



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO



“Sistema Computacional para la remoción controlada de Material en un proceso de
Maquinado Electroquímico por Pulsos”

T E S I S

Que para obtener el Grado Académico de:

Maestro en Ciencias de la Computación

Presenta:

Iván Gallegos Miranda

Director de Tesis:

Dr. JOSÉ ARTURO PÉREZ MARTÍNEZ

Co-directores:

Dr. EVERARDO EFRÉN GRANDA GUTIÉRREZ

Dr. ALLAN ANTONIO FLORES FUENTES

Noviembre 2019

RESUMEN

El micro maquinado electroquímico por pulsos (PECMM), es un proceso de manufactura no convencional, en donde la herramienta de trabajo no tiene desgaste, por lo que ofrece una gran ventaja para fabricar piezas de un tamaño reducido, en comparación con los procesos convencionales. El mantener las condiciones óptimas del proceso PECMM garantiza mayor eficiencia y rendimiento de maquinado, donde una de las condiciones críticas del proceso es mantener constante la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo (distancia entre electrodos) para garantizar la remoción homogénea del material.

En este documento se presenta el diseño y aplicación de un controlador por lógica difusa (FLC) tipo SISO (del inglés, una entrada una salida) con tres conjuntos difusos de entrada y tres de salida, cuyo objetivo es asegurar que la distancia inter-electrodos se mantenga en el orden de $240\mu\text{m}$, inclusive a perturbaciones en la pieza de trabajo y con ello mantener una remoción de material constante.

La implementación de un controlador de este tipo demuestra ser una alternativa eficaz para esta tarea, principalmente debido a que la distancia entre electrodos no es una variable observable directamente, sino que se debe estimar a partir del monitoreo de variables eléctricas del proceso. Lo anterior se realiza mediante la medición de la corriente de maquinado. Los resultados muestran que el controlador permite ajustar progresivamente la distancia del electrodo, por lo que se obtiene un canal de profundidad homogénea, inclusive si la superficie presenta irregularidades a lo largo de la trayectoria de desplazamiento del electrodo, con una precisión cercana a $7.8\mu\text{m}$, la cual es aceptable de acuerdo con la resolución del sistema mecánico.

La interfaz gráfica se desarrolló bajo el lenguaje de programación Python empleando la librería TKINTER para generar recursos gráficos como lo son las ventanas, botones, etiquetas y cuadros dialogo.

Las pruebas del sistema se realizaron con acero estructural AISI 10-18 el cual es un acero comercial y como electrolito se usó una solución acuosa de $H_2O + NaCl$, en una concentración del 16.6% Kg/L.

ABSTRACT

Pulsed electrochemical micro machining (PECMM) is a nonconventional manufacturing process where the tool does not present wear, offering a considerable advantage over conventional processes on the machining of small pieces. In order to guarantee the proper efficiency and performance, the process working parameters must be kept in optimal intervals. One of the critical constraints is to keep constant the distance between the workpiece and the tool electrode (gap) to ensure a homogeneous material removal. With the aim to keep the gap in the order of 240 μm , in this work it is proposed the design and application of a SISO (single-input single output) Fuzzy Logic Controller (FLC) with three fuzzy sets for both: input and output.

The implementation of such a controller demonstrates to be a good alternative performing this task, mainly because the gap is not an observable variable, but it could be estimated from other process variables. Thus, the machining current has been used in this investigation. Results show that the FLC allows to continuously adjust the inter electrode distance, machining a channel with homogeneous depth, even though the surface presents irregularities along the electrode trajectory, reaching a precision close to 7.8 μm , which is acceptable according with the resolution of the mechanical system.

The graphical interface was developed using Python programming language and TKINTER library to generate graphical resources such as windows, buttons, labels and dialog boxes.

The tests of the system were made with 10-18 structural steel, which is a commercial steel, and as an electrolyte an aqueous solution of $H_2O + NaCl$ was used in a concentration of 16.6% Kg / L.

ÍNDICE

DEDICATORIAS	v
AGRADECIMIENTOS	vi
vi	
RESUMEN.....	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2.1 Definición del problema.....	3
2.2 Objetivos de investigación	3
2.2.1 General	3
2.2.2 Específicos	4
2.3 Preguntas de investigación.....	4
2.4 Justificación	4
2.5 Impactos	5
3 HIPÓTESIS	6
4 ESTADO DEL ARTE	6
4.1 Maquinado electroquímico	6
4.2 Sistema de control.....	14
4.3 Lógica Difusa.....	18
4.1.1. Funciones de membresía	19
4.4 Sistema de cómputo	23

5	MÉTODO	26
5.1	Requerimientos o especificaciones de sistema de computo.....	26
5.2	Construcción del prototipo	27
5.2.1	Construcción del circuito de mando para el sistema mecánico.....	27
5.2.2	Construcción del sistema de filtrado del electrolito	28
5.2.3	Desarrollo de la fuente pulsada	30
5.2.4	Etapas de adquisición de datos	31
5.3	Diseño y desarrollo del Sistema Computacional	35
5.4	Caracterización del proceso de maquinado electroquímico por pulsos	44
5.4.1	Fase 1	44
5.4.2	Caracterización del proceso de maquinado electroquímico Fase 2	52
5.5	Diseño del sistema de control	64
5.6	Establecer Profundidad establecida por el usuario.....	76
6	RESULTADOS Y DISCUSIONES.	87
6.1	Prueba de maquinado Lineal sin perturbación	89
6.2	Prueba de maquinado Lineal con perturbación.....	92
6.3	Prueba de maquinado poligonal	98
6.4	Resultados de interfaz gráfica	101
6.4.1	Ventana Principal.....	101
6.4.2	Establecer distancia Inter-electrodos.....	103
6.4.3	Inclinación Inter electrodos.....	105
6.4.4	Maquinado	106
6.4.5	Maquinado lineal.....	107
6.4.6	Maquinado poligonal	108
6.4.7	Desplazamiento mecánico manual	109

6.4.8	Posición de Fabrica	111
6.4.9	Configuración de la Fuente	112
6.4.10	Atajos Teclado	112
6.4.11	Acerca de.....	113
6.4.12	Estado de Maquinado.....	114
6.5	Sistema Físico	115
CONCLUSIONES		117
7	Referencias	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.4: Función de membresía Singleton (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).	21
Tabla 4.5: Función de membresía Trapezoidal (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).	21
Tabla 4.6: Función de membresía Triangular (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).	21
Tabla 4.7: Función de membresía Gaussiana (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).	22
Tabla 4.8: Función de membresía Sigmoidal (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).	22
Tabla 4.9: Funciones de membresía Hombro o Saturación (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).	22
Tabla 7. Características de Raspberry Pi 3.....	24
Tabla 8. Resultados de la caracterización del proceso de maquinado electroquímico. ...	46
Tabla 9. Resultados de la caracterización fase 2 del proceso de maquinado electroquímico 5V electrodo de 700 μ m.	54
Tabla 10 Conjuntos Difusos del universo de discurso error.	66
Tabla 11 Conjuntos Difusos del universo de discurso Distancia.	66
Tabla 12 Reglas de inferencia.	67
Tabla 13. Configuración inicial y mediciones de longitud y profundidad.....	69
Tabla 14. Medición de la profundidad resultante en los canales 1 y 2.	72
Tabla 15 Medición de la profundidad resultante en los canales 3, 4 y 5.	74
Tabla 16 Configuración inicial y mediciones de longitud y profundidad.....	83
Tabla 17 Mediciones de la profundidad de los canales resultantes.	84
Tabla 18 Mediciones de la profundidad del canal resultante.....	91
Tabla 19 Configuración inicial y mediciones de longitud y profundidad.....	93
Tabla 20 Medición de la profundidad resultante en los canales 3 y 4.	96
Tabla 21 Mediciones de la profundidad del maquinado poligonal resultante.	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.2.1 Modelo eléctrico de ECM (Katz & Tibbles J., 2012).....	15
Figura 4.2.2 Modelo eléctrico de PECM a 20kHz (Katz & Tibbles J., 2012).	16
Figura 4.2.3 Modelo eléctrico de PECM a 40kHz (Katz & Tibbles J., 2012).	16
Figura 4.3.1: Comparación entre lógica booleana y lógica difusa (Bravo, 2018).	19
Figura 4.3.2: Características de las funciones de membresía (Adaptada de (Bravo, 2018)).	20
Figura 5.2.1 Sistema de mando para motores a paso.	28
Figura 5.2.2 Sistema de filtrado y recirculación del electrolito.	30
Figura 5.2.3 Diagrama esquemático de la fuente pulsada.	31
Figura 5.2.4 Diagrama esquemático del divisor de voltaje utilizado para el monitoreo del voltaje de polarización.	33
Figura 5.2.5 Conexión esquemática de la etapa de adquisición de voltaje de polarización y corriente de maquinado con la SBC.	34
Figura 5.4.1 Ejemplificación del efecto de sobre corte en ECM y PECM	44
Figura 5.4.2 Formas de onda del comportamiento del voltaje y corriente de maquinado.	48
Figura 5.4.3 Comportamiento de la corriente de maquinado en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.	55
Figura 5.4.4 Diámetro resultante al término del proceso PECMM, en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.	56
Figura 5.4.5 Potencia demandada en el proceso PECMM a diferentes condiciones en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.	57
Figura 5.4.6 Energía demandada en el proceso PECMM a diferentes condiciones en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.	57
Figura 5.4.7 Profundidad resultante en el proceso PECMM a diferentes condiciones en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.	58
Figura 5.4.8 Sobre corte resultante en el proceso PECMM a diferentes condiciones en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.	58
<i>Figura 5.4.9 Volumen resultante en el proceso PECMM a diferentes condiciones en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.</i>	<i>59</i>

