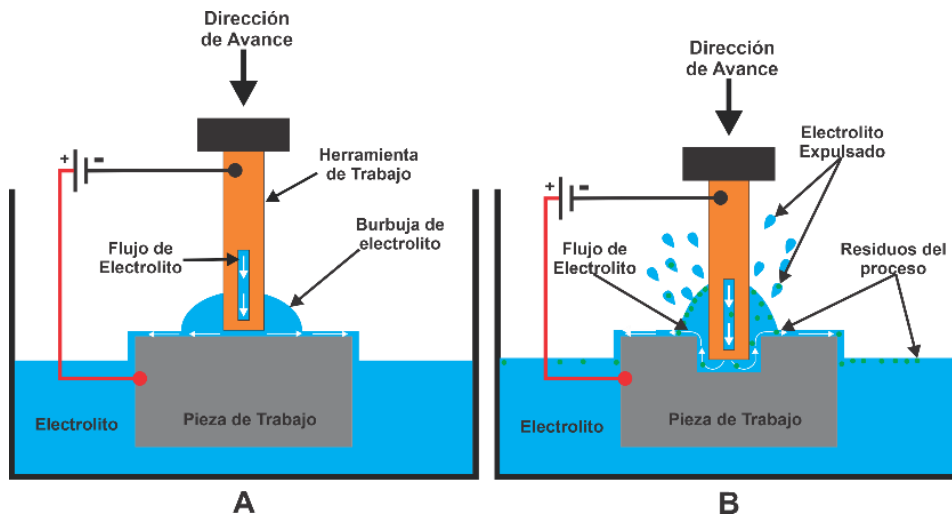


Figura 5.4.5 Comportamiento de las concentraciones de electrolito entre herramienta y pieza de trabajo.

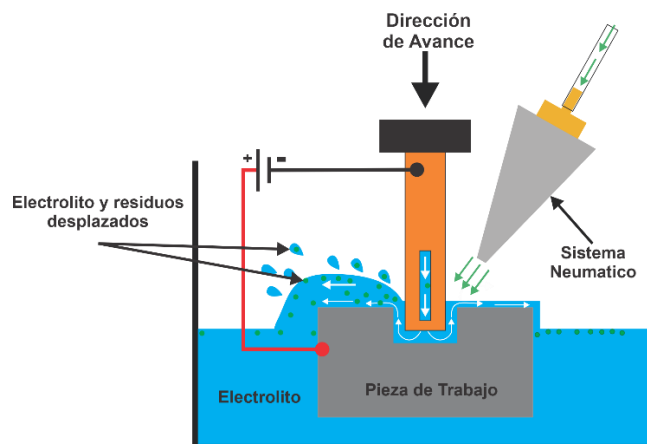


Figura 5.4.6 Incorporación de sistema neumático a proceso de maquinado.

Para conocer la magnitud de la presión con la cual se está suministrando el flujo de aire se incorporó un sensor de presión diferencial con matrícula MPX10dp el cual tiene una resolución de 3.5 mV/kPA. Se muestrea mediante la conexión al canal Ch2 del conversor analógico digital MCP3204 el cual es conectado a la SBC mediante el protocolo SPI, para poder regular el ciclo de trabajo de la bomba neumática se emplea un controlador comandado por la SBC mediante una comunicación serial. De esta manera, se puede variar la cantidad de aire suministrada al proceso de maquinado durante la ejecución de este. La SBC muestrea, procesa y almacena la magnitud de la presión diferencial y su evolución para análisis posteriores, la interconexión de estos elementos se puede apreciar en la Figura 5.4.7.

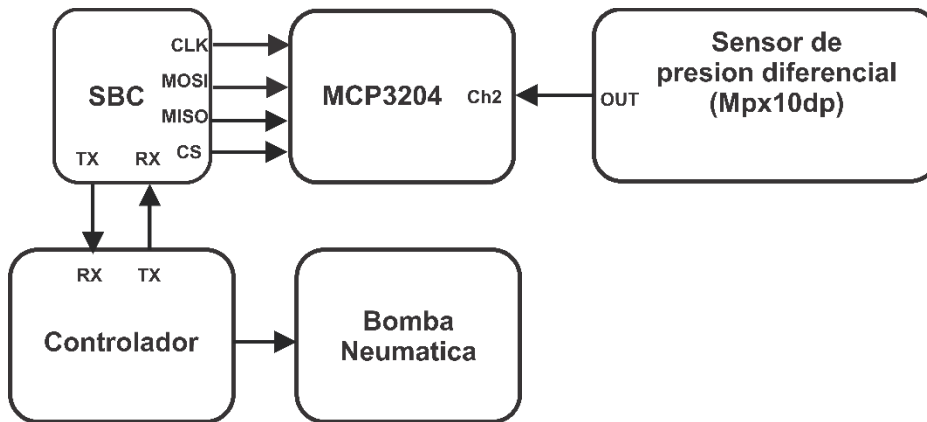


Figura 5.4.7 Incorporación de sistema neumático en proceso PECM.

Además de las adecuaciones electrónicas y de software, fue necesario realizar modificaciones sobre el cabezal del eje Z, donde se incorporó un soporte **86** el cual se sujetó a la base **1** un soporte ajustable **87** y fijado al soporte **86** mediante tornillos **88** permite la elevación y descenso del sistema de inyección de aire, in inyector cónico **91** ajustado al soporte **87** mediante un tornillo **89** permite regular la dirección del flujo de aire, el suministro de aire se realiza mediante una manguera proveniente de la bomba neumática se conecta al niple **91**. Esta adecuación mecánica puede ser observada a detalle en la Figura 5.4.8.

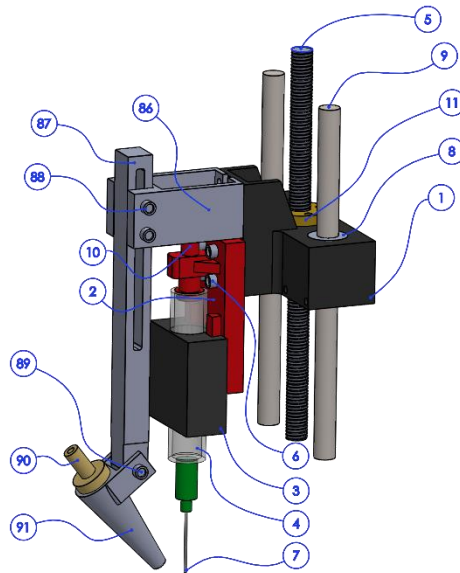


Figura 5.4.8 Adecuación mecánica para el sistema de inyección de aire.

5.5 Diagrama de secuencia

El funcionamiento de la estación compacta de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar puede ser representado por el diagrama de secuencia presentado en la Figura 5.5.1, donde se incluye las secciones independientes de las cuales está conformado y mismas que interactúan entre sí para el correcto funcionamiento, la sección del usuario es la que inicia con el proceso, pues es este el encargado de establecer los parámetros del maquinado a realizar, el sistema computacional recibe estos datos los procesa, interpreta e interactúa directamente con el sistema mecánico estableciendo la posición y distancia inter electrodos inicial, establece el flujo de electrolito y de aire del sistema neumático, e inicia el desplazamiento y proceso electroquímico, adquiriendo las variables eléctricas de interés para iniciar con el proceso de maquinado y almacenamiento de información, se inicia un bucle donde los diferentes sistemas se encuentran gobernados por el sistema computacional y que ejecuta el control difuso, mientras se realiza la remoción de material, el monitoreo de variables es constante, para conocer la profundidad y tasa de remoción de material, cada vez que la distancia inter-electrodos aumenta o disminuye el control difuso eleva o desciende la herramienta de trabajo haciendo uso del sistema mecánico,

para los ajustes de elevación o descenso que no sean posibles con movimiento mecánico, el control difuso, reajusta el voltaje de polarización y con ello la corriente de maquinado para aumentar o disminuir la remoción de material, el monitoreo de flujo de electrolito se mantiene continuo para detectar cambios en corriente del proceso de maquinado así como posibles obstrucciones en el electrolito, el sistema de almacenamiento guarda las magnitudes de las variables involucradas durante la evolución del proceso.

Cuando la profundidad deseada del maquinado es alcanzada, el bucle se da por concluido, se almacenan los datos en un archivo dentro de la memoria del sistema para su posterior análisis y como prueba de que el proceso se ha realizado de manera satisfactoria.

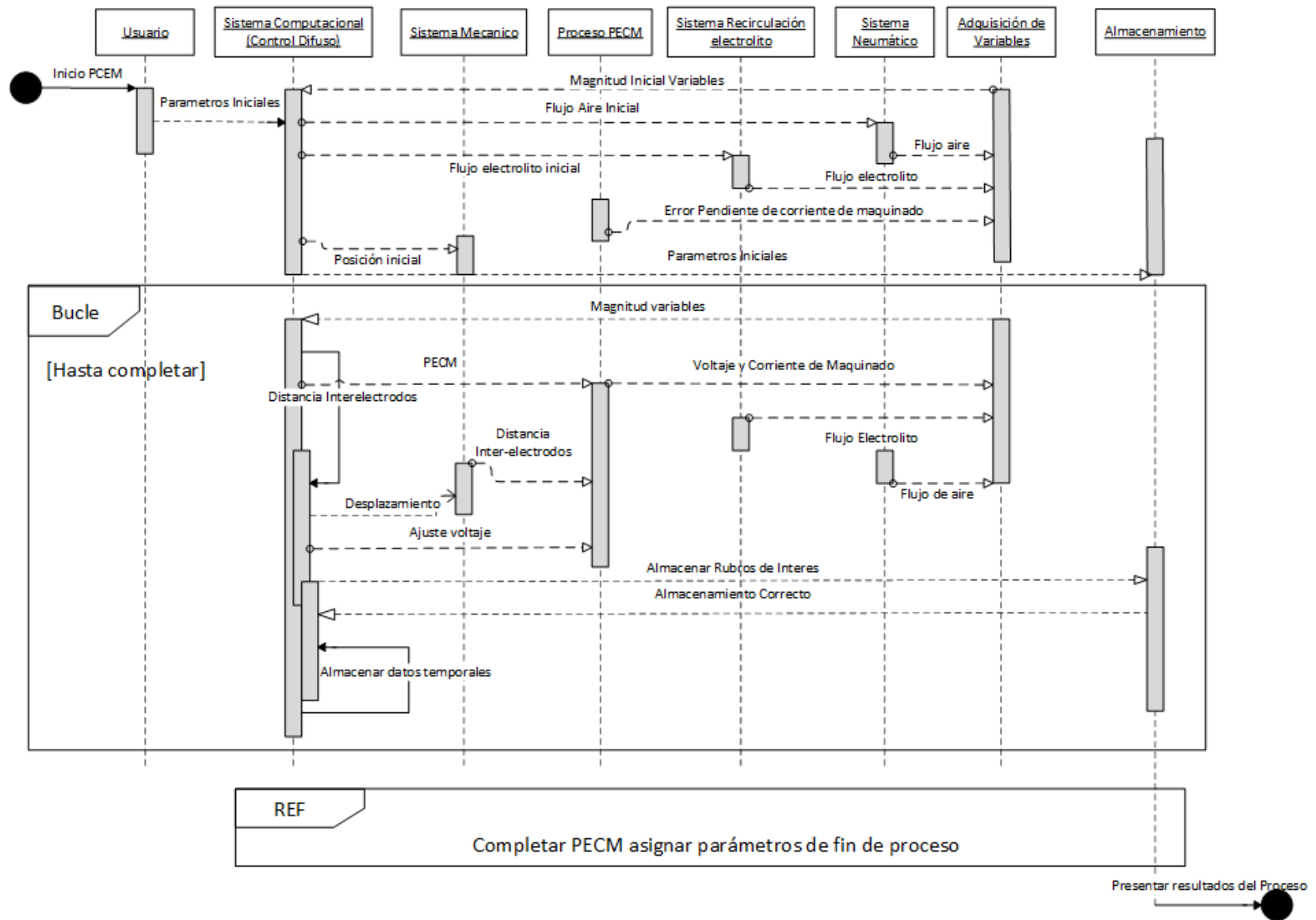


Figura 5.5.1. Diagrama de secuencia.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Prototipo de la estación compacta de micro maquinado electroquímico pulsado

Siguiendo los parámetros de diseño y las mejoras de versiones anteriores de prototipos de sistemas de maquinado electroquímico, se ha fabricado una estación compacta de micro maquinado electroquímico pulsado. Esta estación tiene la capacidad de realizar maquinados en el rango de micrómetros, con una resolución mecánica de hasta 6 μm . Además, incorpora varias características que mejoran su desempeño y eficiencia.

En primer lugar, se ha implementado un sistema de filtrado de electrolito basado en decantación, lo cual permite prolongar la vida útil del electrolito durante el proceso. También se ha integrado un sensor de flujo que monitorea el suministro de electrolito al proceso. Para eliminar el exceso de electrolito y los residuos del proceso electroquímico entre la pieza y la herramienta de trabajo, se ha incorporado un sistema neumático que suministra un flujo de aire directo sobre la superficie a maquinar. La presión de este flujo de aire se mide mediante un sensor de presión diferencial.

En cuanto al posicionamiento de la pieza de trabajo, se utiliza un contenedor fijado sobre el eje Y del sistema mecánico, el cual cuenta con un sistema de nivelación manual para asegurar que las piezas a maquinar estén correctamente niveladas. Esta característica garantiza la precisión y calidad de los maquinados realizados.

El prototipo desarrollado proporciona un control sobre el proceso de maquinado y todos los elementos que lo componen. Por ejemplo, el sistema de suministro de voltaje puede configurarse con parámetros variables según las necesidades o las características del material a trabajar. La estación también cuenta con un cabezal que asegura la verticalidad de la herramienta de trabajo y permite el intercambio de herramientas de diferentes diámetros y tamaños.

Gracias a su tamaño reducido, la estación puede ser operada por una sola persona. Además, los materiales empleados en su fabricación le confieren durabilidad y resistencia a la corrosión provocada por los electrolitos utilizados.

La estación de micro maquinado electroquímico pulsado se muestra en la Figura 6.1.1, proporcionando una visión clara de su estructura y componentes.