Figura 5.4.10 Tasa de remoción de material del proceso PECMM en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.....	60
Figura 5.4.11 Efectividad del proceso PECMM en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.	61
Figura 5.4.12 Barrenos resultantes al término del proceso PECMM a diferentes condiciones variando voltaje de polarización, gap y frecuencia.	63
Figura 5.5.1 Modelo SISO del sistema de control para mantener la distancia inter-electrodos.	66
Figura 5.5.2 Pruebas propuestas para realizar la validación del sistema de control, (a) sin perturbaciones, (b) con la superficie de maquinado inclinada y (c) sobre una superficie con un canal como perturbación al sistema.....	68
Figura 5.5.3 (a) Resultados de maquinado sin perturbación y (b) comportamiento de la corriente de maquinado, se considera sin perturbaciones.	70
Figura 5.5.4 (a)Resultados de maquinado con 3.5° de inclinación y (b) forma de onda de la corriente de maquinado, con una inclinación de 3.5°.....	71
Figura 5.5.5 (a) Resultado del sistema de control sujeto a perturbaciones, (b) Ubicación de puntos donde se realizaron las mediciones.....	72
Figura 5.5.6 Comportamiento de la corriente de maquinado de la prueba 3 y 4.	73
Figura 5.5.7 (a) Resultados del control del proceso PECMM con perturbación de un canal con profundidad incremental y (b) ubicación de los puntos en donde se realizaron las mediciones.	74
Figura 5.5.8 Comportamiento de la corriente de maquinado; (a) del canal 3, (b) del canal 4 y (c) del canal 5.....	76
Figura 5.6.1 Profundidad resultante en comparación con distancia de avance.....	78
<i>Figura 5.6.2 Ajuste de la corriente de maquinado.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.6.3 Patrón del comportamiento de la pendiente en 6 ajustes.</i>	<i>77</i>
Figura 5.6.4 Avance y profundidad alcanzada con ajuste cada 11 segundos.	79
Figura 5.6.5 Comportamiento de la corriente con respecto a los ajustes realizados.....	80
Figura 5.6.6 Comportamiento de la corriente con respecto a los ajustes realizados.....	81
Figura 5.6.7 Diagrama de flujo para el ajuste en la estimación de la distancia inter-electrodos.	82

Figura 5.6.8 Canales resultantes para validación de la profundidad dictaminada por el usuario.	84
Figura 5.6.9 Representación de los puntos de medición de la profundidad del canal.	84
Figura 5.6.10 Comportamiento de la corriente de maquinado con ajuste en la ecuación de la estimación de la distancia inter-electrodos.....	86
5.6.11 Área de exposición del electrodo al encontrarse en movimiento.....	86
Figura 5.6.1 Variación de la corriente de maquinado en el proceso PECMM.	88
Figura 6.1.1 Comportamiento de la corriente de maquinado de canal con una longitud de 1 cm a una profundidad de 800 μ m.....	90
Figura 6.1.2 Imagen representativa de los puntos de medición de la profundidad resultante del canal de 800 μ m.	91
Figura 6.1.3 Resultado del maquinado lineal con longitud de 1cm de largo a una profundidad de 800 μ m.	91
Figura 6.2.1 Pruebas para validar el sistema de control, (a) con la superficie de maquinado inclinada y (b) con un canal previamente maquinado.....	92
Figura 6.2.2 (a)Resultados de maquinado con 4.3° de inclinación con profundidad de 240 μ m, (b) forma de onda de la corriente de maquinado, con una inclinación de 4.3° con una profundidad de 240 μ m.	94
Figura 6.2.3 (a) Resultados de maquinado con 4.3° de inclinación con profundidad de 500 μ m y (b) forma de onda de la corriente de maquinado, con una inclinación de 4.3° con una profundidad de 500 μ m.	95
Figura 6.2.4 (a) Resultados del control del proceso PECMM con perturbación de un canal con profundidad incremental y(b) ubicación de los puntos en donde se realizaron las mediciones.	96
Figura 6.2.5 Comportamiento de la corriente de maquinado; (a) del canal 3 y (b) del canal 4.....	98
Figura 6.3.1 Ubicación de los puntos en donde se realizaron las mediciones.	99
Figura 6.3.2 (a)Maquinado poligonal resultante y (b) comportamiento de la corriente de maquinado para la generación del maquinado poligonal.....	100
Figura 6.4.1 Interfaz ventana principal.	101
Figura 6.4.2: Submenú Archivo.....	102

<i>Figura 6.4.3: Submenú Opciones.</i>	103
<i>Figura 6.4.4: Submenú Ayuda.</i>	103
Figura 6.4.5 Ventana para establecer la distancia inter-electrodos inicial.....	104
<i>Figura 6.4.6: Detección de continuidad y envío de señal a software.</i>	105
Figura 6.4.7 Ventana Inclinación inter electrodos.	106
Figura 6.4.8 Ventana Maquinado.....	107
Figura 6.4.9 Ventana Maquinado lineal.	108
Figura 6.4.10 Mensaje de Aviso en caso de parámetros incompletos.	108
Figura 6.4.11 Ventana Maquinado poligonal.....	109
Figura 6.4.12 Mensaje avisando a usuario la falta de algún parámetro.	109
Figura 6.4.13 Ventana Desplazamiento Manual de Software.....	110
Figura 6.4.14 Aviso del sistema a detectar error en el parámetro distancia.....	111
Figura 6.4.15 Ventana Posición de Fabrica del software.....	112
Figura 6.4.16 Ventana configuración de la Fuente.	112
Figura 6.4.17 Ventana Atajos de Teclado del software.	113
Figura 6.4.18 Ventana Acerca de del software.	113
<i>Figura 6.4.19 Ventana Estado de Maquinado software.</i>	114
Figura 6.4.20 Ventana de verificación para paro de maquinado.....	115
Figura 6.4.21 Mensaje informativo de cancelación de paro de maquinado.....	115
Figura 6.4.22 Mensaje informativo de paro del maquinado.	115
Figura 6.5.1 Sistema Físico del proceso PECMM	116

1 INTRODUCCIÓN

La micro manufactura se puede definir como el proceso de fabricación de piezas a un tamaño reducido, en el orden de los micrómetros. Consiste en transformar la materia prima en un producto determinado, modificando su forma física, generando productos elaborados o productos terminados. De manera que manufacturar piezas en tamaño reducido es un gran reto; esto se debe a las dimensiones físicas de las mismas y a las características de los nuevos materiales que son aleaciones de alta dureza, requiriendo de máquinas y herramientas especializadas (Grover P., 2010).

La demanda de piezas de manufactura de un tamaño reducido va en aumento en diferentes campos, tales como: la industria metalmecánica, médica, automotriz, aeronáutica y robótica. Dado que se requiere fabricar piezas de materiales altamente resistentes, resulta costoso de realizar mediante métodos de manufactura tradicional (barrenado, fresado y torneado mecánico) (Grover P., 2010). En el campo de la medicina biomédica existe la demanda de la fabricación de prótesis y partes de metal quirúrgico; hace algunos años su fabricación era difícil debido a que el material es de alta dureza y se requiere que la pieza al ser maquinada no cuente con estrías o porosidades que se generan con el maquinado convencional (Granda Gutiérrez, et al., 2015).

Los procesos de manufactura convencionales son aquellos en los cuales la herramienta tiene un contacto directo con la pieza de trabajo, causando desgaste de dicha herramienta debido a la fricción que se genera entre ambas (Hostetter, 2005). Por otro lado, los procesos de manufactura no convencionales, como el Maquinado Electroquímico (ECM por sus siglas en inglés), son procesos en donde no existe contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo, y permiten fabricar piezas de tamaño reducido en materiales metálicos y conductores (Grover P., 2010).

En el proceso de ECM; existe una variable conocida como gap (del inglés, separación, brecha), la cual es la distancia entre los electrodos y se refiere al espacio existente entre el electrodo o herramienta de trabajo y la pieza de trabajo; el electrodo tiene la función de generar la remoción del material. Para una remoción constante de material, la distancia inter-electrodos debe mantenerse constante, ya que, si la distancia es mayor, la velocidad de remoción del material es menor; por otro lado, si la distancia es menor, puede llegar al

punto en que haya contacto entre la pieza de trabajo y el electrodo originando un aumento drástico de la corriente de maquinado hasta una posible condición de corto circuito, poniendo en riesgo la electrónica asociada a la polarización o incluso dañando el electrodo, la pieza de trabajo o ambos (Catarino Aguilar , 2017).

ECM es un proceso por el cual se retira metal de una pieza de trabajo siempre y cuando sea conductora de electricidad, esto mediante un proceso de disolución anódica, en la cual se obtiene la figura de la pieza de trabajo reproduciendo la forma con la que cuenta la herramienta de trabajo (electrodo negativo), además en el proceso se suministra un electrolito que tiene la función de conducir la corriente, limpiar residuos del proceso, así como mantener en cierto intervalo la temperatura de la pieza de trabajo, evitando un sobrecalentamiento. El electrodo es el encargado del desbastado del material que usualmente es de cobre, bronce o acero inoxidable (Katz & Tibbles J., 2012) .

Villagómez (Villagómez Galindo , et al., 2012), establece que el proceso de maquinado electroquímico preferentemente debe ser controlado por un sistema de cómputo que permita mantener constante la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo, de manera que la remoción del material sea constante, así mismo en ECM la distancia entre los electrodos debe establecerse en un intervalo de entre los 360 μ m a 480 μ m.