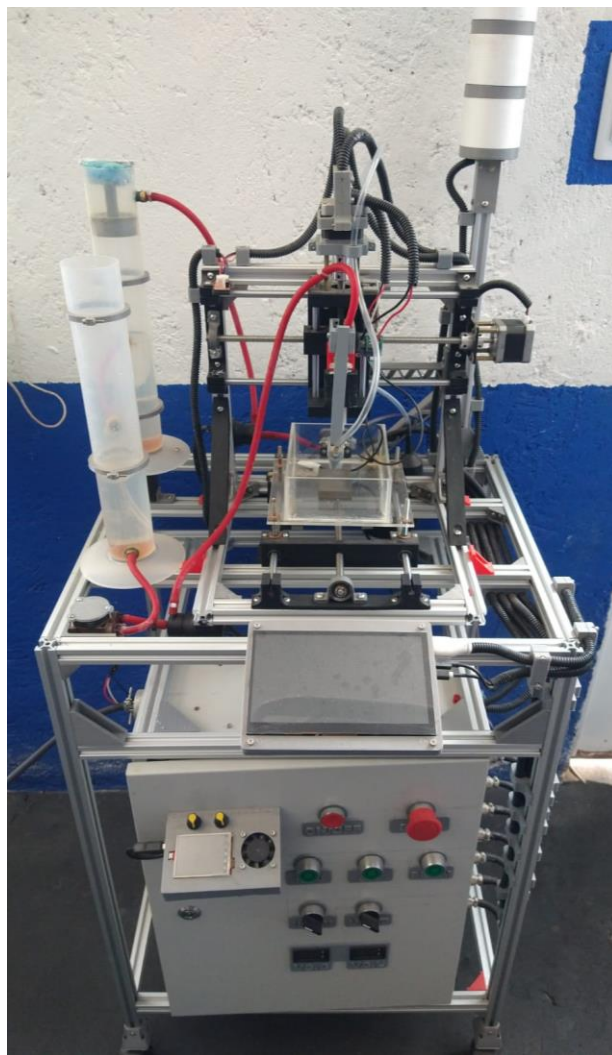


Figura 6.1.1 Estación Compacta de Micro Maquinado Electroquímico Pulsado.

6.2 Caracterización de PECM con variación de flujo de electrolito

Al incorporar un sistema de recirculación de electrolito con sensor de flujo permitió caracterizar el proceso PECM implementando variaciones en el flujo de electrolito que se suministra al proceso, por ello se desarrolló una serie de pruebas de maquinado siguiendo los parámetros presentados en la Tabla 6.2.1.

Tabla 6.2.1 Configuración de parámetros para experimentación PECM con flujo de electrolito variable.

Variable	Magnitud
Frecuencia	25 kHz
Amplitud pulso de maquinado	5 V
Amplitud pulso limpieza	3 V
Ciclo de trabajo fuente pulsada	50 %
Electrolito	H_2O con una concentración en masa de 16.6% de NaCl
Material de trabajo	Acero AISI-1018
Distancia Inter electrodos inicial	240 μm
Electrodo	Estructura tubular de acero con un diámetro de 603 μm
Relación de pulsos bipolares	12 positivos:1negativo
Tiempo de cada prueba	60 segundos
Flujo de electrolito	85-147 ml/min
Presión de aire	6.3 kPa

Se realizaron pruebas iniciando con un flujo de electrolito de 85 ml/min, cada una de las pruebas con una duración de 60 segundos, y una separación lineal de 5 mm entre cada una de ellas, al incrementar el flujo de electrolito en cada prueba, se pudo observar un incremento en la corriente de maquinado tal y como lo podemos observar en la Figura 6.2.1 así mismo se puede apreciar como la corriente de maquinado va disminuyendo esto a causa de que se está llevando a cabo una remoción de material y con ello la distancia inter-electrodos aumenta lo cual lo podemos ver reflejado en términos de corriente, al ir aumentado el flujo de electrolito también aumenta la velocidad de remoción por ello es que entre mayor sea el flujo, la corriente de maquinado disminuye más rápido y en mayor cantidad.

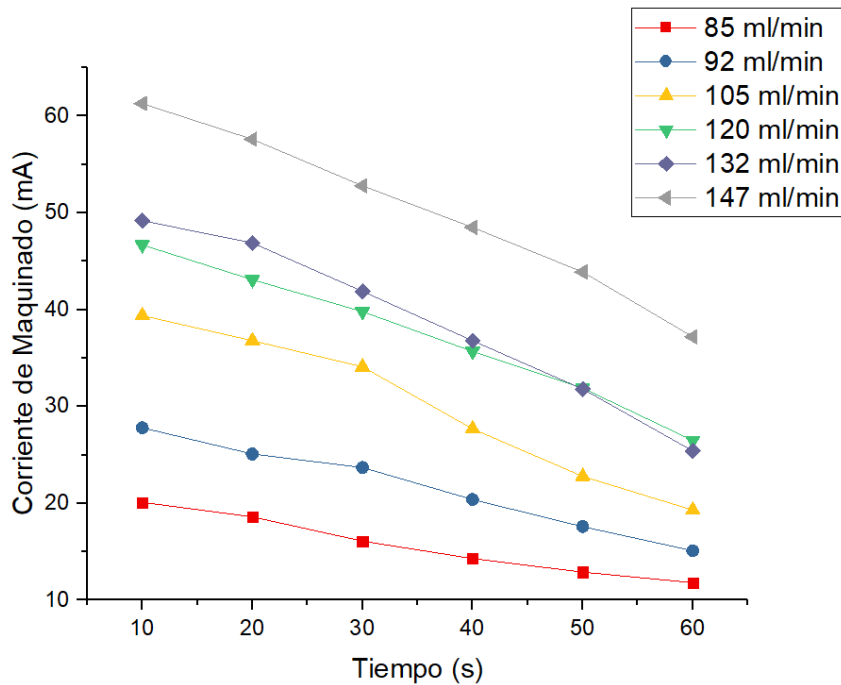


Figura 6.2.1: Corriente de maquinado durante pruebas PECM con variación de flujo de electrolito.

Los resultados del maquinado de esta serie de pruebas pueden ser apreciados en la Figura 6.2.2, donde se realizaron mediciones para determinar el sobre corte resultante, lo que se busca con esta serie de experimentos es determinar bajo qué condiciones del flujo de electrolito el sobre corte sea mínimo y que al mismo tiempo se realice una remoción de material constante, analizando los resultados se pudo comprobar que ante un mayor flujo de electrolito el sobre corte resultante es mayor mientras que a un flujo menor el sobre corte se reduce lo mismo sucede con la tasa de remoción.

Con los resultados obtenidos mostrados en la Figura 6.2.2 se puede determinar que el flujo del electrolito al que se obtendrán los mejores resultados está en el intervalo de 105-120 ml/min, la prueba realizada a 120 ml/min visualmente tiene un resultado aceptable y en términos de sobre corte está dentro del margen de error de 5-8% con respecto al diámetro de la herramienta de trabajo usada, en la prueba a 132 ml/min de la Figura 6.2.2 se puede apreciar una deformación en la geometría del maquinado debido a que el flujo de electrolito se concentró sobre ese punto en específico quizá por una concentración de

residuos propios del proceso lo cual es razón para considerar variar la presión del electrolito durante el proceso para evitar ese tipo de perturbaciones.

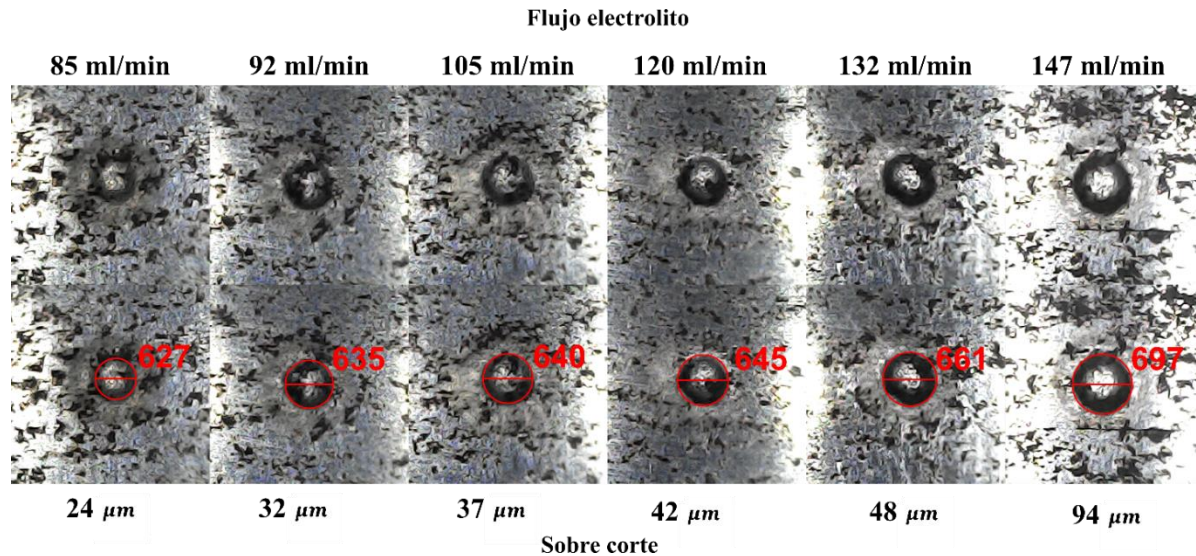


Figura 6.2.2 Resultado de la prueba PECM con variación de flujo de electrolito.

6.3 Caracterización del proceso PECM con variación del flujo de aire del sistema neumático

El incorporar un sistema neumático para inyección directa de aire entre la pieza y herramienta de trabajo permite eliminar el excedente de electrolito y de los remanentes propios del proceso que se pueden alojar entre ambas, son pocos los trabajos de la literatura que abordan el estudio e influencia de un flujo de aire en un proceso PECM o similares, el prototipo de la estación compacta de micro maquinado incorpora un sistema de inyección neumático el cual puede ajustar su altura, ángulo de inyección y presión del flujo de aire. Para conocer la magnitud de la presión de este se incorporó un sensor de presión diferencial y controlando el ciclo de trabajo de la bomba neumática se puede hacer variar la presión de aire que se suministra al proceso de maquinado, conocer el comportamiento del proceso PECM ante un flujo de aire es de vital importancia ya que de esta manera se podrá determinar el parámetro idóneo que ayude al proceso.

Se diseñó una serie de experimentos donde se hace variar el flujo de aire de 6.3 – 8.4 kPa tomando como parámetros de configuración para el sistema los presentados en la Tabla 6.3.1.

Tabla 6.3.1: Configuración de parámetros para experimentación PECM presión de aire variable.

Variable	Magnitud
Frecuencia	25 kHz
Amplitud pulso de maquinado	5 V
Amplitud pulso limpieza	3 V
Ciclo de trabajo	50%
Electrolito	H_2O con una concentración en masa de 16.6% de NaCl
Material de trabajo	Acero AISI 1018
Distancia Inter electrodos inicial	240 μm
Electrodo	Estructura tubular de acero con un diámetro de 603 μm
Relación de pulsos bipolares	12:1
Tiempo de cada prueba	60 segundos
Presión de aire	6.3-8.4 kPa

Mediante esta serie de experimentos se pudo determinar la importancia que tiene la inyección de aire directa entre pieza y herramienta de trabajo, ya que, sin la presencia de este flujo de aire, el proceso de maquinado no se puede realizar de forma eficiente, debido a que el electrolito se acumula entre la herramienta y pieza de trabajo así como los remanentes generados durante el proceso de maquinado con lo cual la resistividad del electrolito disminuye al aumentar el área de exposición por ello la remoción que se realiza es mínima y en otros casos nula tal como lo podemos ver en la Figura 6.3.1, donde se realizaron 2 pruebas de maquinado con una presión de aire de 5.3 y 4.1 kPa, la tasa de remoción es menor e inclusive con una presión de aire inferior la remoción de material no se realiza.



10 μm

Figura 6.3.1: Prueba de maquinado con una presión de flujo de aire menor a 6.2 kPa.

A una mayor presión igual o mayor a 8.4 kPa la corriente de maquinado se eleva en comparación a pruebas realizadas a 7.2 y 6.3 kPa, debido a que el electrolito sigue la trayectoria del flujo de aire suministrado, aumentando el área de exposición, sin embargo, al mantener una presión de 6.3 kPa la remoción se realiza de manera adecuada y no se generan deformaciones en el maquinado resultante. El comportamiento de la corriente de maquinado se visualiza gráficamente la Figura 6.3.2.

De este modo, los resultados de estas pruebas se presentan en la Figura 6.3.3, donde se puede apreciar gráficamente que ante un aumento en la presión de aire del sistema neumático el efecto de sobre corte aumenta respectivamente siendo este criterio menor al aplicar una presión de aire de 6.3 kPa por lo cual se puede tomar este criterio y valores cercanos como parámetro a usar en el sistema.

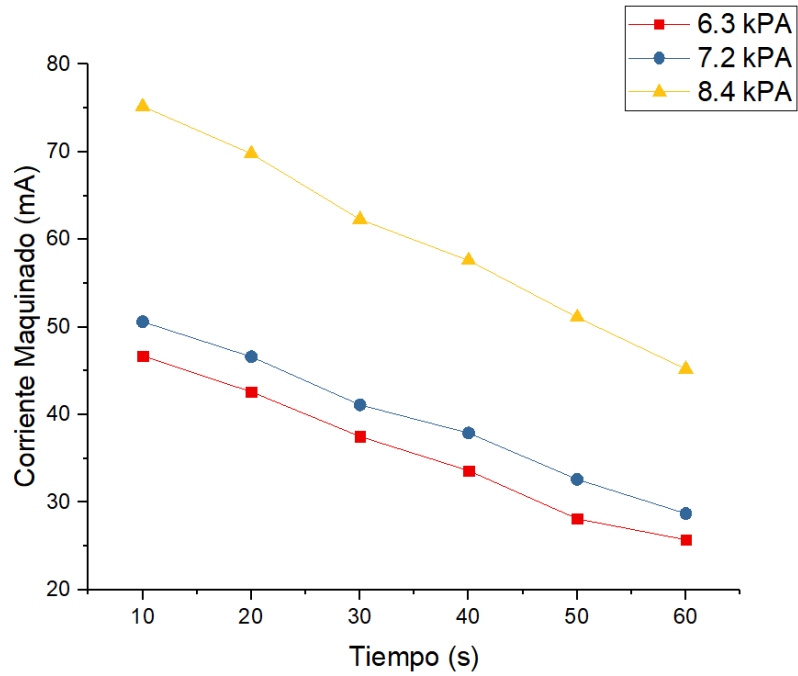


Figura 6.3.2 Corriente de maquinado durante pruebas PECM con variación de presión de aire.

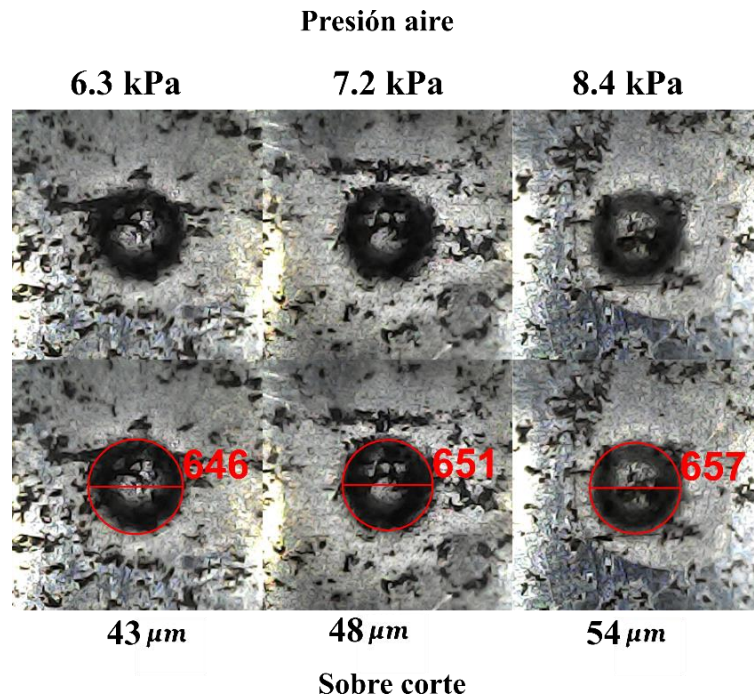


Figura 6.3.3 Resultado de la prueba PECM con variación de presión de aire.

Con los resultados obtenidos también fue posible apreciar los efectos que se presentan al inyectar un flujo de aire a una presión igual o mayor a 8.4 kPa, tan como se muestra en la Figura 6.3.4 (b), generándose un efecto abanico sobre la superficie maquinada, debido a que el electrolito sigue el flujo del aire y con ello se realiza una remoción de material sobre esa dirección.

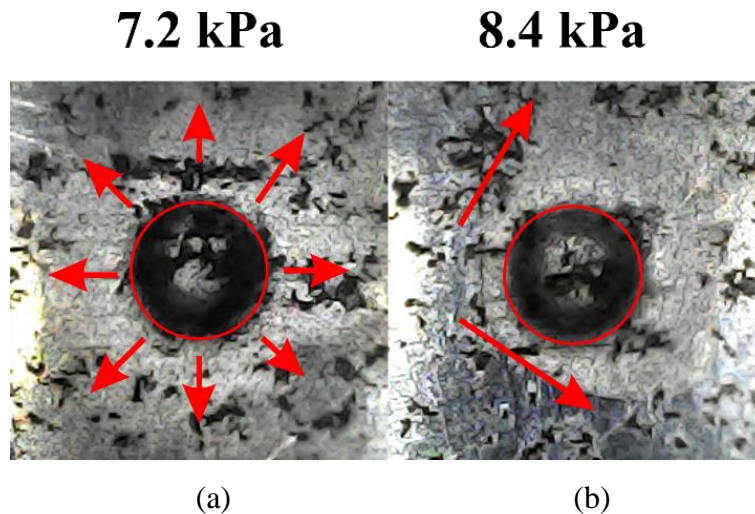


Figura 6.3.4: Efecto abanico presente en maquinados al aplicar un flujo de aire a una presión igual o mayor a 8.4 kPa

6.4 Control difuso MIMO incorporado en estación compacta de micro maquinado electroquímico pulsado

Tomando como referencia la literatura consultada, así como el comportamiento de las variables de interés del proceso PECM, se desarrolló un sistema de control basado en lógica difusa del cual se puede observar el diagrama representativo en la Figura 6.4.1.

El sistema de control difuso toma en consideración la corriente de maquinado, ya que es posible estimar de manera indirecta la distancia inter-electrodos a través de esta magnitud. Para ello, se implementa un enfoque previo utilizando lógica difusa (Gallegos Miranda, 2019), donde se considera la pendiente de la corriente de maquinado debido a su relación con la velocidad de remoción de material. Este parámetro está estrechamente ligado a la

distancia inter-electrodos, por lo que la pendiente de la corriente de maquinado se considera como la primera variable de entrada en el sistema difuso.

Por otro lado, a medida que el proceso avanza y la herramienta penetra en la pieza de trabajo, la magnitud de la corriente de maquinado se ve modificada debido al aumento del área expuesta entre la herramienta y la pieza de trabajo. Por lo tanto, el área expuesta se convierte en la segunda variable de entrada en el sistema difuso, ya que su incremento o decremento influyen directamente en la magnitud de la corriente de maquinado.

La tercera variable de entrada en el sistema de control difuso es el flujo de electrolito. A partir de experimentaciones previas, se ha demostrado que aumentar o disminuir el flujo de electrolito tiene un impacto directo en el comportamiento de la corriente de maquinado y en el efecto de sobre corte resultante. Al incorporar esta variable, se agrega un criterio adicional para la evaluación del comportamiento del sistema.

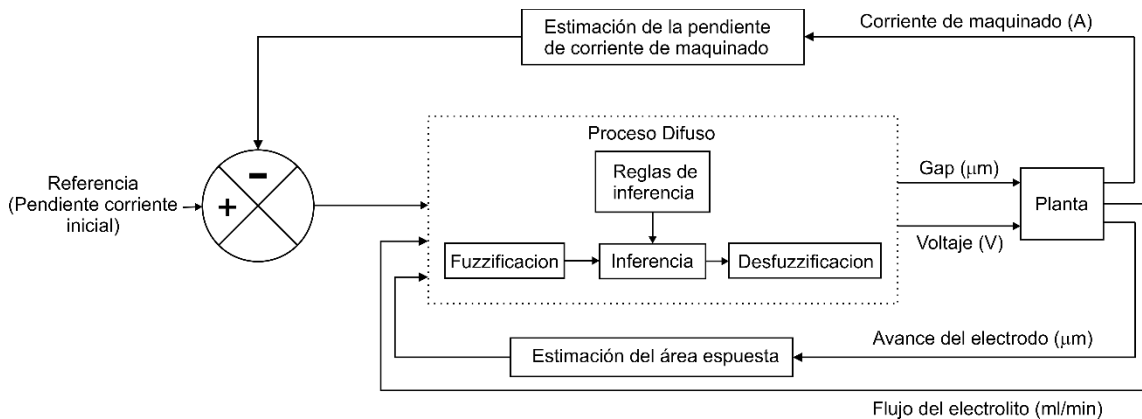


Figura 6.4.1 Diagrama representativo de control difuso para Proceso PECM.

Como resultado del control se obtienen dos variables de salida por un lado el ajuste de la distancia inter-electrodos según sea necesario, así como el voltaje de polarización para compensar lo que con el desplazamiento mecánico no se logra que de esta manera se obtengan maquinados uniformes logrando la profundidad y geometría deseada, reduciendo el sobre corte mientras al mismo tiempo se dispersan los remanentes del propio proceso.

6.4.1 Variables difusas

Las variables difusas brindan la posibilidad de trabajar con medidas de incertidumbre, es decir permiten categorizar un valor por medio de un grado de pertenencia a diferencia de las variables que adoptan un valor de cierto o falso, se hace uso de etiquetas lingüísticas las cuales les permiten para ser identificadas, el control difuso incorporado a la estación de micro maquinado hace uso de 15 etiquetas lingüísticas 3 por cada variable de entrada y de salida mismas que se muestran en la Tabla 6.4.1.

Tabla 6.4.1 Etiquetas lingüísticas de variables difusas de entrada y salida.

Tipo Variable	Variable	Etiqueta lingüística
Entrada	Error de la pendiente de corriente de maquinado	NE (Negativo)
		CE (Cero)
		PO (Positivo)
	Área Expuesta	IN (Inicial)
		ME (Media)
		AV (Avanzada)
	Flujo Electrolito	BA (Bajo)
		ES(Estable)
		AB(Abundante)
Salida	Gap	CR (Cerca)
		NO (Normal)
		LE (Lejos)
	Voltaje	MI (Mínimo)
		RE (Regular)
		AL (Alto)

6.4.2 Conjuntos Difusos

Por cada una de las variables de entrada y salida se genera un conjunto difuso, conformado por funciones de membresía las cuales para esta investigación son de tipo Z, S y Gaussianas, se normalizaron las variables usando el método de máximos y mínimos, quedando en un intervalo de -1 a 1 únicamente para evaluar el parámetro del error de la pendiente de corriente de maquinado y de 0 a 1 para el resto de las variables, en la Figura 6.4.2 se presentan los conjuntos difusos que son empleados para evaluar el error de la pendiente de maquinado.

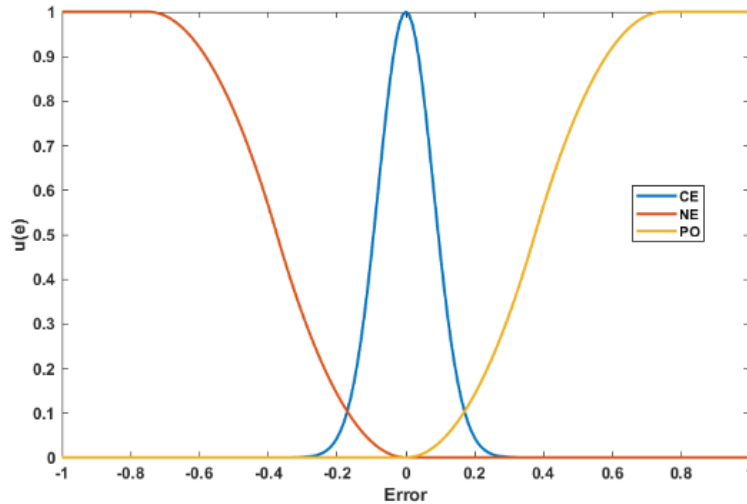


Figura 6.4.2 Funciones de membresía usadas para evaluar el error de la pendiente de maquinado (mA/S).

La variable error permite de manera indirecta estimar la distancia inter electrodos, los movimientos permisibles de la herramienta de trabajo está en $10 \mu m$ de resolución con la que cuenta el sistema mecánico, mediante la experimentación se ha establecido que la distancia inter electrodos puede estar en el rango de $230 - 250 \mu m$, siendo $240 \mu m$ la distancia ideal para que el proceso de maquinado se realice de manera adecuada, por ello cuando el valor del error de la pendiente de maquinado está dentro de los límites de conjunto denotado por la etiqueta lingüística NE (Negativo) significa que la distancia ha disminuido rebasando el umbral de $230 \mu m$, por otro lado cuando el valor del error este en dentro de los límites del conjunto CE (Cero) la distancia será cercana o igual a los $240 \mu m$, finalmente cuando el valor del error este dentro de los límites del conjunto PO (Positivo), la distancia será superior a los $250 \mu m$, ocasionando una reducción en la remoción de material a causa de que la distancia inter electrodos es superior a la requerida para que el proceso se realice de manera adecuada.

El área expuesta existente entre herramienta y pieza de trabajo es la segunda variable de entrada que incorpora el control difuso propuesto, y sus conjuntos difusos se muestran en la Figura 6.4.3.

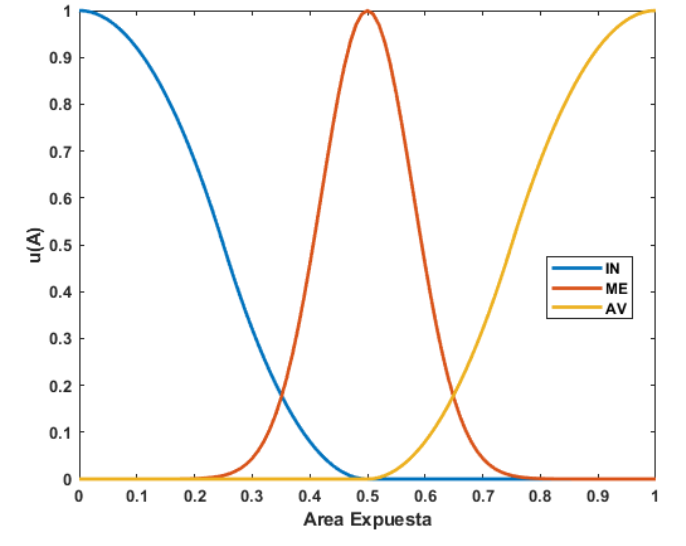


Figura 6.4.3 Funciones de membresía usadas para evaluar el área expuesta (mm^2).

Mientras el proceso de maquinado se realiza y la herramienta de trabajo avanza en dirección vertical, el área expuesta entre esta y la pieza de trabajo aumenta, razón por la cual el comportamiento de la corriente con respecto al tiempo se ve modificado, considerar este criterio permite ajustar las variables de salida, cuando el proceso inicia y hasta una profundidad de $160\mu\text{m}$ se considera el área expuesta perteneciente al conjunto IN (inicial), cuando el área expuesta se encuentra en el intervalo mayor a $160\mu\text{m}$ y menor a $640\mu\text{m}$ toma pertenencia al conjunto ME (media) y al superar lo $640\mu\text{m}$ forma parte del conjunto AV (Avanzada).