En este trabajo se propone desarrollar un sistema de cómputo y la instrumentación relacionada que permita modificar la frecuencia y ciclo de trabajo de la fuente de polarización, así mismo poder mantener una distancia entre los electrodos en un proceso de maquinado electroquímico por pulsos, mediante una estrategia de control moderna, por lógica difusa, el cual consistirá en mantener la distancia inter-electrodos en un proceso de micro manufactura por maquinado electroquímico polarizado con una fuente pulsada y reducir el efecto de borde o sobre corte al termino de maquinado en líneas o trayectorias básicas. Con el desarrollo de una interfaz gráfica el usuario podrá modificar el ciclo de trabajo y frecuencia de la fuente pulsada, además determinar la profundidad y las dimensiones de las trayectorias básicas.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Definición del problema

La distancia inter-electrodos es una de las variables más importantes que definen el desempeño del proceso de maquinado electroquímico, y que por su naturaleza no puede ser medida directamente en el mismo, debido a que afecta la brisa de electrolito generada durante el proceso y los sensores de medición proporcionan mediciones erróneas, por lo que la medición debe ser cuantificada por una medición indirecta de otras variables, como pueden ser el voltaje de polarización y la corriente de maquinado. Cuando la fuente de polarización tiene una forma de onda pulsada, la corriente de maquinado obedece a un modelo no lineal, por lo que los sistemas tradicionales de control no resultan adecuados para ser empleados en el ajuste de esta distancia. Por esta razón, se propone el uso de técnicas de control basadas en la lógica difusa, que permitan: a) prescindir de un modelo matemático estricto del fenómeno que ocurre, b) realizar el ajuste de la distancia inter-electrodos en línea con el proceso mediante su estimación a través de otras variables del proceso, y c) hacer uso de herramientas computacionales para contribuir a la mejora de este proceso.

Del análisis de las investigaciones consultadas en la literatura, se concluye que existe una problemática en el proceso de maquinado electroquímico, la cual es mantener una distancia constante entre la herramienta y la pieza de trabajo, para generar una remoción constante de material en el proceso. Por esta razón, se requiere de un sistema de control a lazo cerrado que sea capaz de mantener una distancia inter-electrodos adecuada y constante, a fin de obtener una tasa de remoción constante de material y con ello minimizar el efecto de borde de redondeo en formas como líneas o geometrías de trayectorias básicas.

2.2 Objetivos de investigación

2.2.1 General

Implementar un sistema computacional que, basado en un algoritmo de control difuso, que permita mantener una distancia inter-electrodos constante, para generar una remoción de material continua y minimizar el efecto de borde de redondeo en un proceso de maquinado electroquímico pulsado.

2.2.2 Específicos

- 1- Integrar una fuente de polarización pulsada para el proceso de Maquinado Electroquímico, con la frecuencia y el ciclo de trabajo ajustables.
- 2- Desarrollar la instrumentación electrónica requerida para el monitoreo de la corriente de maquinado y voltaje de polarización dentro del proceso de maquinado electroquímico por pulsos (PECM).
- 3- Realizar pruebas de caracterización del proceso electroquímico por pulsos para determinar la relación de avance en relación con las variables eléctricas involucradas.
- 4- Diseñar un algoritmo de control difuso que permita mantener la distancia inter-electrodos constante.
- 5- Desarrollar el sistema de cómputo que permita realizar la trayectoria del maquinado y establecer su profundidad.
- 6- Realizar las pruebas para la validación del sistema, mediante el maquinado de canales en piezas metálicas con variaciones en la topología de su superficie.

2.3 Preguntas de investigación

¿Qué instrumentación electrónica es requerida para el monitoreo de la corriente de maquinado y el voltaje de polarización del proceso de maquinado electroquímico por pulsos?

¿Qué estrategia de control es la óptima para controlar la posición del electrodo y mantener la remoción de material constante en un proceso de maquinado electroquímico por pulsos para generar trayectorias lineales?

¿Qué forma de los conjuntos difusos es la óptima para usarla en el control de la distancia inter-electrodos en el proceso de maquinado electroquímico por pulsos?

¿Cuántos conjuntos difusos serán necesarios para el control de la distancia inter-electrodos en el proceso de maquinado electroquímico por pulsos?

2.4 Justificación

Actualmente en los sistemas de maquinado electroquímico, para realizar perforaciones o barrenos ciegos, presentan en su geometría un borde redondeado, es decir, se tiene material excedente no deseado en la perforación, de manera que mediante la implantación de una fuente pulsada a una frecuencia con un intervalo de trabajo de 20 a 50 kHz, se

espera que el efecto sea minimizado e incorporar ésta característica al sistema de maquinado electroquímico para poder realizar maquinados en formas de barreno, líneas o geometrías de trayectorias básicas.

Catarino Aguilar (Catarino Aguilar , 2017) desarrolló e implementó un sistema de maquinado electroquímico con un sistema de ejes coordenados, donde es posible realizar figuras como polígonos y canales, mediante el monitoreo del voltaje de polarización y la corriente de maquinado, demostrando que es posible estimar la distancia inter-electrodos y con ello mantener una remoción de material de manera continua. El sistema es polarizado mediante una fuente de CD y presenta el efecto de borde redondeado.

En el trabajo *“Pulsed Power Supply for Electrochemical Machining”* (Martinez Alvarado , et al., 2015), demuestran que al polarizar mediante una fuente pulsada se reduce el efecto de redondeo y se eliminan excedentes de material en la pieza de trabajo. Por lo que se requiere de un sistema que permita monitorear la corriente de trabajo pulsada que se establece en el maquinado, lo que permitirá establecer un control de la posición del electrodo y mantener la distancia inter-electrodos constante para llevar a cabo una remoción controlada de material.

Con el sistema a desarrollar se pretende proporcionar una herramienta computacional, la cual permita monitorear variables eléctricas para estimar la distancia inter-electrodos y dependiendo de ésta; controlar la remoción de material, mediante el movimiento de motores a pasos, encargados de gobernar un conjunto de ejes coordenados de un sistema de posicionamiento mecánico. El sistema de cómputo se desarrollará en base al modelo por prototipos utilizando en Ingeniería de Software, en donde se integrará un interfaz de usuario y con ello interactuar directamente con el sistema, a fin de tener control del proceso de maquinado.

2.5 Impactos

- Científico: El desarrollo de un algoritmo de control difuso que permita mantener una distancia inter-electrodos constante y con ello una remoción de material controlada en un proceso de maquinado electroquímico por pulsos.

•Tecnológico. Generar una herramienta computacional que permitirá controlar la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo en un proceso de maquinado electroquímico por pulsos, lo cual reduce el efecto de borde redondeado en comparación con un sistema de maquinado electroquímico polarizado con CD.

3 HIPÓTESIS

Mediante la implementación de un sistema de control basado en lógica difusa, se realizará el ajuste de la distancia inter-electrodos durante el proceso de maquinado electroquímico pulsado de materiales metálicos, tomando como variables de entrada, el valor eficaz o valor promedio de la corriente de maquinado y la amplitud del voltaje pulsado, de forma que se prescindiera del modelo matemático de la planta a controlar, pero se logre un ajuste de dicha distancia con una precisión en el orden de 20 micras. Así mismo poder generar maquinados con una profundidad constante a pesar de que la pieza de trabajo contenga perturbaciones o variaciones en su superficie.

4 ESTADO DEL ARTE

4.1 Maquinado electroquímico

La manufactura es un proceso de fabricación de productos, que pueden ser realizados con la mano humana o a base de máquinas (Kalpakjian & R. Schmid, 2005): el término deriva del latín manu factus, que significa “hecho a mano”, y apareció por primera vez en 1567. Existen dos métodos de manufactura (Grover P., 2010) :

1. Métodos de manufactura Convencional: en donde la herramienta de trabajo y la pieza de trabajo tienen contacto directo, existiendo fricción entre ambos, fabricando las piezas deseadas mediante fresado, barrenado y torneado mecánico.
2. Métodos de Manufactura no Convencional o Avanzada: en donde la herramienta de trabajo y la pieza de trabajo no existe el contacto. Por ejemplo, algunos de los métodos de manufactura no convencional son: corte por láser, maquinado por descarga eléctrica y maquinado electroquímico.

El método de maquinado electroquímico es un proceso de manufactura no convencional en el cual se retira material metálico de la pieza de trabajo la cual debe contener una propiedad de ser conductora de corriente eléctrica, el proceso generado se le conoce como disolución anódica, de tal manera es posible generar el negativo del electrodo polarizado en la pieza de trabajo. Dentro del proceso de maquinado electroquímico es necesario tener una distancia inter-electrodos: que es la separación que se debe tener entre la pieza y herramienta de trabajo, así mismo es necesario de un electrolito conductor para conducir la corriente eléctrica entre la herramienta de trabajo y la pieza de trabajo a fin de generar una remoción de material (Katz & Tibbles J., 2012).

En la Figura 4.1, se muestra el principio básico del maquinado electroquímico, el cual está conformado por una fuente de polarización (por lo general de corriente directa); la herramienta de trabajo se polariza negativamente (formando un cátodo), mientras que la pieza de trabajo se polariza positivamente (formando un ánodo), misma que se encuentra inmersa en un electrolito. En la Figura 4.1 (a) Se aprecian las condiciones iniciales de la pieza y herramienta de trabajo, mientras que en la Figura 4.1 (b) se muestra el maquinado una vez que ha iniciado, se representa gráficamente como el proceso de maquinado electroquímico remueve material de la pieza de trabajo al acercarse gradualmente la herramienta de trabajo.

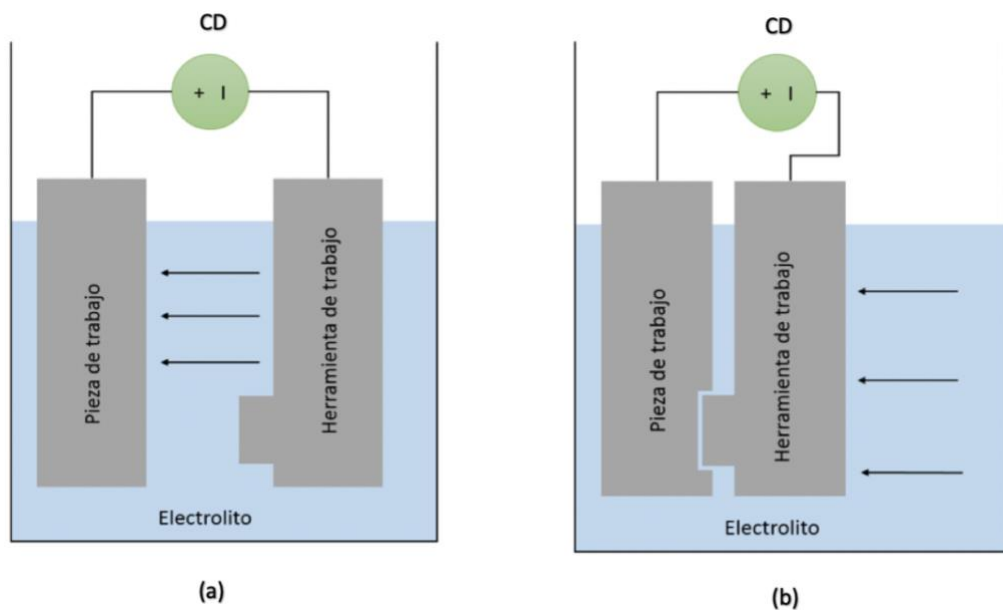


Figura 4.1 Principio de ECM (a) antes de la remoción, (b) durante la remoción.

Durante el proceso ECM se producen reacciones químicas en el electrolito, favorecidas por la polarización entre el ánodo y el cátodo, que son propias de un proceso electroquímico, donde se presentan el intercambio de iones entre los materiales que se encuentran inmersos en el electrolito y del propio electrolito. A continuación, se presentan las reacciones que ocurren típicamente cuando el ánodo es un material compuesto en su mayor proporción de hierro (como en todos los aceros y algunas otras aleaciones), con el uso de una solución acuosa de $H_2O + NaCl$. Al someter los electrodos dentro de la solución acuosa a una diferencia de potencial, los compuestos de la misma se separan en los componentes básicos que se muestran enseguida (Hassan & Gawad , 2005):



Favorecido por la diferencia de potencial entre la herramienta y la pieza de trabajo, se lleva a cabo un intercambio de iones: los iones positivos se mueven hacia la herramienta de trabajo y los negativos hacia la pieza de trabajo, lo que permite que una de las reacciones se presente con los iones de hidrógeno que toman electrones de la herramienta de trabajo, liberando hidrógeno molecular.



De manera similar, los átomos de los elementos de la pieza de trabajo, que en su mayoría son de hierro, se desprenden de la estructura cristalina en la que se encuentran, formando la reacción química de la siguiente manera:



Los iones del electrolito, los cuales pueden ser Cl (Cloro), Na (Sodio), H (Hidrogeno) y O (Oxígeno), se mezclan con los iones del acero generando, entre otros, $FeCl_2$ (cloruro ferroso II) y $NaOH$ (hidróxido de sodio). Por lo anterior, una vez iniciado el maquinado electroquímico se empieza a apreciar la aparición de los siguientes compuestos, mezclados con el electrolito (parcialmente disueltos o formando precipitados):



Los compuestos anteriores se presentan en forma de residuos lodosos, lo que en la práctica indica que el proceso de electrolisis se está llevando a cabo y la pieza de trabajo está sufriendo pérdida de iones que representa una remoción de material de la misma (Ashby, 2005). En la Figura 4.3 se muestran, de manera representativa, las reacciones químicas antes descritas.

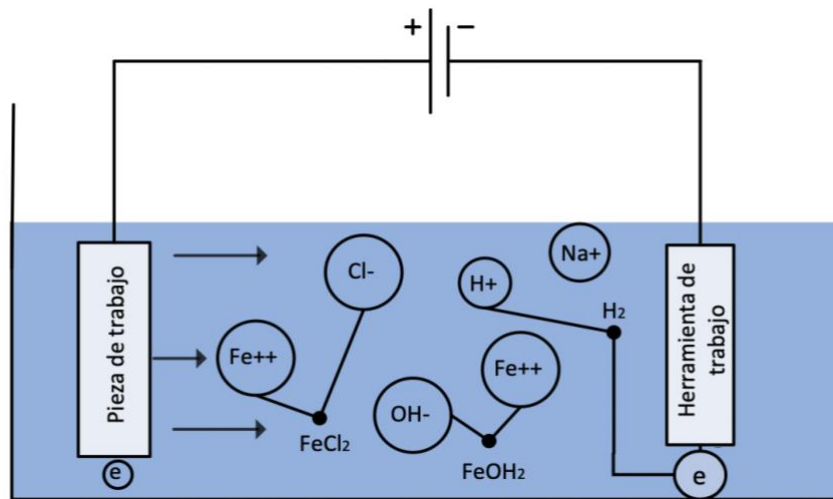


Figura 4.3: Reacciones químicas que ocurren en el proceso ECM (Catarino Aguilar, 2017).

Feng, et. al., en el trabajo “*Experimental Investigation of Vibration-Assisted Pulsed Electrochemical Machining*” (Feng, et al., 2016), mencionan que el maquinado electroquímico no tradicional cuenta con una gran ventaja, la cual es que la herramienta de trabajo no sufre un desgaste, así mismo este maquinado no genera rebabas, y ninguna tensión residual (deformación de la pieza debido a la temperatura generada durante el proceso de maquinado) en una superficie mecanizada. Sin embargo, la utilización de este procedimiento se limita a aplicaciones especiales debido a su baja velocidad de eliminación de material. Los electrodos de acero inoxidable recubiertos de teflón son utilizados para producir agujeros en aceros de alta resistencia y aceros con altos

contenidos en carbono. El estudio investiga la tasa de eliminación de material al acoplar la vibración mecánica por debajo de 50 Hz y una amplitud de 25 μm , con una fuente de corriente pulsada a una frecuencia de hasta 100 Hz, obtienen las velocidades de remoción de material para ambos aceros, las cuales son similares.

Acero Domex 550MC la velocidad de remoción de material es de: $3.63 * 10^{-2} \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$

Acero 1018 la velocidad de remoción de material es de: $3.67 * 10^{-2} \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$

Martínez-Alvarado R., *et al.*, en el trabajo “*Pulsed Power Supply for Electrochemical Machining*” (Martinez Alvarado , et al., 2015), presentan el diseño, construcción y validación experimental de una fuente de alimentación pulsada. La cual se basa en una topología de medio puente, con una frecuencia de trabajo variable en un intervalo de entre 20 y 100 kHz diseñada para ser aplicada en un proceso de maquinado electroquímico. Al no generar piezas sin deformaciones, se llevó a cabo un procedimiento experimental en muestras de acero de baja aleación de alta resistencia, además se realizaron barrenos con un electrodo hueco y cloruro de sodio como electrolito, mientras que la polarización se hizo con corriente continua. El resultado que se obtuvo fueron barrenos ciegos con excedentes de material y tenían una forma de respuesta distinta al electrodo. Además, se repitieron las mismas pruebas con una fuente pulsada a una frecuencia de entre 20 y 100 kHz. Los resultados muestran que la polarización del electrodo con corriente continua produce un efecto de corte y perforación en el material; sin embargo, cuando se aplica una señal cuadrada de alta frecuencia al electrodo por medio de la alimentación pulsada, las deformaciones en la pieza de trabajo se reducen. Además, cuando el electrodo está recubierto con una resina aislante y se reducen las deformaciones de la pieza de trabajo se reduce aún más.

K. Altena y A. Harmen, en su trabajo “*Precision ECM by Process Characteristic Modelling*” (Altena & De Silva, 2012), realizan la caracterización experimental de los componentes que conforman el proceso de maquinado electroquímico, a saber: la relación entre el voltaje de polarización, la corriente de maquinado, la distancia inter-electrodos, el uso de diferentes mezclas de electrolitos y diferentes metales de trabajo; se incluye la estimación de material removido durante el proceso para poder aproximar la velocidad de

desplazamiento, obteniendo, de manera experimental, los parámetros idóneos del proceso de Maquinado como lo son voltaje de polarización, corriente de maquinado, Distancia inter-electrodos, profundidad del maquinado entre otros.

Una de las ventajas que se tiene al trabajar con el maquinado electroquímico, es que no importa la dureza de la pieza de trabajo, debido a que es un proceso por disolución anódica y la pieza de trabajo es la que esta polarizada como ánodo existe el desprendimiento de material metálico, así mismo no se generan temperaturas las cuales modifiquen la estructura del material a maquinar. Algunas de las aplicaciones del maquinado electroquímico, es la fabricación de turbinas y blisk (discos con alambres integrados), las cuales son partes esenciales en motores de aviones. El material con el que están compuestos estos materiales es de aluminuros de tantalio (γ -TiAl), teniendo una dureza para maquinar y soportando temperaturas de hasta 600°C, manufacturar estas piezas por métodos convencionales es extremadamente costoso y tardado (Klocke, et al., 2016) (Xu Yu, et al., 2016).

Catarino Aguilar, en el trabajo *“Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico”* (Catarino Aguilar , 2017), desarrolla un sistema por computadora, que tiene la finalidad de mantener una remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico polarizado con corriente directa; esto estimando la distancia inter-electrodos mediante el monitoreo la corriente de maquinado y el voltaje de polarización. Mediante el monitoreo de dichas variables, se modifica la posición del electrodo en un sistema de ejes coordenados, con el fin de mantener un gap de 480 μ m; teniendo un margen de ajuste $\pm 50\mu$ m.