Mediante la experimentación previa se identificó la relación existente entre la variación del flujo de electrolito suministrado al proceso PECM y el comportamiento de la Corriente de maquinado y sobre corte resultante, por ello se determinó incorporar como una tercera variable de entrada, las funciones de membresía que evalúan a esta variable se muestran en la Figura 6.4.4.

El conjunto BA (Bajo) indica que el flujo de electrolito está por debajo de los 105 ml/min, cuando el electrolito se mantiene en un rango mayor de 105 ml/min y menor a 120 ml/min toma pertenencia al conjunto ES (estable), mientras que al superar los 120ml/min toma

pertenencia al conjunto AB (abundante). De esta manera se agrega un criterio más a evaluar, y así determinar el comportamiento desarrollo del proceso PECM.

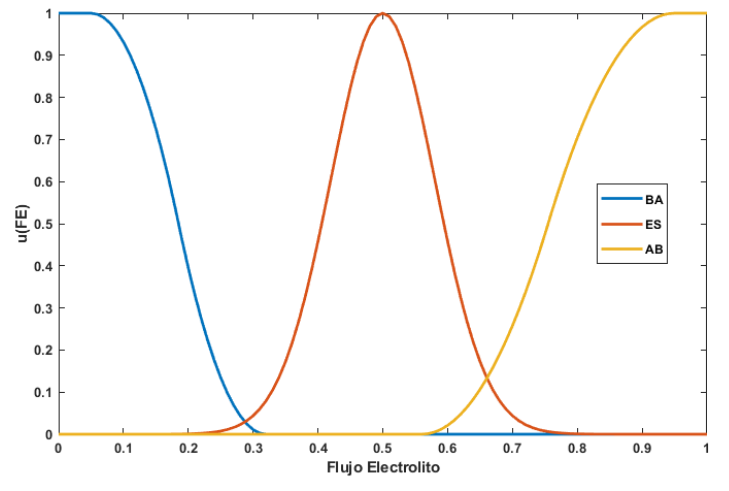


Figura 6.4.4 Funciones de membresía usadas para evaluar el flujo de electrolito suministrado al proceso de maquinado (ml/min).

Así como se tienen conjuntos para las variables de entrada también se tienen para las 2 variables de salida, la primera gap o distancia inter-electrodos de la cual se muestran sus funciones de membresía en la Figura 6.4.5.

La variable con mayor importancia para este tipo de proceso es la corriente de maquinado, debido a que gracias a ella se puede estimar de manera indirecta la distancia inter-electrodos, así mismo mediante su evolución con respecto al tiempo se conoce la pendiente de la misma y con ello el área expuesta entre herramienta y pieza de trabajo, por ello y en mancuerna con las otras variables de entrada y mediante el procesamiento y evaluación del control difuso se puede generar una salida que gobierna al sistema mecánico para realizar el movimiento ascendente o descendente de la herramienta de trabajo.

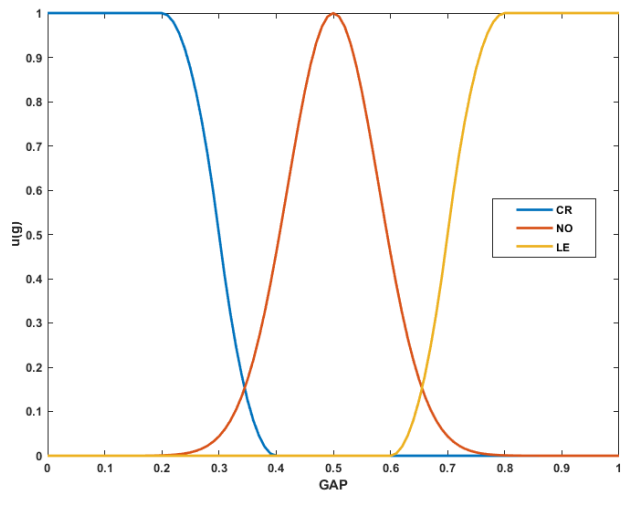


Figura 6.4.5 Funciones de membresía para la variable de salida gap (μm).

Debido a la resolución de $10\mu\text{m}$ que brinda el sistema mecánico es posible ajustar el movimiento de la herramienta de trabajo en esta escala, el conjunto LE (lejos) se hace presente cuanto la distancia inter-electrodos supera los $250\mu\text{m}$, por lo contrario cuando dicha distancia es inferior a los $230\mu\text{m}$ es porque su grado de pertenencia está en el conjunto CE (cerca), mientras la distancia se mantenga en un valor igual o próximo a $240\mu\text{m}$ y a su vez no supere los límites de los dos conjuntos anteriores pertenecerá al conjunto NO (normal).

La segunda variable de salida corresponde al voltaje de polarización que es suministrado para el proceso PECM, las funciones de membrecía pueden ser apreciadas en la Figura 6.4.6, ante las restricciones que nos brinda el sistema mecánico y para complementar el ajuste de la distancia inter-electrodos se regula el voltaje suministrado en un intervalo de 3-7 V, para que con ello se modifique el la magnitud de la corriente de maquinado y su pendiente, manteniendo una remoción de material constante, para ellos los conjuntos MI (mínimo), RE (regular), Al (Alto).

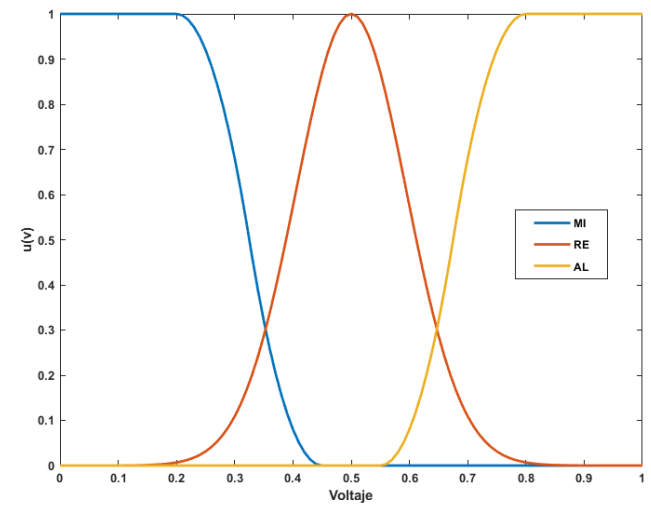


Figura 6.4.6 Funciones de membresía para la variable de salida Voltaje (V).

6.4.3 Defusificación

Una vez procesados los datos por el bloque de inferencia es necesario que las variables de salida estén en términos numéricos que puedan ser procesados fácilmente y no en términos difusos, el conjunto de salida obtenido por la agregación de las reglas es procesado por el método matemático denominado “Centroide”, técnica más empleada en sistemas de este tipo, el cual usa el centro de gravedad de la función característica de salida y se denota matemáticamente en la

$$\bar{y} = \frac{\int y m_B(y) dy}{\int m_B(y) dy} \dots\dots\dots(5.7)$$

donde: m_B es la pertenencia de la función de salida \bar{y} de y .

6.5 Prueba de validación del sistema de control

Para la validación de la estación compacta de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar y de la técnica de control propuesta y desarrollada se diseñaron una serie de experimentos, maquinados fijos de profundidad especifican y maquinados con desplazamiento lineal de profundidad fija y de profundidad variable.

6.5.1 Maquinados fijos de Profundidad específica

Se propusieron 3 pruebas de barrenos ciegos para validar que el sistema desarrollado alcance la profundidad especificada, el criterio a evaluar será la profundidad final alcanzada y el sobre corte resultante, los parámetros de configuración para las pruebas propuestas se presentan en la Tabla 6.5.1.

Tabla 6.5.1. Configuración de parámetros para experimentación PECM para pruebas de barreno ciego con profundidad de 100 μm , 200 μm , 300 μm .

Variable	Magnitud
Frecuencia	25 kHz
Amplitud pulso de maquinado	5 V
Amplitud pulso limpieza	3 V
Ciclo de trabajo	50%
Electrolito	H_2O con una concentración en masa de 16.6% de NaCl
Material de trabajo	Acero AISI 1018
Distancia Inter electrodos inicial	240 μm
Electrodo	Estructura tubular de acero con un diámetro de 603 μm
Relación de pulsos bipolares	12:1
Flujo electrolito	110 ml/min
Presión Sistema neumático	6.3 kPa
Profundidad deseada	100 μm , 200 μm , 300 μm

Con la resolución lograda por el sistema mecánico es posible realizar ajustes de descenso y ascenso de la herramienta de trabajo en intervalos de 10 μm , esto, a cargo del sistema de control difuso, que mediante la corriente de maquinado el valor de la pendiente de esta, el área expuesta y flujo de electrolito determina el momento en el cual realizar estos ajustes.

Para la validación de la estación compacta de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar se realizaron tres pruebas de barrenos ciegos, la primera prueba PBC1 estableciendo una profundidad deseada de 100 μm , la segunda PBC2 con una profundidad deseada de 200 μm y la tercera con una profundidad deseada de 300 μm , para esta serie

de pruebas los criterios a evaluar fueron, la profundidad alcanzada, y el segundo criterio fue el sobre corte resultante. Los resultados de estas pruebas se conglomeran en la Tabla 6.5.2.

Tabla 6.5.2. Resultados de las pruebas de barrenos ciegos de 100, 200 y 400 μm .

Prueba	Profundidad deseada (μm)	Profundidad alcanzada (μm)	Diferencia (μm)	Sobre corte (μm)	Porcentaje Sobre corte (%)	Tiempo (s)
PBC1	100	97	-3	39	6.1	66
PBC2	200	202	+2	65	10.3	143
PBC3	300	306	+6	92	14.3	228

El tiempo de duración de cada prueba fue variable dependiendo directamente de la profundidad a alcanzar, a mayor profundidad mayor es el tiempo de maquinado, la profundidad final de la prueba PBC1 fue de $97\mu m$, $3\mu m$ menos de lo deseado mientras que las pruebas PBC2 y PBC3 alcanzaron una profundidad de $102\mu m$ y $106\mu m$, $2\mu m$ y $6\mu m$ de más respectivamente, si bien no se alcanzó la profundidad deseada el error está dentro de los $10\mu m$ que es la resolución de desplazamiento vertical mínimo del sistema mecánico empleado por lo cual la profundidad final alcanzada está dentro de un intervalo aceptable.

El comportamiento de la corriente de maquinado de las 3 pruebas puede ser apreciada en la Figura 6.5.1, siendo este parámetro el de mayor relevancia debido a que con su magnitud se puede calcular de manera indirecta la distancia inter-electrodos. Se aprecia como en cada una de las pruebas la corriente disminuye para posteriormente retornar a un valor próximo al anterior, cada cambio en la magnitud de la corriente equivale a un descenso vertical de la herramienta de trabajo de $10\mu m$, descenso controlado por el sistema difuso, para que este movimiento se haga en el momento indicado el sistema difuso determina el grado de pertenecía del error de la pendiente de la corriente de maquinado, y no de la magnitud directa de la corriente, esto se debe a que mientras el

proceso de maquinado se desarrolla, y la herramienta penetra la pieza de trabajo, el área expuesta aumenta y con ello la corriente de maquinado, motivo por el cual el sistema difuso toma la pendiente de la corriente entre los descensos de la herramienta, y que cada descenso sea controlado por la variación de la pendiente de la corriente.

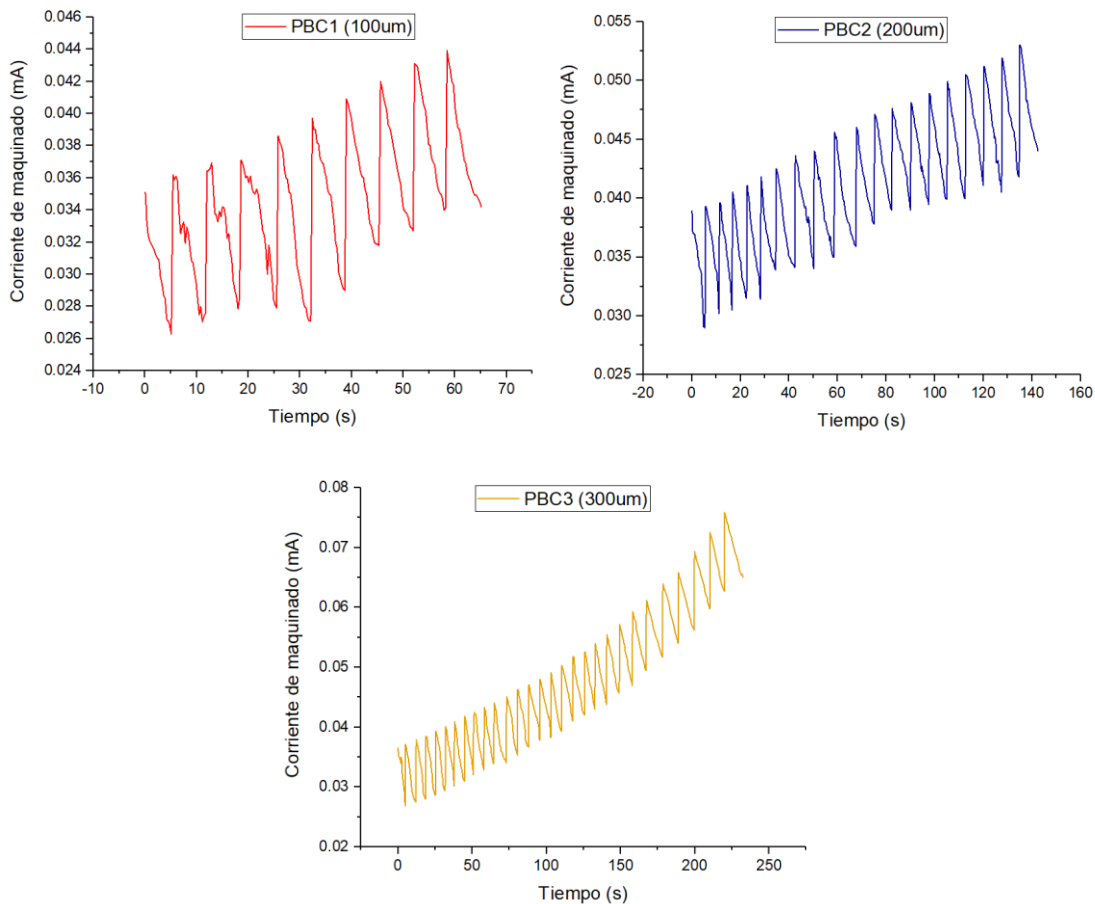


Figura 6.5.1. Corriente de maquinado de pruebas de barrenos ciegos con profundidad de 100, 200 y 300 μm .