El sistema de cómputo desarrollado por Catarino Aguilar permite visualizar la magnitud de las variables involucradas en el proceso de maquinado, que son: (Catarino Aguilar , 2017) (Zhiyong & Guangming , 2008)

1. Voltaje de polarización
2. Corriente de maquinado
3. Distancia inter-electrodos
4. Profundidad del maquinado.
5. Movimiento de los ejes coordenados.

6. Tiempo de Maquinado.

(Grover P., 2010) resalta que en el proceso de maquinado electroquímico, el intervalo de la distancia inter-electrodos se encuentra de $75\mu\text{m}$ - $750\mu\text{m}$ para que se pueda realizar la remoción de material de manera adecuada. Al ser esta magnitud una distancia en el orden de los micrómetros es complicado realizar una medición directa y lo es más conocer de manera precisa la variación que está teniendo esta distancia con respecto a la evolución del proceso ECM, por lo que se han desarrollado técnicas, las cuales tienen como fin conocer de manera tentativa la distancia inter-electrodos del maquinado y de esta manera realizar una remoción de material constante.

En el artículo *“Review of the Current State of Research and Development in Electrochemical Machining”* (Chithirai Pon, et al., 2017), se abordan los avances que se tienen en el desarrollo de procesos de maquinado electroquímico y afirman que el proceso que permite disminuir el efecto de sobre corte con mayor eficacia es al maquinar con ECM mediante pulsos, debido a que en los resultados del maquinado, la forma del electrodo formada en la pieza de trabajo tiende a ser lo más parecida. Así mismo se han desarrollado y diseñado herramientas, las cuales son búsqueda de alternativas para lograr generar el negativo del electrodo en la pieza de trabajo.

D. Clifton en el trabajo *“Ultrasonic measurement of the inter-electrode gap in electrochemical machining”* (Clifton, et al., 2002), implementa el uso de ecografía, instalando un generador de pulsos ultrasónicos por debajo de la pieza de trabajo y determinando la distancia inter-electrodos al medir el tiempo que tarda el pulso desde el momento que es enviado hasta el momento en el que regresa al rebotar en la herramienta de trabajo, uno de los inconvenientes al implementar esta técnica es que la velocidad del pulso puede variar con respecto al material de trabajo, la temperatura del electrolito y la velocidad con la que fluye, con lo que se puede modificar el valor de la distancia inter-electrodos. Su experimentación se llevó a cabo en maquinado de barrenos, y la implementación a un maquinado en dos o más ejes implica el aumento de variables: una de ellas la vibración que genera un sistema mecánico. La implementación de su instrumento para medición es una técnica intrusiva que puede ocasionar interferencia en el proceso de maquinado electroquímico.

Por otra parte, en el trabajo “*Localized electrochemical micromachining with gap control*” (Yong, et al., 2003). Li Yong *et al.* implementa la medición de la corriente de maquinado en un proceso ECM, desarrollando un prototipo el cual usa una fuente pulsada la cual es controlada por una computadora. Su prototipo trabaja sobre dos ejes X Y y está orientado a generar micro orificios verticales. Para poder realizar el desbastado del material de trabajo, el electrodo o herramienta de trabajo es desplazado hacia la pieza de trabajo, en el momento que se detecta el cortocircuito el electrodo es elevado para después generar los pulsos de la fuente de voltaje y que se realice la remoción de material; este ciclo es realizado en múltiples ocasiones hasta obtener la profundidad deseada. La velocidad de remoción está directamente ligada a la frecuencia de la fuente pulsada misma que puede ser controlada desde la computadora. Si bien los resultados en barrenos son satisfactorios, está limitado a solo eso, en términos generales no se realiza una acción de control compleja al implementar una sola condición, la cual, si se detecta un cortocircuito, la herramienta de trabajo es elevada a una distancia preestablecida de 510 μm , posteriormente se reactiva la polarización y se vuelve a bajar la herramienta de trabajo para continuar con el proceso.

(Villagómez Galindo , et al., 2012), desarrollaron un sistema de un proceso de maquinado electroquímico, siendo necesario caracterizar el sistema para establecer los parámetros de la remoción de material, es decir cuánto material es removido por unidad de tiempo. El funcionamiento del sistema fue validado únicamente con aceros ASTM A36 y API 5L. El autor resalta en su trabajo que es necesario un sistema de control que mantenga constante la distancia inter-electrodos para mantener una remoción de material continua, para que el sistema pueda maquinar cualquier tipo de material sin necesidad de caracterizar el sistema de maquinado electroquímico.

(Zhang, et al., 2015) realizaron una investigación acerca de la importancia de la conductividad del electrolito en un proceso de perforación por descarga eléctrica. Las pruebas realizadas tienen la finalidad de evaluar el efecto que se tiene al trabajar con diferentes conductividades del electrolito, utilizando soluciones con una conductividad de 0.1 a 10 mS/cm, una polarización de 80 V, una corriente de 12 A, una frecuencia de conmutación de 20.83 kHz con ciclo de trabajo de 25 y 75 %. Como herramienta de trabajo se utilizó un tubo hueco de 500 μm de diámetro y las piezas de trabajo fueron aleaciones

de base cobalto con aleación de níquel. Cabe mencionar que la herramienta de trabajo tenía una velocidad angular de 100 RPM y el flujo del electrolito es de 2 l/min. Como resultados de la prueba, se resalta que el utilizar un electrolito con una baja conductividad mejora el acabado superficial y disminuye el efecto de sobre corte en el proceso de maquinado, esto debido a que, si se trabaja con un electrolito de alta conductividad, la herramienta de trabajo tiende a dañarse y de igual forma se remueve mayor cantidad de material en lugares no deseados.

4.2 Sistema de control

En la vida cotidiana, se interactúa con sistemas de todo tipo, desde modelos sencillos hasta los de mayor complejidad, los cuales en ocasiones no es posible dominar, dado que existen sistemas que funcionan de manera casi automática, sin necesidad de la manipulación del ser humano. También es cierto que sin la acción que realiza el ser humano para que los sistemas se comporten como se desea, estos serían inútiles; a todas esas acciones y decisiones que se toman con base en referencias, patrones y comportamientos se le define como control. Un sistema de control es un conjunto de elementos que interactúan entre sí, con el objetivo de regular y manipular los procesos que realiza un determinado sistema, con el objetivo de minimizar o eliminar el error y mantener el funcionamiento óptimo del sistema. Existen diversos tipos de control, pero pueden clasificarse en dos grandes áreas como, controles automáticos y manuales (Ogata, 1996).

Andonian y colaboradores (Andonian, et al., 2017), desarrollaron un sistema de control PID, para mantener la distancia entre los electrodos en un proceso de maquinado electroquímico, mediante el monitoreo de la corriente; detectando cuando la corriente de maquinado disminuye o aumenta y realiza una acción de control para el reposicionamiento del electrodo. Para controlar la distancia inter-electrodos realizan la obtención del modelo matemático referente al comportamiento de la corriente de maquinado, la validación del sistema se realizó utilizando un voltaje de polarización de 10 volts. Por lo que el control clásico óptimo para el proceso, en donde se mantenía un gap de 500 μ m equivalente a una corriente de 1.6 A, obteniendo una remoción de material constante y controlada. (Chithirai Pon, et al., 2017), menciona que trabajar con el PECM, la corriente de maquinado cambia al trabajar con diferentes frecuencias y ciclos de trabajo, por lo que

obtener el modelo matemático del proceso tendría una complejidad muy elevada, debido a ello; utilizar un controlador difuso es la opción viable, ya que se requiere conocer parámetros proporcionados por un experto y de acuerdo con ello diseñar el controlador para mantener una remoción de material constante.

En (Paulo Davim, 2012), plantea el modelo eléctrico de ECM, el cual lo comprende a un circuito con una resistencia equivalente a la conductividad del electrolito. La resistencia se encuentra conectada entre la herramienta y la pieza de trabajo, como se muestra en la Figura 4.2.1, en donde el comportamiento del circuito es de forma lineal, resaltando que la resistencia cambia respecto a la distancia inter-electrodos que se tenga. En donde a mayor cercanía entre la pieza de trabajo y el electrodo; la resistencia se reduce y se tiene mayor remoción de material, por consiguiente, la corriente de maquinado es mayor, de lo contrario si la distancia entre los electrodos aumenta la resistencia aumenta, obteniendo menor cantidad de remoción de material y la corriente de maquinado tiene un valor de 3 a 7 Ω .

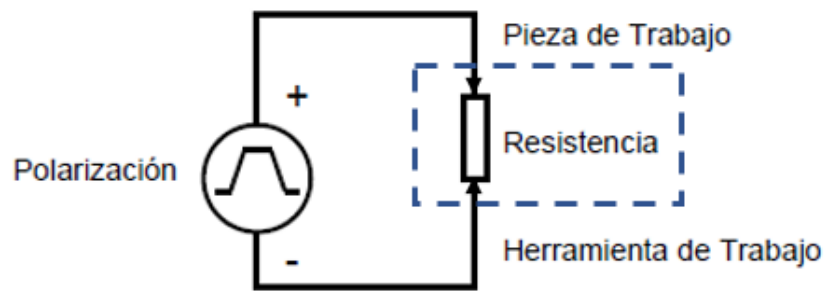


Figura 4.2.1 Modelo eléctrico de ECM (Katz & Tibbles J., 2012).

(Zhiyong & Guangming , 2008) resaltan que el trabajar con una fuente pulsada minimiza el diámetro de sobre corte, pero el modelo eléctrico del proceso aumenta su complejidad por lo que afirman que trabajar con una polarización pulsada de hasta 20 kHz, tanto el voltaje de polarización y la corriente de maquinado, el modelo eléctrico está compuesto por una resistencia y un capacitor en paralelo en la Figura 4.2.2. Por otra parte (León Hernández, 2013), menciona que trabajar con una polarización pulsada el comportamiento de la corriente de maquinado cambia respecto a la frecuencia de trabajo. En donde al trabajar a frecuencias mayores a 30kHz en el proceso PECM el modelo eléctrico lo comprende una resistencia, un capacitor, una bobina y diodo, por lo que controlar un

sistema de PECM a frecuencias altas resulta complejo, en la Figura 4.2.3, se muestra el modelo eléctrico del proceso de maquinado. Por lo que controlar el proceso de maquinado electroquímico se convierte en un sistema no lineal, por lo cual manipular el proceso mediante sistemas de control clásicos no es posible realizarlo, una de las alternativas que se tiene es utilizar un controlador moderno, que permita realizar acciones de control a sistemas no lineales, realizando la reducción a fallas y mejorando el proceso.

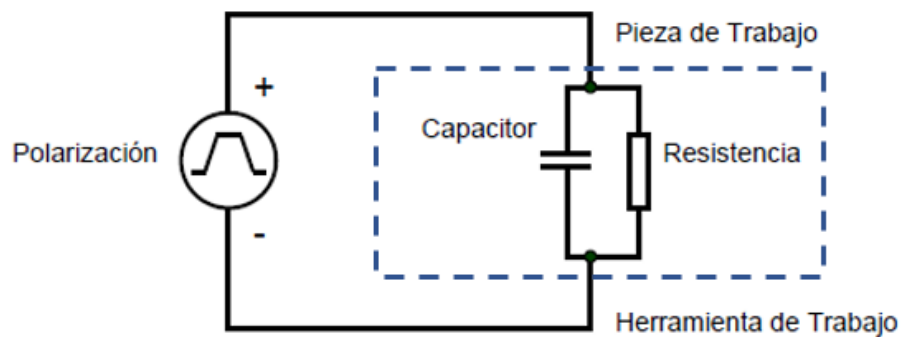


Figura 4.2.2 Modelo eléctrico de PECM a 20kHz (Katz & Tibbles J., 2012).

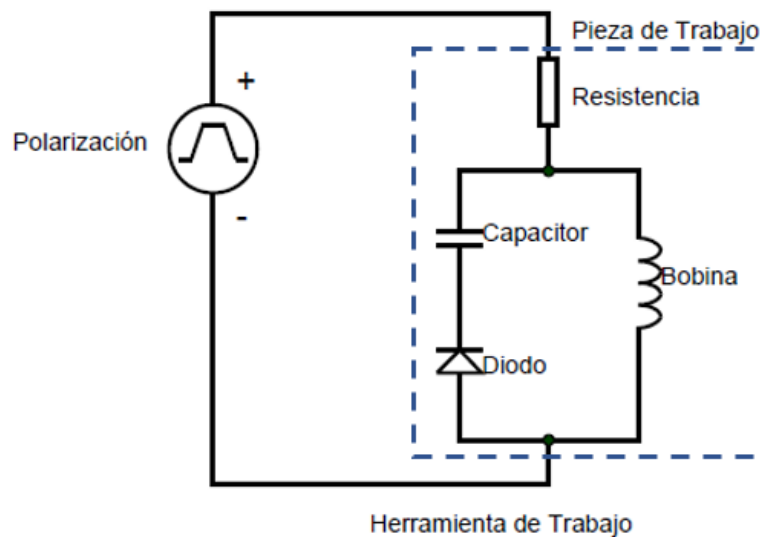


Figura 4.2.3 Modelo eléctrico de PECM a 40kHz (Katz & Tibbles J., 2012).

En los trabajos de (Villagómez Galindo , et al., 2012), (Lijo & Somashekhar Shambulingayya , 2012), (Klocke, et al., 2016) (Lilong, et al., 2018) y (Chithirai Pon, et al., 2017), mencionan que el controlar el proceso de maquinado electroquímico tiene una

tiene la problemática la cual influyen la configuración de los parámetros de entrada, para determinar los resultados al término del maquinado, por tal motivo resaltan que el utilizar sistemas de control no resultan efectivos. Los parámetros de entrada; como voltaje de polarización, separación de los electrodos y frecuencia de trabajo, mientras que los parámetros de salida tales como; tasa de remoción de material y diámetro de sobre corte, estos parámetros están sujetos a presentar incertidumbres.

Los parámetros de entrada que intervienen en los procesos de maquinado son: el voltaje de polarización, distancia inter-electrodos inicial, frecuencia y ciclo de trabajo, concentración del electrolito y flujo del electrolito. Como parámetros de salida se tiene la tasa de remoción de material (MRR, por sus siglas en inglés Material Removal Rate), Diámetro del Sobre corte (DOC, por sus siglas en inglés Diametral Overcut) y profundidad resultante. En el trabajo desarrollado por (Martinez Alvarado , et al., 2015), mencionan que polarizar el proceso de maquinado electroquímico con una fuente pulsada mejora a un 14% la reducción del efecto de sobre corte en comparación con la polarización en CD. Pero si se trabaja con una alta frecuencia se mejora la calidad del barreno, reduciendo el efecto de sobre corte un 20%.

(Grujic, et al., 2017) en el artículo “*General fuzzy integral as a base for estimation of fuzzy quantities*”, menciona que el control difuso es utilizado en condiciones donde no es posible obtener el modelo lineal; es decir que lo que se quiere controlar presenta un modelo no lineal. El control por lógica difusa es diseñado en base a parámetros proporcionados por un experto. La ventaja que se tiene al utilizar un control por lógica difusa es que asemeja las acciones de acuerdo con el actuar del hombre. El control difuso se puede diseñar con una sensibilidad de respuesta utilizando mayor cantidad de reglas, pero a mayor cantidad de reglas conlleva a utilizar mayor recurso computacional.

La lógica difusa utiliza el conocimiento y experiencia de un operador humano para construir un controlador que emule el comportamiento de tal persona. Comparado con el control tradicional, el control difuso tiene dos ventajas prácticas, una es que el modelo matemático del proceso a controlar no es requerido y otra es que se obtiene un controlador no lineal desarrollado empíricamente sin complicaciones matemáticas todo basado en el conocimiento de un humano (Tanaka, 2012) (Hung Lea & Khanh Tran, 2018).

Mientras que (Mohd , et al., 2013), (Shabgard, et al., 2013), (Sengottuvel, et al., 2013) y (Kohli, et al., 2012), afirman que los resultados del proceso de maquinado electroquímico son correspondientes de acuerdo a la configuración de los parámetros de entrada, por lo cual el controlar el proceso mediante técnicas de control clásico no es posible, por lo que en la literatura presentada trabajan con sistemas de control por lógica difusa, donde los resultados del modelo es predecir el resultado del proceso de acuerdo a la configuración parámetros de entrada.

4.3 Lógica Difusa

La Inteligencia Artificial (IA) es la ciencia e ingeniería que se encarga de dotar a las máquinas cierta inteligencia, la cual se puede expresar como algoritmos que diferencian patrones o discriminan ciertas informaciones. Esto permite que, a través de programas informáticos, las máquinas tomen decisiones inteligentes que tomaría un operario. La diferencia radica en el tiempo de tomar la decisión, ya que el programa informático la toma y realiza la acción en fracciones de segundos, mientras que el operario haría la operación en minutos u horas. Mediante las herramientas de la IA, en la ingeniería se resuelven problemas difíciles que normalmente requieren la inteligencia humana, reduciendo los tiempos de operación (Rodríguez, 2018).

La lógica difusa, también conocida como lógica borrosa, la cual se basa en métodos heurísticos, los cuales consisten en traducir a variables lingüísticas la experiencia previa, consejos, intuiciones y estrategias de uso frecuente. Las reglas heurísticas son una implicación lógica de la forma:

si <condición> **entonces** <consecuencia>

Dónde la condición es conocida también como “antecedente” y la consecuencia es conocida como “consecuente”. Estas reglas lingüísticas son conocidas como reglas difusas debido a que presentan cierto nivel de incertidumbre (Bravo, 2018).

La lógica difusa es una lógica precisa de la imprecisión y el razonamiento aproximado. Expresa además que puede verse como un intento de formalización y mecanización de capacidades humanas: la capacidad de conversar, razonar y tomar decisiones racionales en un ambiente de imprecisión, incertidumbre, ambigüedad, información incompleta y contradictoria, parcialidad de la verdad, parcialidad de la posibilidad, es decir, en un entorno de información imperfecta (Bravo, 2018).

Una de las principales ventajas de la lógica difusa radica en que brinda enfoques diferentes a los de la lógica booleana (lógica clásica). En la lógica booleana, los enunciados toman sólo dos valores: 0 o 1, falso o verdadero, sí o no; siendo excluyentes y con un cambio abrupto entre ambas opciones, por lo que las variables son bivalentes. Por otra parte, la lógica difusa se basa en el concepto de la verdad parcial asignando a un enunciado un valor entre $[0;1]$, el cual expresará su nivel de membresía o pertenencia a cierta clasificación. Una variable tiene la característica de multivalencia, pues puede tomar valores en el intervalo $[0;1]$ (Rodríguez, 2018).

Para una mejor comprensión en la figura 4.4 se establece una comparación de los enfoques de ambas lógicas.

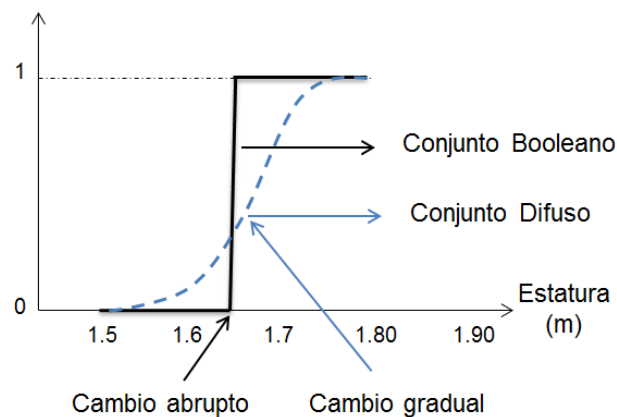


Figura 4.3.1: Comparación entre lógica booleana y lógica difusa (Bravo, 2018).