En términos generales si el error en la pendiente de la corriente es positivo, significa que el electrodo está a una distancia menor a los 230 μm , por lo cual el sistema difuso debe ajustar la distancia inter electrodos alejando la herramienta de trabajo a tal punto que el error en la pendiente de maquinado este dentro del conjunto CE, por el contrario si el error en la pendiente de la corriente es negativo, este pasa a formar parte del conjunto PO

indicando que la herramienta ha superado la distancia de $250 \mu m$, a lo cual el sistema difuso debe acercar la herramienta a la pieza de trabajo hasta estar lo más próxima a los $240 \mu m$. La magnitud de la corriente de maquinado tiende a aumentar tras cada ajuste debido al aumento en el área expuesta, este fenómeno puede apreciarse en cada una de las pruebas mostradas en la Figura 6.5.1.

Los resultados de las pruebas antes mencionadas se pueden apreciar en la micrografía presentada en la Figura 6.5.2. donde también se presentan los diámetros finales obtenidos, en conjunto con la información presentada en la Tabla 6.5.2, se puede determinar que, a mayor profundidad deseada, mayor es el efecto de sobre corte, sin embargo, algo importante a destacar es el porcentaje de este, el cual no supera el 15% en la prueba de mayor profundidad que es la de $300 \mu m$, indicativo que tanto la maquina desarrollada como el control que gobierna a la misma se desempeñan correctamente.

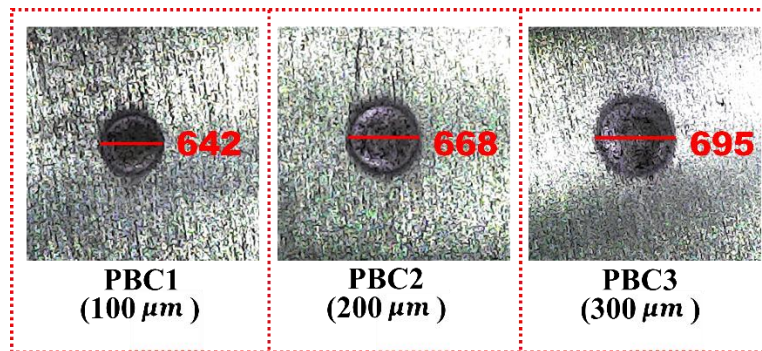


Figura 6.5.2. Micrografía, de las pruebas de barrenos ciegos para profundidad de 100, 200 y $300 \mu m$.

El efecto de sobre corte es un efecto natural del proceso de maquinado electroquímico, causado por la exposición prolongada entre la herramienta y pieza de trabajo, cuando el proceso de maquinado inicia, el área expuesta entre pieza y herramienta únicamente es la base de la herramienta de trabajo, mientras el proceso se desarrolla, la herramienta descende gradualmente para alcanzar la profundidad deseada, con este descenso el área expuesta aumenta por los laterales que agregan área de exposición, misma razón por la cual en las gráficas de corriente de la Figura 6.5.1, se aprecia que tras cada ajuste de descenso de la herramienta de trabajo aumenta gradualmente la corriente de maquinado, el sistema difuso tiene como uno de los criterio de entrada el área expuesta, durante la ejecución de las pruebas se evalúa este criterio y se determina que tanto ha penetrado en

la pieza para que de esta manera en conjunto con el error en la pendiente de maquinado y el flujo de electrolito se asegure el descenso de la herramienta en el momento indicado, una forma gráfica de ver como es el aumento del área expuesta se muestra en la Figura 6.5.3 (A), así un ejemplo grafico del efecto de sobre corte se muestra en la Figura 6.5.3 (B), donde la circunferencia color naranja representa el diámetro de la herramienta de trabajo empleada mientras que la circunferencia verde representa el diámetro final alcanzado en el maquinado, siendo un objetivo de esta investigación reducir en lo posible este excedente y con las pruebas y datos obtenidos de las pruebas reales se puede concluir que este objetivo se cumple.

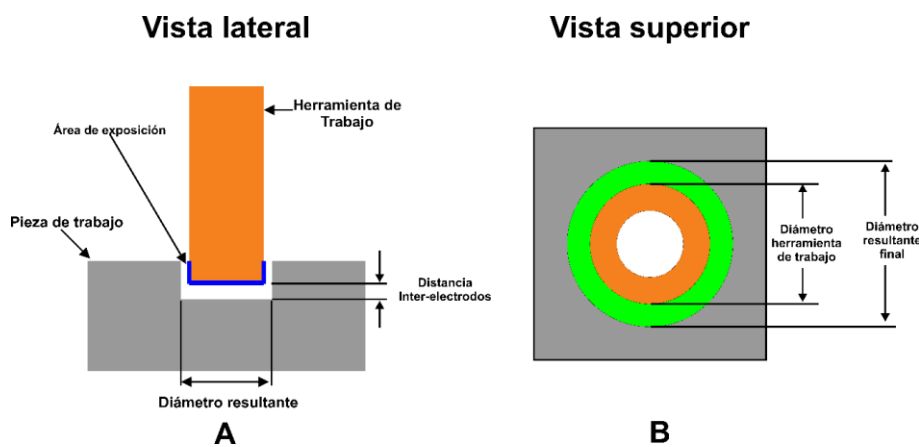


Figura 6.5.3. Aumento en área expuesta (A), efecto de sobre corte (B)

Para esta serie de pruebas en barrenos ciegos de profundidad específica el voltaje de polarización se mantuvo constante en un valor promedio cercano a los 2.5 V, tal como se puede apreciar en la Figura 6.5.4.

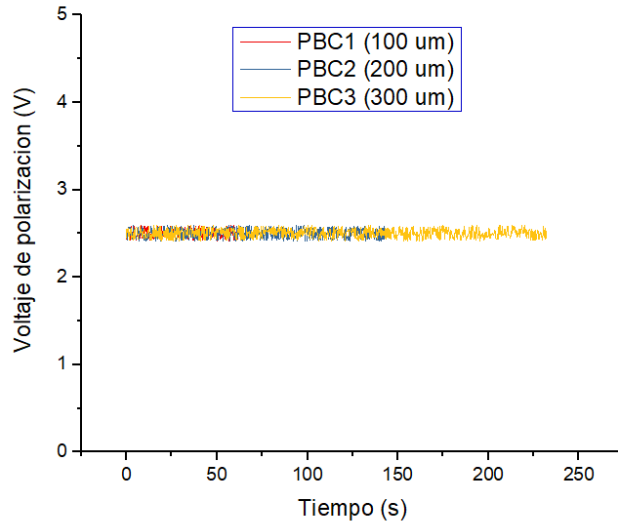


Figura 6.5.4. Evolución del voltaje de polarización, durante pruebas de maquinado de barrenos ciegos.

El sistema difuso no realizó ajustes significativos en la magnitud de esta variable, se presume debido a que los ajustes en descenso se realizaron en intervalos de $10\mu\text{m}$, y que el área expuesta se mantuvo en el conjunto difuso de ME.

El flujo del electrolito también fue monitoreado constantemente debido a que forma parte de las variables de entrada del sistema difuso, su evolución se muestra en la Figura 6.5.5, para las pruebas PBC1 y PBC2 el flujo se mantuvo constante en un promedio de 111 ml/min , fue hasta la prueba PCB3 donde con el aumento en la profundidad se notó un descenso en el flujo del electrolito, teniendo dos descensos considerables durante la prueba.

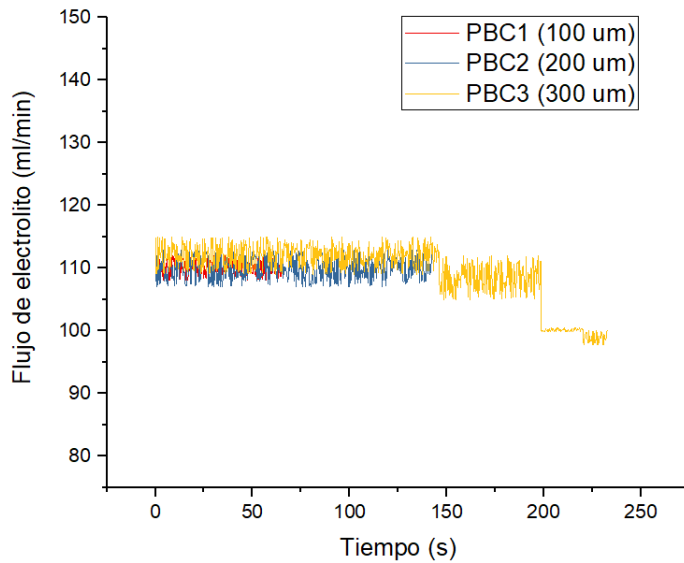


Figura 6.5.5. Flujo de electrolito en pruebas de barrenos ciegos.

Este descenso no resultó en un ajuste del sistema difuso para las variables de salida debido a que se mantuvo perteneciente al conjunto difuso ES, sin embargo, el descenso en el flujo del electrolito es causado por la reducción de espacio entre herramienta y pieza de trabajo, sobre todo en sus laterales, ya que en el caso de la prueba PBC3 posterior a alcanzar los $200\mu m$ tras cada descenso significativo de la herramienta de trabajo, el flujo de electrolito también se vio reducido, una manera grafica de visualizar este efecto se muestra en la Figura 6.5.6 (A), donde al iniciar el proceso y hasta que el área de exposición se encuentra dentro del conjunto difuso IN (inicial), el flujo se mantiene constante, mientras la herramienta desciende, el flujo de electrolito se reduce, y aumenta la presión del mismo, causando que el electrolito salga expulsado agresivamente en todas direcciones, este fenómeno se aprecia en la Figura 6.5.6 (B), en ese momento el flujo de electrolito pasa a formar parte del conjunto BA (bajo), el sistema difuso daría por entendido que la distancia inter electrodos se vio reducida, sin embargo en conglomerado con el error de la pendiente de maquinado y del área expuesta, corrobora que el proceso se está desarrollando de manera correcta por lo cual no genera un ajuste en las variables de salida de Voltaje y Distancia inter electrodos.

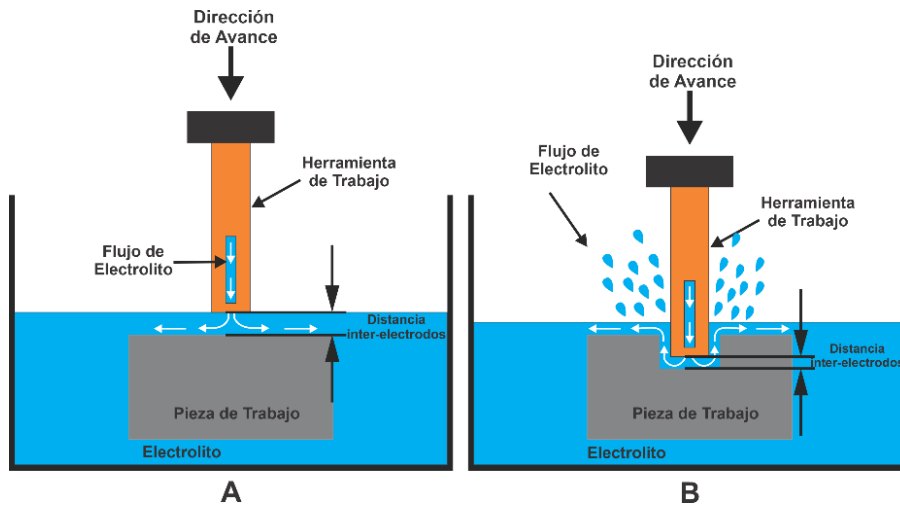


Figura 6.5.6. Comportamiento del flujo de electrolito en barreno ciego al inicio del proceso (A) tras un periodo de maquinado (B).

6.5.2 Maquinado lineal de profundidad específica

Para la validación del sistema en la ejecución de maquinados con desplazamiento horizontal y vertical se diseñaron 2 pruebas, la primera PL1 estableciendo una profundidad deseada de $100 \mu\text{m}$ con un desplazamiento lineal de 10 mm , la segunda PL2, con una profundidad deseada de $200 \mu\text{m}$ y un desplazamiento lineal de 10 mm , el desplazamiento lineal se realizó con un Angulo de 90° con respecto a la herramienta de trabajo tal como se puede apreciar en la Figura 6.5.7, asegurando que la pieza de trabajo se encuentre completamente en Angulo respecto a la herramienta de trabajo sobre toda su superficie, esto se logró gracias a la incorporación de los 4 tornillos de ajuste independientes sobre los cuales está posicionada el recipiente donde se coloca la pieza de trabajo. La configuración de los parámetros para estas pruebas se presenta en la Tabla 6.5.3.

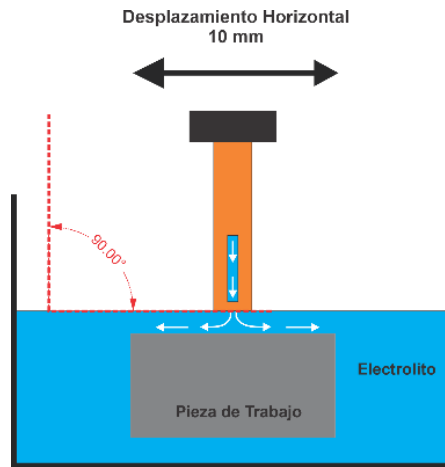


Figura 6.5.7 Desplazamiento lineal de herramienta de trabajo en Angulo de 90° respecto a pieza de trabajo.

Tabla 6.5.3 Configuración de parámetros para experimentación PECM para pruebas con desplazamiento lineal de 10mm y profundidad de 100 y 200 μm .