La pertenencia se interpreta como posibilidad, la lógica difusa maneja el término de posibilidad, el cual difiere del término probabilidad. Por ejemplo, una distribución de probabilidad se refiere a la probabilidad de que se produzca un suceso basado en observaciones; mientras que una distribución de posibilidades (función de pertenencia) es subjetiva. La palabra “probable” es sinónimo de “presumible”, “asumible”, “indudable”. La palabra “posible” es sinónimo de “factible”, “practicable”, “viable”. Además, indica que la posibilidad y probabilidad se encuentran sólo en un punto: cuando ambos son cero.

4.1.1. Funciones de membresía

El término $\mu_A(x)$ se denomina función de membresía o pertenencia, la cual es una función que representa gráficamente a cada variable lingüística e indica el valor de pertenencia de

un elemento del universo de discurso al conjunto A . Una función de membresía toma valores en el intervalo $[0,1]$, donde $\mu_A(x) = 1$ representa el mayor valor de pertenencia y $\mu_A(x) = 0$ representa no pertenencia.

En la figura 4.7, se muestran las características de las funciones de membresía. El soporte de la función es la región donde los elementos del universo de discurso tienen valor de pertenencia diferente de cero ($\mu_A(x) \neq 0$). El núcleo es la parte de la función donde los elementos presentan pertenencia máxima ($\mu_A(x) = 1$). Las fronteras son las zonas donde la membresía varía entre cero y uno ($0 < \mu_A(x) < 1$). Los puntos de cruce son los valores donde la pertenencia es de 0.5 ($\mu_A(x) = 0.5$), los cuales indicarán el ancho de banda de la función de membresía, determinado por el valor absoluto de la diferencia entre ambos puntos ($|x_2 - x_1|$). Otro elemento en las funciones de membresía es la altura, la cual es el máximo valor de membresía contenida en la función ($\max(\mu_A(x))$) (Bravo, 2018) (Rodríguez, 2018).

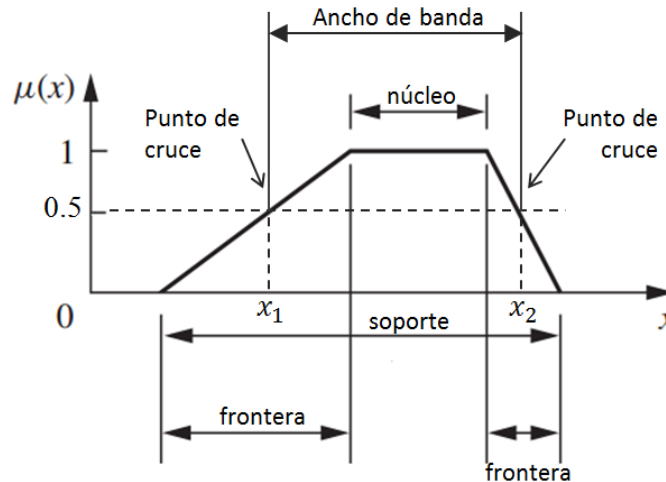


Figura 4.3.2: Características de las funciones de membresía (Adaptada de (Bravo, 2018)).

Hay dos formas de representar una función de membresía: continua y discreta. Entre las funciones discretas está la función Singleton (Tabla 4.1). Entre las formas más comunes de funciones continuas están la Trapezoidal (Tabla 4.2), Triangular (Tabla 4.3), Gaussiana (Tabla 4.4), Sigmoidal o “S” (Tabla 4.5), Hombro o Saturación (Tabla 4.6), entre otras.

Tabla 4.1: Función de membresía Singleton (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).

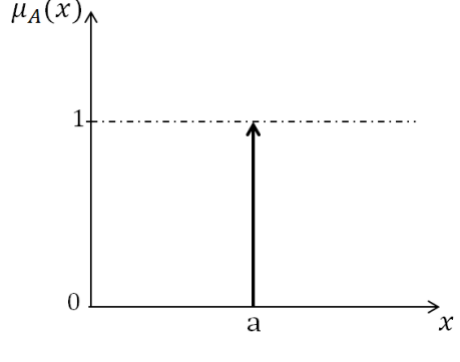
Ecuación	Gráfico
$\mu_A(x; a) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases}$	

Tabla 4.2: Función de membresía Trapezoidal (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).

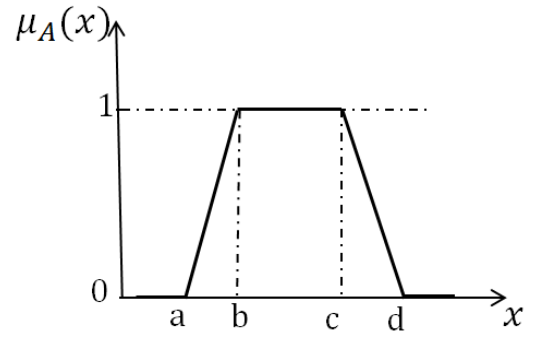
Ecuación	Gráfico
$\mu_A(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0; & x < a \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right); & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \left(\frac{d-x}{d-c}\right); & c \leq x \leq d \\ 0; & x > d \end{cases}$	

Tabla 4.3: Función de membresía Triangular (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).

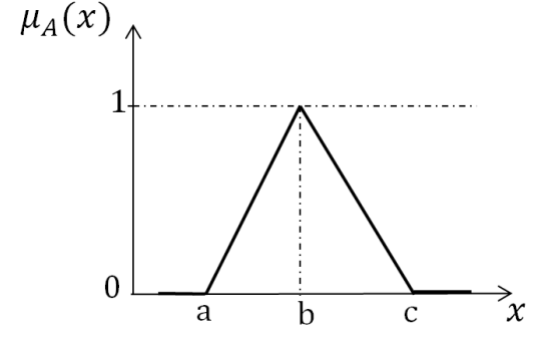
Ecuación	Gráfico
$\mu_A(x; a, b, c) = \begin{cases} 0; & x < a \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right); & a \leq x \leq b \\ \left(\frac{c-x}{c-b}\right); & b \leq x \leq c \\ 0; & x > c \end{cases}$	

Tabla 4.4: Función de membresía Gaussiana (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).

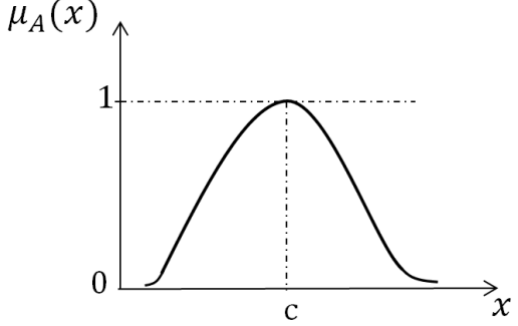
Ecuación	Gráfico
$\mu_A(x; c, \sigma) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma}}$ <p>c: centro</p> <p>σ: ancho</p>	

Tabla 4.5: Función de membresía Sigmoidal (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).

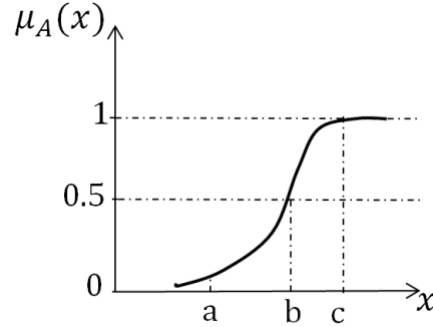
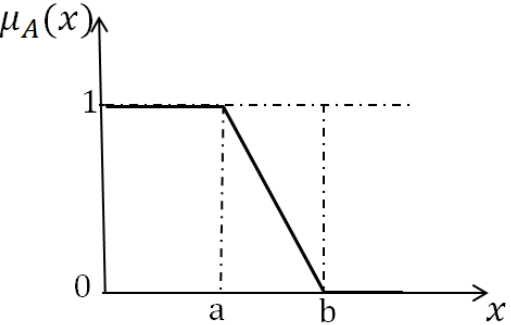
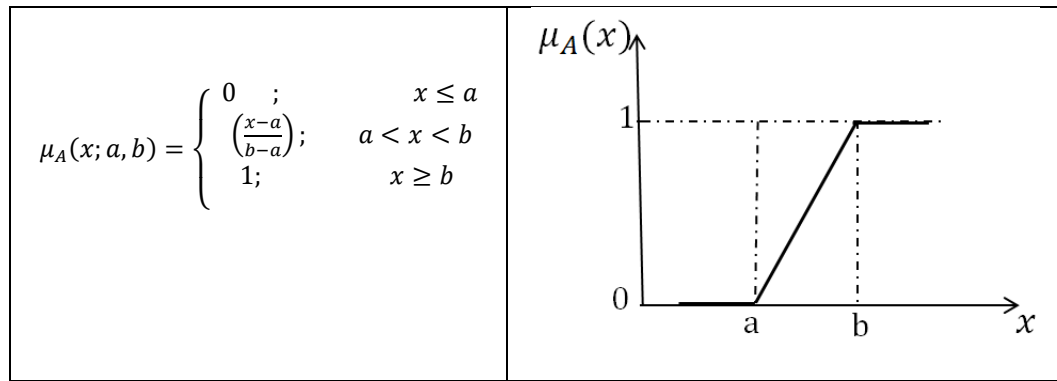
Ecuación	Gráfico
$\mu_A(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & ; & x < a \\ 2 \left(\frac{x-a}{c-a}\right)^2 & ; & a \leq x \leq b \\ 1 - 2 \left(\frac{x-a}{c-a}\right)^2 & ; & b \leq x \leq c \\ 1 & ; & x > c \end{cases}$	

Tabla 4.6: Funciones de membresía Hombro o Saturación (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).