Variable	Magnitud
Frecuencia	25 kHz
Amplitud pulso de maquinado	5 V
Amplitud pulso limpieza	3 V
Ciclo de trabajo	50%
Electrolito	H_2O con una concentración en masa de 16.6% de NaCl
Material de trabajo	Acero AISI 1018
Distancia Inter electrodos inicial	240 μm
Electrodo	Estructura tubular de acero con un diámetro de 603 μm
Relación de pulsos bipolares	12:1
Flujo electrolito	110 ml/min
Presión Sistema neumático	6.3 kPa
Profundidad deseada	100 μm , 200 μm
Desplazamiento lineal	10 mm

Una vez realizadas las pruebas de maquinado, se procedieron a analizar los resultados, la profundidad final alcanzada y el sobre corte son los criterios de evaluación, para

determinar la profundidad final alcanzada a lo largo de la trayectoria lineal, se tomaron 10 muestras distribuidas a lo largo de la trayectoria en la Figura 6.5.8, se muestra la ejemplificación de los puntos de medición para ambas pruebas.

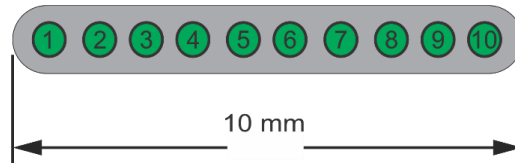


Figura 6.5.8 Puntos de medición para pruebas de maquinado lineal.

En la Tabla 6.5.4, se presentan los resultados de las mediciones tomadas y la diferencia entre esta y la esperada, es notorio que las mediciones tomadas en ambos laterales de los maquinados son superiores en comparación con las del interior de la trayectoria, esto es causado por el tiempo de exposición entre herramienta y pieza de trabajo, ya que con cada desplazamiento de derecha a izquierda la herramienta de trabajo permanece más tiempo en los laterales del maquinado. La diferencia entre la medición esperada y la real no supera los $10\mu m$, lo cual puede considerarse un valor satisfactorio debido a que no supera la resolución mínima empleada por el sistema mecánico.

La evolución de la corriente de maquinado para ambas pruebas puede ser apreciada en la Figura 6.5.9, el tiempo de duración para la prueba con profundidad de $100\mu m$ fue de 692 segundos, mientras que para la prueba con profundidad de $200\mu m$ el tiempo de duración fue de 975 segundos, lo cual difiere considerable en comparación con pruebas en barrenos ciegos, esto debido a no solo se está ejecutando un desplazamiento vertical, si no también uno horizontal para cubrir el área deseada a maquinar, para la prueba PL1 Figura 6.5.9 (A) se puede notar que tras cada ajuste de descenso la corriente de maquinado aumenta gradualmente debido a que el área de exposición aumenta, sin embargo tras cada salto la pendiente en la corriente de maquinado se mantiene, para la prueba de PL2 Figura 6.5.9 (B) donde la profundidad a alcanzar es mayor, se aprecia aumentos significativos en la corriente de maquinado de igual forma debido al aumento gradual del área de exposición.

Tabla 6.5.4. Resultados de profundidad en maquinado lineales de 100 y 200 μm .

Prueba	Profundidad deseada (μm)	Profundidad alcanzada (μm)	Diferencia (μm)	
PL1	1	100	107	7
	2	100	101	1
	3	100	99	-1
	4	100	101	1
	5	100	100	0
	6	100	99	-1
	7	100	98	-2
	8	100	101	1
	9	100	101	1
	10	100	106	6
PL2	1	200	208	8
	2	200	203	3
	3	200	202	2
	4	200	201	1
	5	200	200	0
	6	200	201	1
	7	200	201	1
	8	200	202	2
	9	200	201	1
	10	200	207	7

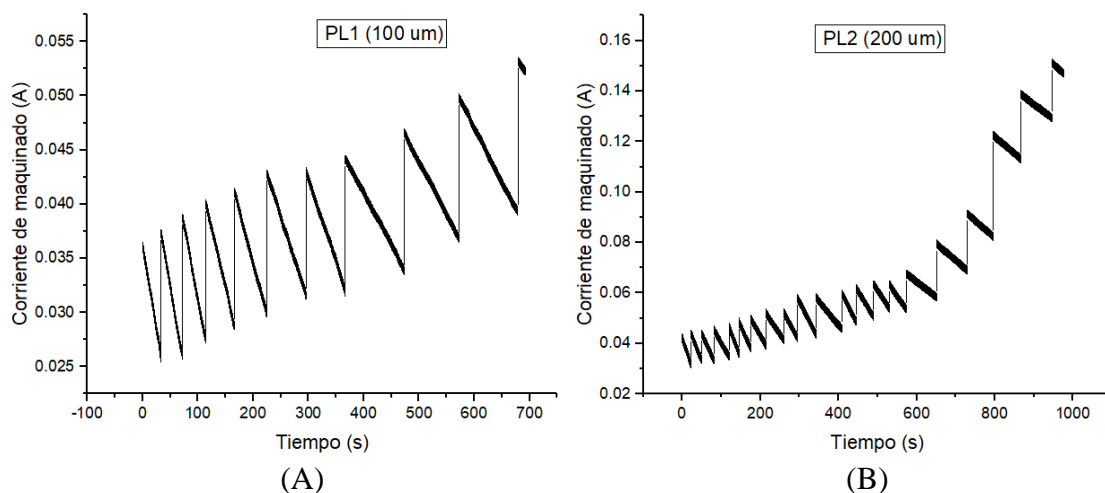


Figura 6.5.9. Corriente de maquinado para pruebas lineales con profundidad de 100 μm (A) y 200 μm (B).

La prueba PL1 puede ser apreciada en la micrografía presentada en la Figura 6.5.10, mientras que la prueba PL2 puede ser apreciada en la micrografía de la Figura 6.5.11. El sobre corte resultante y su equivalente en porcentaje se presentan la Tabla 6.5.5.

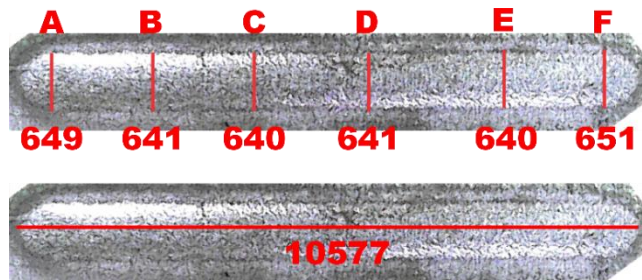


Figura 6.5.10. Micrografía de prueba de maquinado lineal de 100 μm de profundidad

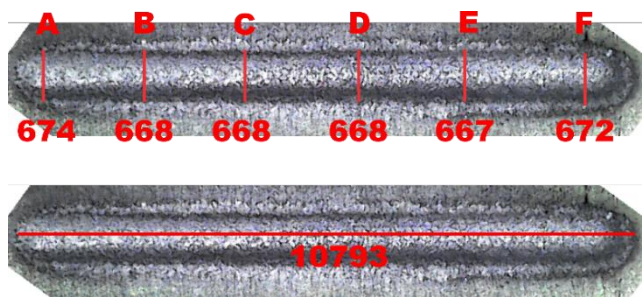


Figura 6.5.11 Micrografía de prueba de maquinado lineal de 200 μm de profundidad.

Tabla 6.5.5 Sobre corte resultante en pruebas de maquinado lineal.

	Punto de medición	Sobre corte μm	Porcentaje sobre corte %
PL1	A	46	7.6
	B	38	6.3
	C	37	6.1
	D	38	6.3
	E	37	6.1
	F	48	8
PL2	A	71	11.8
	B	65	10.8
	C	65	10.8
	D	65	10.8
	E	64	10.6
	F	69	11.4

Se corrobora que el tiempo de exposición prolongada en los laterales de los maquinados afecta directamente tanto en la profundidad como en el sobre corte, resultando en un ensanchamiento superior en el diámetro final de las secciones laterales del maquinado, este efecto es notorio en pruebas con profundidad superior donde por ende , el tiempo de maquinado es mayor, la longitud final alcanzada para la prueba de $100\mu m$ se excedió por $57\mu m$, mientras que la de $200\mu m$ se excedió por $79\mu m$, esto a causa de tiempo de exposición y área expuesta en los laterales de los maquinados.

El voltaje de polarización para la prueba PL1 no fue ajustado por el sistema difuso en gran medida por los ajustes verticales que se dan en un rango de los $10\mu m$, en conjunto a que el área de exposición se mantiene dentro del conjunto difuso IN (inicial), por otro lado, para la prueba PL2 se realizó un único ajuste de voltaje de polarización debido a que el área de exposición aumento, y la pendiente de corriente de maquinado comenzó a tener pertenencia al conjunto PO (positivo), por lo cual el sistema difuso realizo un ajuste de 200 mA para compensar esta situación.

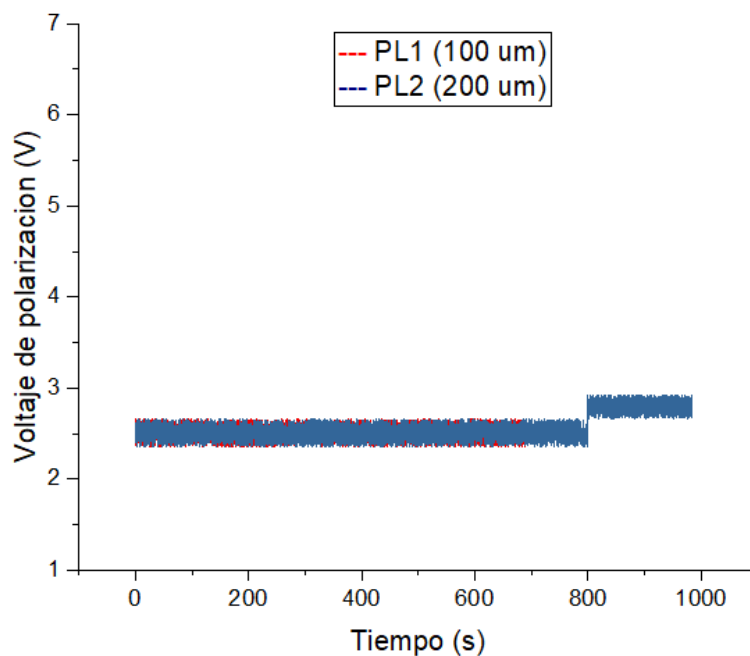


Figura 6.5.12 Evolución del voltaje de polarización para pruebas de maquinado lineales de 100 y 200 μm .

A medida que el proceso de maquinado, se desarrolla, el flujo de electrolito tiende a disminuir, debido a que como se explicó en la sección 6.5.1, la distancia lateral entre herramienta y pieza disminuye considerablemente por el descenso de la herramienta de trabajo, lo cual genera un menor flujo de electrolito y que el mismo salga proyectado en todas direcciones producto de la presión del mismo, se confirma que el uso de esta variable como entrada para el sistema difuso sirve con un criterio más a evaluar debido a que a pesar que el flujo baja y su magnitud pasa a formar parte del conjunto difuso BA, el sistema difuso evalúa este criterio en conjunto con el área expuesta y error de la pendiente en la corriente de maquinado, para que se ajuste tanto la distancia inter electrodos como el voltaje de polarización, la evolución del flujo del electrolito para estas pruebas puede ser apreciado en la Figura 6.5.13.

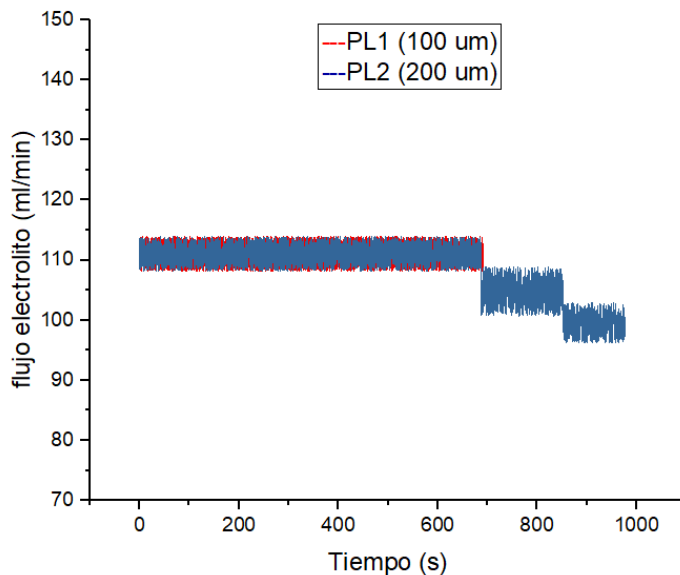


Figura 6.5.13. Flujo de electrolito para pruebas de maquinado lineal con profundidad de 100 y 200 μm .

6.5.3 Maquinado lineal de profundidad variable

Tras los resultados obtenidos con las pruebas anteriores se determinó poner a prueba la respuesta del sistema desarrollado ante un desplazamiento lineal cuya trayectoria no tuviera una altura uniforme, se planteó colocar la pieza de trabajo con una inclinación de 8.9° tal como se puede apreciar en la Figura 6.5.14(A), con el objetivo que el sistema

difuso pudiera identificar esta variación de la altura durante la trayectoria lineal en la que se desplaza la herramienta de trabajo y a su vez lograr el ajuste de la misma, para mantener lo más cercano a los $240\mu\text{m}$ la distancia inter electrodos a lo largo de la trayectoria a maquinar y así el maquinado resultante tuviera la misma altura, siendo indiferente ante la variación de profundidad entre el punto inicial y final de la prueba, obteniendo un resultado similar al ejemplificado en la Figura 6.5.14 (B), para fines prácticos se definirá a la prueba de barrenado lineal con perturbación como (PLCP) por su siglas. Para esta prueba los parámetros de configuración se presentan en la Tabla 6.5.6.

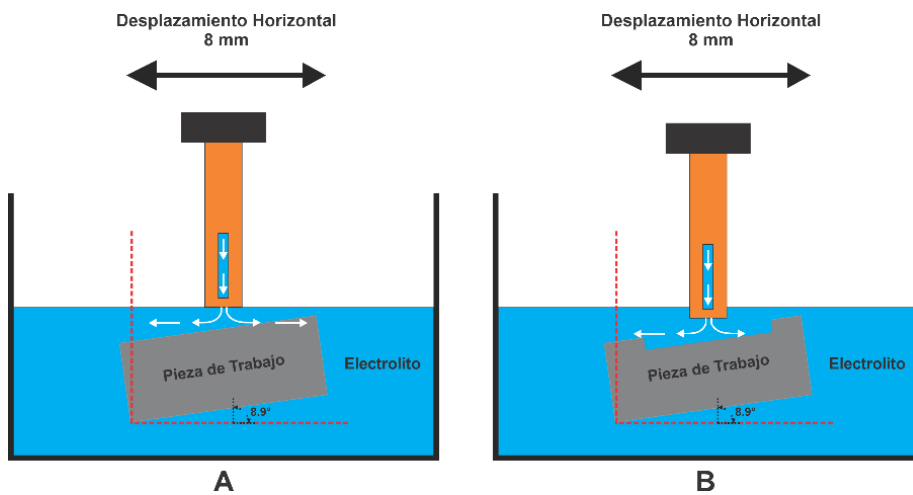


Figura 6.5.14 Prueba de maquina lineal con inclinación de 8.9° al inicio del proceso (A), transcurrido un periodo de tiempo de maquinado (B).

Tabla 6.5.6. Parámetros de configuración para Prueba lineal con inclinación de 8.9° y profundidad de $250\mu\text{m}$.

Variable	Magnitud
Frecuencia	25 kHz
Amplitud pulso de maquinado	5 V
Amplitud pulso limpieza	3 V
Ciclo de trabajo	50%
Electrolito	H_2O con una concentración en masa de 16.6% de NaCl
Material de trabajo	Acero AISI 1018

Distancia Inter electrodos inicial	240 μm
Electrodo	Estructura tubular de acero con un diámetro de 603 μm
Relación de pulsos bipolares	12:1
Flujo electrolito	110 ml/min
Presión Sistema neumático	6.3 kPa
Profundidad deseada	250 μm
Desplazamiento lineal	10 mm
Inclinación de la pieza de trabajo	8.9°

Para conocer la profundidad final a lo largo de la trayectoria se realizaron 8 puntos de medición acorde a la ilustración mostrada en la Figura 6.5.15.

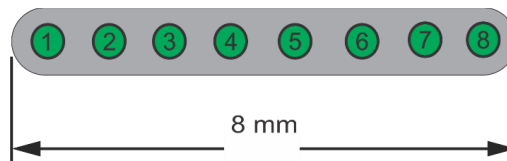


Figura 6.5.15 Puntos de medición para prueba lineal con inclinación de 8.9° y 250 μm de profundidad.

Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 6.5.7, en estos resultado se puede apreciar que la distancia final alcanzada va en decremento con respecto a la dirección de la inclinación, la diferencia entre los distintos puntos de medición no representan más de 10 μm , que es la resolución de desplazamiento vertical mínima del sistema mecanico, indicativo que se está removiendo el material de manera homogénea a lo largo de la trayectoria, y que el sistema está realizando los ajustes de descenso y ascenso con respecto a la dirección de avance y respecto a la inclinación en la que se encuentra la pieza de trabajo.

Tabla 6.5.7: Medición de profundidad en los distintos puntos de la trayectoria maquinada.

Prueba	Punto de medición	profundidad deseada (μm)	profundidad alcanzada (μm)	Diferencia (μm)
PLCP	1	250	256	6
	2	250	253	3
	3	250	249	-1
	4	250	249	-1
	5	250	251	1
	6	250	249	-1
	7	250	249	-1
	8	250	252	2

La evolución de la corriente de maquinado para la prueba PLCP se muestra en la Figura 6.5.16, se aprecian los ajustes en el descenso de la herramienta de trabajo para mantener la distancia inter electrodos lo más cercana a $240\mu m$, su evolución es similar a la de un maquinado lineal, si embargo al ampliar una sección de la gráfica es notorio apreciar cómo mientras se da el desplazamiento lineal, el sistema difuso mediante el monitoreo constante de las variables de interés es capaz de detectar las variaciones de altura reflejadas en la disminución espontánea de la corriente de maquinado, en ese momento el error de la pendiente de la corriente de maquinado tiene un grado de pertenencia mayor al conjunto NE, indicando que la distancia entre la herramienta y pieza de trabajo disminuyó por lo cual la respuesta para compensar esto es ajustar la altura de la herramienta de trabajo hasta que el valor del error de la pendiente de maquinado tenga el grado de pertenencia mayor al conjunto CE.

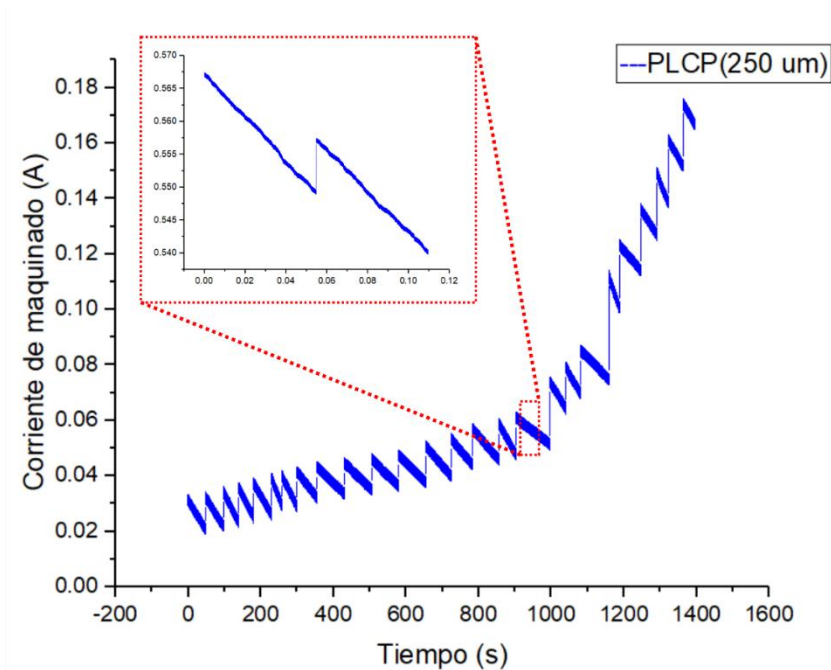


Figura 6.5.16 Corriente de maquinado para prueba lineal con inclinación de 8.9° y profundidad de 250µm

Los resultados de la prueba de maquinado se pueden observar en la micrografía de la Figura 6.5.17, es notorio en ensanchamiento de los laterales por el tiempo de exposición, así como una ancho que decrementa en sentido a donde se encontraba la inclinación de la pieza, debido a que los ajustes de descenso para la inclinación también están en el orden de la resolución del sistema mecánico por lo cual se distribuyen a lo largo de la trayectoria; asimismo, el área de exposición de la base de la herramienta de trabajo no es uniforme, al estar inclinada la pieza de trabajo, una sección de la base de la herramienta esta siempre más cerca que la otra por lo cual la remoción de material y justes de descenso se realizan en un periodo de tiempo más largo, así como la duración total de la prueba de maquinado, la longitud final alcanzada presenta un excedente de 126µm es decir 63µm por lateral lo cual sitúa el error dentro del 10%, confirmando la ejecución y correcto funcionamiento

tanto de la estación compacta de micro maquinado, como de la estrategia difusa incorporada para gobernar a la misma.

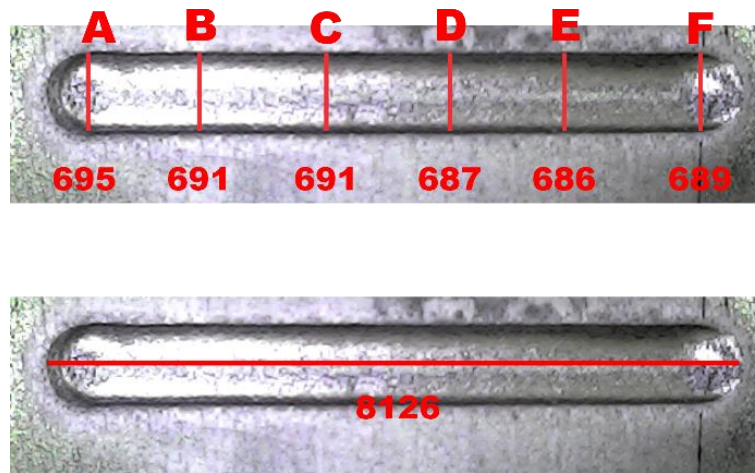


Figura 6.5.17. Micrografía de la prueba de maquinado lineal de 8mm con inclinación de 8.9°.

Se tomaron medidas para determinar el ancho sobre la trayectoria del maquinado según los puntos de distribución mostrados en la Figura 6.5.15, se confirma que entre mayor sea la profundidad deseada a alcanzar mayor es el efecto de sobre corte, sin embargo, para la profundidad alcanzada el mayor punto de sobre corte esta cercano al 15% respecto al diámetro de la herramienta de trabajo.

Tabla 6.5.8. Sobre corte resultando sobre trayectoria de maquinado lineal con inclinación de 8.9°.

Prueba	punto de medición	sobre corte (μm)	porcentaje sobre corte %
PLCP	A	92	15.3
	B	88	14.6
	C	88	14.6
	D	84	13.9
	E	83	13.8
	F	86	14.3

Para esta prueba la variable eléctrica de voltaje de polarización recibió 2 ajustes, para compensar lo que no se logra con desplazamiento mecánico de la herramienta de trabajo aumentando la corriente de maquinado y manteniendo el valor de la pendiente del error de esta, los ajustes de descenso se realizaron de manera más frecuente, la evolución del voltaje de polarización puede ser apreciados en la Figura 6.5.18.

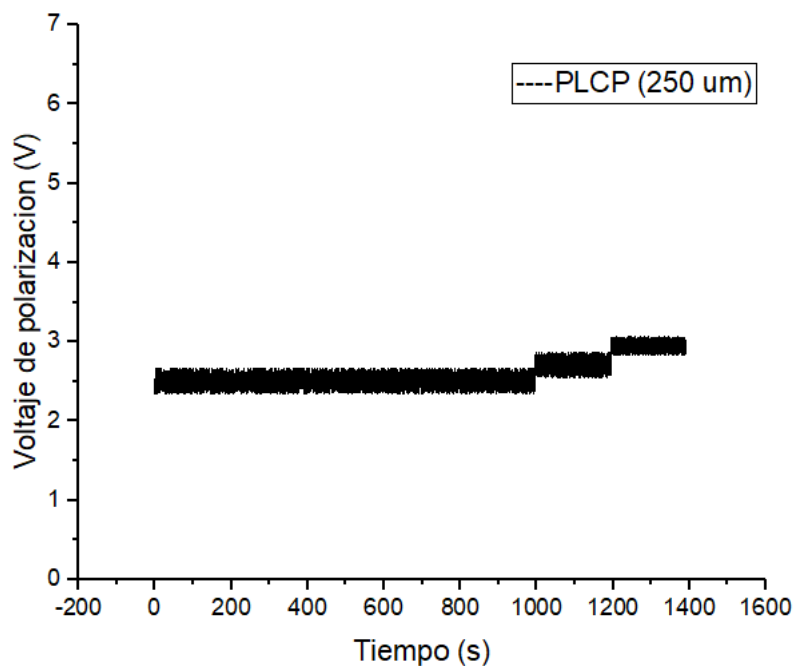


Figura 6.5.18. Voltaje de polarización de la prueba de maquinado lineal con inclinación de 8.9°.

Al aumentar la profundidad de los maquinados, las variables de entrada desempeñan un papel cada vez más importante, el claro ejemplo es el flujo de electrolito, el cual ayuda a determinar en conjunto con el área expuesta y la pendiente del error de la corriente de maquinado el momento específico para descender la herramienta de trabajo y en caso de ser necesario, ajustar el voltaje de polarización, para el caso de esta prueba mientras el área expuesta aumentaba su grado de pertenencia al conjunto ME y la pendiente del error de la corriente de maquinado se encontraba en el conjunto NE, el sistema difuso pasa a considerar el flujo del electrolito el cual al mantenerse en el conjunto ES y pasar al

conjunto BA, es indicativo de que la distancia inter electrodos está disminuyendo y por lo cual además de realizar un ajuste en el descenso de la herramienta, es necesario realizar un ajuste en el voltaje para que de esa manera la remoción de material aumente y se pueda llegar a la distancia inter electrodos de inicio.

7 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Se desarrolló una estación compacta de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar que cumple con las características necesarias para realizar de manera adecuada el proceso de maquinado electroquímico y sus variantes. La estación cuenta con herramientas de monitoreo y control para las variables de interés, y su resolución mecánica permite trabajar en el rango de los micrómetros. Además, incorpora un sistema de filtrado por decantación y regulación del suministro de electrolito, así como un sistema neumático para la inyección de aire directamente sobre la superficie a maquinar. Esta técnica es poco estudiada y analizada por la comunidad científica, lo que convierte a este prototipo en pionero en su uso como sistema de dispersión de remanentes y excesos de electrolito entre la herramienta y la pieza de trabajo, como parte de la investigación realizada en el área de sistemas existentes y registrados a nivel nacional e internacional, en su mayoría no incorporan sistemas similares para dispersión de remanentes.

La estrategia difusa propuesta y desarrollada para controlar esta estación de micro maquinado ha demostrado generar resultados satisfactorios dentro de un margen de error que va del 8 al 15% de efecto de sobre corte, que se encuentra dentro de la resolución mínima del sistema mecánico. La incorporación del área expuesta, el error en la pendiente de maquinado y el flujo de electrolito brindan aspectos adicionales para evaluar y ajustar correctamente las salidas del sistema difuso. El flujo de electrolito se convierte en un indicador que permite al sistema difuso ajustar la distancia inter-electrodos y el voltaje de polarización. Si existe flujo, significa que aún está presente una distancia mínima entre la herramienta y la pieza de trabajo. Por otro lado, si el sistema se ve obstruido o hay un exceso de electrolito entre la pieza y la herramienta de trabajo debido a una falla en el sistema neumático, la magnitud del flujo de electrolito puede identificar estos tipos de fallos y llevar el sistema a un punto seguro de funcionamiento.

Con este trabajo, se logró desarrollar maquinado a escala micrométrica gracias a la resolución de 10 μm en el desplazamiento de los ejes mecánicos. Esto representa un avance en comparación con trabajos anteriores, donde solo se podía trabajar a una resolución de 20 μm . Sin embargo, se ha alcanzado el límite mecánico para estos maquinados, ya que a medida que se busca una resolución menor, se requerirá una mayor

resolución en el sistema de monitoreo y una mayor capacidad de cómputo para la estrategia de control.

Se confirma que a medida que se aumenta la profundidad a alcanzar, aumenta el efecto de sobre corte, lo que implica ajustes más frecuentes en el descenso y el voltaje, llegando al límite de las capacidades físicas y eléctricas.

Por otro lado, la incorporación de una fuente de voltaje pulsada bipolar permite realizar un proceso de limpieza para prolongar el tiempo de maquinado y reducir la duración del proceso en comparación con un sistema que utiliza fuentes de corriente continua.

El prototipo sigue en desarrollo, y en la fecha de redacción de este escrito, se ejecuta mediante línea de código. Se propone como trabajo a futuro la creación de una interfaz gráfica amigable para el usuario que facilite la ejecución y configuración del sistema.

Asimismo, en el futuro, se evalúa la posibilidad de integrar el control del flujo de salida del electrolito y del flujo de aire. Esto permitiría compensar lo que no pueda ser realizado por el sistema mecánico y la fuente de voltaje. Como se mostró en las pruebas de caracterización, el flujo de electrolito y el flujo de aire están estrechamente relacionados con el sobre corte y la velocidad de remoción de material. Esto brinda la oportunidad de desarrollar un sistema de control MIMO con más variables de entrada y salida, lo que resultaría en una técnica más robusta capaz de ajustarse ante las mínimas perturbaciones y obtener resultados aún mejores.

Referencias

Abou Ziki, J. & Wüthrich, R., 2015. The machining gap during constant by velocity-feed glass micro-drilling Spark Assisted Chemical Engraving. *Journal of Manufacturing Processes*, Issue 19, pp. 87-94.

Altena, H. S. & De Silva, M., 2012. Precision ECM by Process Characteristic Modelling. *CIRP Annals*, 49(15), pp. 151-155.

Annamaa, A., 2015. Thonny: a Python IDE for Learning Programming. *Proceedings of the 2015 ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education*, Issue 1, p. 343.

Armendariz, A. & Pérez, T. A., 2019. *Casos prácticos para diseño de bases de datos*. s.l.:TAPAI Publishers.

Asokan, P., Ravi Kumar , R. & Jeyapaul , R., 2008. Development of multi-objective optimization models for electrochemical machining process. *Int J Adv Manuf Technol* , Issue 39, pp. 55-63.

Barba Soler, J. P., 2014. *Diseño Y Desarrollo Web*. Valencia: Politécnica de Valencia.

Bautista Roldán, J. & Jesús Gámiz Pérez, F., 2011. *Dispositivos Electrónicos*. Primera ed. Perú: U - Ra-ma Editorial.

Beekman, G., 2016. *Introducción a la Informática*. Madrid: Pearson.

Catarino Aguilar, O., 2017. *Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un proceso de Maquinado Electroquímico*. Atlacomulco: Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Chazallet, S., 2015. *Python 3: Los Fundamentos Del Lenguaje*. España: ENI.

Chen , M., Qiu , Y., Chen , W. & Zheng , T., 2014. The design and implementation of ECM control system. *26th Chinese Control and Decision Conference* , pp. 3829-3833.

Chen, . Y., Jia, . Z. & Huang , Z., 2008. Development and Realization of ECM Machine Tool Control System Based on PLC. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, Issue 7, pp. 77-80.

Chithirai Pon, S., Sahith Reddy , M. & Sampath S., S., 2017. Review of the Current State of Research and Development in Electrochemical Machining. *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 1(1), pp. 14-26.

Clemente, P., 2014. *Diseño Web Adaptativo*. Madrid: Anaya Multimedia.

Cuadra Fernández, . D., 2013. *Desarrollo de Bases de Datos. Casos prácticos desde el análisis a la implementación*. s.l.:RA-MA Editorial.

Del Brio, B. M. & Sanz Molina, A., 2015. *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*. Ciudad de Mexico: AlfaOmega.

Fang, X., Qu, N. & Zhang, Y., 2014. Effects of pulsating electrolyte flow in electrochemical machining. *Journal of Materials Processing Technology*, Issue 214, pp. 36-43.

Feng, Z., Granda, E. & Hung, W., 2016. Experimental Investigation of Vibration-Assisted Pulsed Electrochemical Machining. *Procedia Manufacturing*, 5(1), pp. 798-814.

Franklin, C., 2012. *Circuitos integrados y sistemas*. 4 ed. EUA: Reverte.

Gallegos Miranda, I., 2019. *Sistema Computacional para la remoción controlada de Material en un proceso de Maquinado Electroquímico por Pulsos*. Atlacomulco: Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Gallegos Miranda, I., Pérez Martínez, J. A. & Granda Gutiérrez, . E. E., 2019. Control de la distancia inter electrodos en un proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos (PECMM). *Research in Computing Science*, 8(148).

Gallegos Miranda, I., Pérez Martínez, J. A., Granda Gutiérrez, E. E. & Flores Fuentes, A. A., 2018. Caracterización de Proceso de Maquinado Electroquímico por Pulsos (PECM). *Journal CIM*, 6(1).

Geron, A., 2019. *Aprende Machine Learning con Scikit-Learn, Keras y TensorFlow*. Madrid: Anaya Multimedia.

Gilfillan, I., 2011. *La Biblia de Mysql*. 10 ed. Madrid: Anaya Multimedia.

Grover P., M., 2010. *Fundamentos de Manufactura Moderna*. 4° ed. México: Mc GrawHill.

Guixian , L., Zhang, Y. & Natsu, . W., 2019. Influence of electrolyte flow mode on characteristics of electrochemical machining with electrolyte suction tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.

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.

Hassan, A. & Gawad , E.-H., 2005. *Advanced Machining Processes*. Alexandria: McGraw-Hill.

He, H. D., Qu, N. S., Zeng, Y. B. & Tong, P. Z., 2017. Improvement of Hydrogen Bubbles Detaching from the Tool Surface in Micro Wire Electrochemical Machining by Applying Surface Microstructures. *Journal of The Electrochemical Society*, Issue 164, pp. 248-259.

Hinduja, S. & Kunieda, M., 2013. Modeling of ECM and EDM processes.. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Issue CIRP-1108.

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

Jaimes Rueda, S., 2010. *Descripción general de las tecnicas de control borroso y aplicación en el control de nivel y flujo*. Bolivia: Universidad Pontifica Bolivariana.

Joe Jeba Rajan, J., Dev Anand, M. & Gopu, P., 2014. A Retrospective Study Based on the Soft Computing Approach in Electro Chemical Discharge Machining. *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, pp. 1481-1486.

Kalpakjian, S. & Schmid, S., 2008. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 5° ed. Ciudad de México: Pearson.

Kasdekar, D. K., Parashar, V. & Arya, C., 2018. Artificial neural network models for the prediction of MRR in Electro-Chemical Machining. p. 772–779.

Katsuhiko, O., 2008. *Ingeniería de Control Moderna*. 5ta ed. Ciudad de México: Prentice Hall.

Katz, Z. & Tibbles, C., 2010. Analysis of micro-scale ECM Process. *Journal of Advance Manufacturing Technology*, Volumen 35, pp. 923-928.

Kohli, A., Wadhwa, A., Virmani, T. & Jain, U., 2012. Optimization of Material Removal Rate in Electrical Discharge Machining Using Fuzzy Logic. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Volumen 12, pp. 2839-2844.

Kumar, K. & Sahoo, P., 2014. Artificial Neural Network Modeling for the Prediction of Surface Roughness in ECM. *International Journal of Applied Engineering Research*, 9(26), pp. 9251-9254.

Liu, Y. & Wang, K., 2020. Improving Machining Localization and Surface Roughness in Wire Electrochemical Micromachining Using a Rotating Ultrasonic Helix Electrode. *Micromachines* , 11(698).

Majumder, A., 2014. Comparative study of three evolutionary algorithms coupled with neural network model for optimization of electric discharge machining process parameters. *Journal of Engineering Manufacture*.

Martinez Alvarado, R., Granda Gutierrez, E., Zuñiga, E. & Gerrero, R., 2015. Pulsed Power Supply for Electrochemical Machining. *IEEE International Autumn Meeting on Power*.

- Martos, A., 2012. *Introducción a la Informática*. Madrid: Anaya Multimedia.
- Mcewen, A. & Cassimally, H., 2014. *Internet De Las Cosas. La Tecnología Revolucionaria Que Todo Lo Conecta*. España: Anaya Multimedia.
- Mehrvar, A., Ali, B. & Ali, J., 2016. Optimization of electrochemical machining process parameters: combining response surface methodology and differential evolution algorithm. *Process Mechanical Engineering*.
- Muhamad, R., 2004. Circuitos amortiguadores. En: *Electrónica de potencia: circuitos dispositivos y aplicaciones*. Ciudad de México: Pearson.
- Olivas, J. A., 2005. Las técnicas de Soft Computing y el futuro de Internet. *Agora*, 24(2), pp. 117-127.
- Parhami, B., 2007. *Arquitectura de Computadoras*. Ciudad de México: Mcgraw-hill.
- Patt N., Y. & Patel J., S., 2004. *Introducción a los sistemas de Cómputo*. España: Mc Graw Hill.
- Pratihari, D., 2015. *Soft Computing: Fundamentals and Applications*. Oxford: Alpha Science.
- Rama Rao, S., Sravan, C. R. M., Pandu Ranga, V. & Padmanabhan, G., 2009. Fuzzy Logic-Based Forward Modeling of Electro Chemical Machining Process. *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing*, pp. 1430-1435.
- Raspberry Pi Org, 2021. *The Raspberry Pi*. [En línea] Available at: <http://www.raspberrypi.org/> [Último acceso: 10 Marzo 2021].
- Ravikumar, R., Asokan, . P. & Narender Singh, P., 2008. Modeling the machining parameters for electrochemical machining of aluminum composites using RSM. *Journal of Manufacturing Engineering*, 3(2), pp. 104-114.
- Real Academia Española, 2021. *Diccionario de la Lengua Española*. [En línea] Available at: www.rae.es [Último acceso: 20 Marzo 2021].

- Rodríguez, P. R., 2018. *Inteligencia Artificial*. 1ª edición ed. México: Deusto.
- Roger, S., 2011. *Ingeniería del software: un enfoque práctico*. 7 ed. Ciudad de México: McGraw-Hil.
- S. Pressman, R., 2012. *Ingeniería del Software un Enfoque Practico*. 7 ed. Connecticut: Mc Graw Hill.
- Saranya, A. & Ravi Sankar, A., 2020. A Microcontroller-based Electrochemical Discharge Machining (ECDM) Equipment for Micro-drilling OF Quartz Substrates. *International Symposium on Electronic System*, pp. 221-226.
- Scheider , E., 2015. *NEMA 17 2-Phase Stepper Motor*, s.l.: Schneider Electric.
- Schmidt, M., 2014. *"Raspberry Pi "*. Alemania: Dpunkt Verlag .
- Shang, G. & Sun, C., 2008. Application of BP Neural Network for Predicting Anode Accuracy in ECM. *International Symposium on Information Science and Engineering*.
- Shaw, Z. A., 2014. *Apreda A Programar Con Python*. 2014 ed. s.l.:Anaya Multimedia.
- Shimasaki, T. & Kunieda, M., 2016. Study on influences of bubbles on ECM gap phenomena using transparent electrode. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Issue 65, pp. 225-228.
- Sun, X., 2009. An Integrated Framework for Developing Generic Modular Reconfigurable Platforms for Micro Manufacturing and its Implementation. *Brunel University*, 1(1), pp. 36-39.
- Tanzila , Y., Manzoor , M. & Kumari , J., 2017. Non- Conventional Machining Processes as Expedient Alternatives for Conventional Machining Processes. *IEEE*, p. 5.
- Thonny Org., 2020. *Thonny Python IDE for beginners*. [En línea] Available at: <https://thonny.org/> [Último acceso: 2021 Abril 15].
- Trias, A. y otros, 2011. Predicting Material Removal Rate of Electrical Discharge Machining (EDM) using Artificial Neural Network for High Igap current. *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering*.

Villagómez Galindo , M., Espinosa Medina, M. A., Álvarez Sánchez , O. & López Flores, L. S., 2012. Diseño de una Plataforma para Micromaquinado por Electroerosión (EDM) y/o Electroquímico (ECM). *10º Congreso Nacional de Mecatrónica*, 21(10), pp. 55-59.

Xu , D., Yi , Z. & Cheng , C., 2014. A Neural Network-based Ensemble Prediction using PMRS and ECM. *th Hawaii International Conference on System Science*, Issue 47.

Yadav , R. N. & Yadava, V., 2016. Multi-objective optimization of slotted electrical discharge abrasive grinding of metal matrix composite using artificial neural network and nondominated sorting genetic algorithm.. *Journal of Engineering Manufacture*, Issue 227, pp. 1442-1452.

Yang, S., 2017. Design of the CNC System for Vertical Electrochemical Machining Tool Based on Siemens 802Dsl. *Advances in Engineering*, Volumen 87, pp. 27-31.

Yusup , N., Zain, . A. & Hashim, . S., 2012. Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007–2011).. *Expert Syst Appl*, Issue 39, pp. 9909-9927.

Zhang , Z., 2010. Development and Realization on PLC Control System of Vertical ECM Machine. *Hefei University of Technology*.

Zhang, Y., Zhengyang, X., Zhu, D. & Xing , J., 2015. Tube electrode high-speed electrochemical discharge drilling using low-conductivity salt solution. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volumen 92, pp. 10-18.

Zhiyong , L. & Guangming , Y., 2008. Experimental Investigation of Micro -holes in Electrochemical Machining Using Pulse Current. *Proceedings of the 3rd IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems January 6-9, 2008, Sanya, China*, 1(1), pp. 151-154.