Ecuación	Gráfico (Abierta hacia la izquierda)
$\mu_A(x; a, b) = \begin{cases} 0 & ; & x \leq a \\ \left(\frac{b-x}{b-a}\right) & ; & a < x < b \\ 1 & ; & x \geq b \end{cases}$	
Ecuación	Gráfico (Abierta hacia la derecha)



El empleo de cada forma es decisión del diseñador del sistema difuso, sin embargo existen recomendaciones, por ejemplo si la salida no es tan sensible a cambios en la entrada se aconseja utilizar funciones trapezoidales ya que presentan una porción plana; para casos donde los cambios de la respuesta son más repentinos se aconseja funciones triangulares. Las funciones de membresía contenidas en un universo de discurso se solaparán y la cantidad de solapamiento afecta la exactitud del sistema. Se ha establecido experimentalmente que el solapamiento debe estar entre el 25% y 75% (Rodríguez, 2018).

4.4 Sistema de cómputo

Un sistema de cómputo se define como un conjunto de partes informáticas que se relacionan entre sí: recursos físicos (Hardware) y recursos lógicos (Software), que al trabajar en conjunto se genera el procesamiento de la información (Martos Rubio , 2017). Hardware incluye a computadoras o cualquier dispositivo periférico de entrada/salida, que están constituidos por un procesador, memorias y sistemas de almacenamiento externo (Patt N. & Patel J., 2004). El software incluye al sistema operativo, códigos fuente de función específica y aplicaciones. El soporte humano incluye al recurso encargado de crear y dar mantenimiento al sistema entre ellos (programadores, analistas y operarios).

La unidad central de procesamiento utilizada para el desarrollo del proyecto es una SBC (Single Board Computer) modelo Raspberry Pi 3, debido a que es una tarjeta de desarrollo basada en software y hardware para generar sistemas a la medida (sistemas embebidos). La SBC cuenta con las especificaciones básicas para controlar el proceso de Micro-PECM. Sus características se muestran en la Tabla 7 (Raspberry Pi Corporation , 2018). La función de Raspberry será el monitoreo de variables involucradas en el proceso de

maquinado electroquímico por pulsos y con ello poder comandar los movimientos de la herramienta de trabajo.

Tabla 7. Características de Raspberry Pi 3

Chip Integrado	Broadcom BCM2387
CPU	1.2 GHz de cuatro núcleos ARM Cortex-A53
Procesador Grafico	Dual Core VideoCore IV ® Multimedia Coprocesador
Memoria RAM	1 GB
Puertos USB	4 x USB 2.0
Salida de video	HDMI
Salida de audio	Jack de 3.5mm
Almacenamiento	SD mínimo 8 GB
Conexión de Red	Ethernet 10/100 (RJ45) e inalámbrica LAN
Pines I/O	8 x GPIO-UART
Voltaje útil desde pines GPIO	+3.3VDC/ +5VDC/ Tierra
Alimentación	5V a 1A vía Micro USB
Sistema Operativo	Distribuciones basadas en GNU/Linux

Raspberry ofrece una variedad de puertos GPIO (General Purpose Input/Output, Entrada/Salida de Propósito General), siendo 40 terminales en el modelo Pi 3. Así mismo, Raspberry permite realizar comunicaciones con el exterior; como activaciones o lecturas de eventos. La tensión de trabajo en Raspberry para un 1 lógico es 3.3V y un 0 lógico es 0V. La corriente máxima que puede suministrar Raspberry en sus GPIO es de 50 mA.

Para la adquisición de variables analógicas en Raspberry, se requiere de un convertidor de Analógico a Digital, que mediante protocolo de transmisión de datos SPI (del inglés Serial Peripheral Interface) realiza la comunicación con la SBC. SPI funciona a partir de un estándar de comunicación de datos, usado para la transferencia de información entre dispositivos electrónicos. Mediante SPI se puede controlar casi cualquier dispositivo

electrónico digital que acepte una secuencia de bits en serie, regulado por una señal de reloj, por lo que se denomina comunicación sincrónica (Bautista Roldán & Jesús Gámiz Pérez, 2011).

SPI es un protocolo donde la sincronización y la transmisión de datos se realiza por medio de 4 señales:

1. SCLK (Clock): Es el pulso que marca la sincronización. Con cada pulso de este reloj, se lee o se envía un bit.
2. MOSI (Master Output Slave Input): Salida de datos del Maestro y entrada de datos al Esclavo. También llamada SIMO.
3. MISO (Master Input Slave Output): Salida de datos del Esclavo y entrada al Maestro. También conocida por SOMI.
4. CS (Chip Select): Encargado de la habilitación del bus SPI.

La necesidad del registrar datos del proceso de maquinado de manera detallada; se requiere de una herramienta capaz de brindar rendimiento, confiabilidad y facilidad de uso. Por esta razón se optó utilizar MySQL, el cual es un gestor de la base de datos de código abierto, que cumple con normativas y estándares de calidad (Gilfillan, 2006).

Como sistema operativo de la SBC se utilizó Raspbian, que es una distribución de Linux y basado en Devian Wheezy (7.0) de código abierto, la distribución usa LXDE como escritorio y Chromium como navegador web. Contiene herramientas de desarrollo como IDE (Entorno de desarrollo integrado) para el lenguaje de programación Python (LXDE, 2005). El sistema operativo se descarga desde la página oficial de Raspberry Pi (Raspberry Pi Corporation , 2018) y se carga a una memoria SD, posteriormente se introduce en la SBC y se enciende, para configurar el sistema operativo.

Para el control del hardware se requirió desarrollar la programación del sistema, mediante lenguaje de programación Python. Este es un lenguaje interpretado, es multiplataforma que usa tipado dinámico (una misma variable puede tomar valores de distinto tipo en distintos momentos (Chazallet L., 2013).

5 MÉTODO

En este capítulo, se describe la metodología para el desarrollo del trabajo y la metodología que se llevó a cabo para controlar la distancia inter-electrodos del proceso de maquinado electroquímico por pulsos. También se describe a detalle las etapas que componen a dicho sistema.

5.1 Requerimientos o especificaciones de sistema de computo

Software:

Se utilizo el entorno de desarrollo de software Python, debido a que es una de las plataformas de programación utilizada en Raspberry, en donde se desarrollo la programación del sistema de control y la interfaz de usuario.

Hardware:

Se utilizo una computadora de una sola placa (SBC, por las siglas en inglés de Single Board Computer), modelo Raspberry Pi 3, debido a que es una tarjeta de desarrollo basada en software y hardware para generar sistemas a la medida. La función de Raspberry Pi 3 es el monitoreo de variables involucradas en el proceso de maquinado electroquímico por pulsos y con ello poder comandar los movimientos de la herramienta de trabajo.

Adicionalmente se utilizo:

Un sistema mecánico de 3 ejes coordenados.

Circuitos manejadores de motores a pasos para el movimiento de los ejes coordenados cuyo voltaje de operación a 12 Volts y un límite de corriente de 10 Amperes. Así mismo, los circuitos manejadores de los motores a pasos deben ser capaces de controlar: dirección de giro, rotación en paso completo o medio paso y velocidad de giro.

Se requiere de un sistema de bombeo para recirculación del electrolito, el cual consta de:

1. Un recipiente capaz de almacenar el electrolito.
2. Tres bombas con un voltaje de operación a 12 V y un flujo de 1 L/ s.
3. Sistema de filtrado y recirculación del electrolito.

4. Solución de Electrolito de Cloruro de sodio o Nitrato de sodio, con una concentración de masa del 16.6% lo cual genera una conductividad de 217.1 mS/cm o $4.7 \Omega \cdot \text{cm}$.
5. Muestras de material metálico AISI 1018; se propone su uso ya que es utilizado frecuentemente para la fabricación de estructuras metálicas, moldes industriales, tornillos, tuercas entre otras.

5.2 Construcción del prototipo

Para el desarrollo del proyecto se cuenta con un sistema mecánico de 3 ejes coordenados, el cual tiene un motor a pasos para el desplazamiento de cada eje coordenado, la resolución es de 8mm por vuelta del motor; para generar la secuencia de movimientos en los motores, se requiere desarrollar un circuito de mando para cada motor, que a su vez son controlados por una secuencia generada mediante una Computadora de una sola Placa (SBC, por sus siglas en inglés).

5.2.1 Construcción del circuito de mando para el sistema mecánico

Se desarrolló un circuito de mando con la capacidad de poder comandar los movimientos de los motores a paso, lo cual para su fabricación se utilizó el circuito integrado L297 y un arreglo de MOSFETS, basado en un manejador para motores a pasos, para suministrar la energía de los devanados de los motores, donde su límite de corriente es de 10 A y su voltaje de funcionamiento es de 15V.

El circuito integrado L297 es un controlador de motores a paso, el cual genera cuatro señales que recibe el arreglo de MOSFETS para controlar el giro del motor, de igual forma tiene un voltaje de funcionamiento de 3.3 a 5V, controlando la velocidad, sentido y habilitación del circuito de mando. Mientras que el arreglo de MOSFETS es el encargado de recibir las señales del control del L297, para proporcionar la corriente necesaria para lograr el funcionamiento de los motores a pasos a una resolución de $\frac{1}{2}$ paso para trabajar con una reducción de $20\mu\text{m}$ por paso. Los movimientos de los motores son gestionados mediante una Raspberry Pi 3; la cual es capaz de controlar los movimientos de los 3 motores del sistema mecánico de forma sincronizada. El diagrama esquemático del circuito de control se muestra en la Figura 5.2.1.

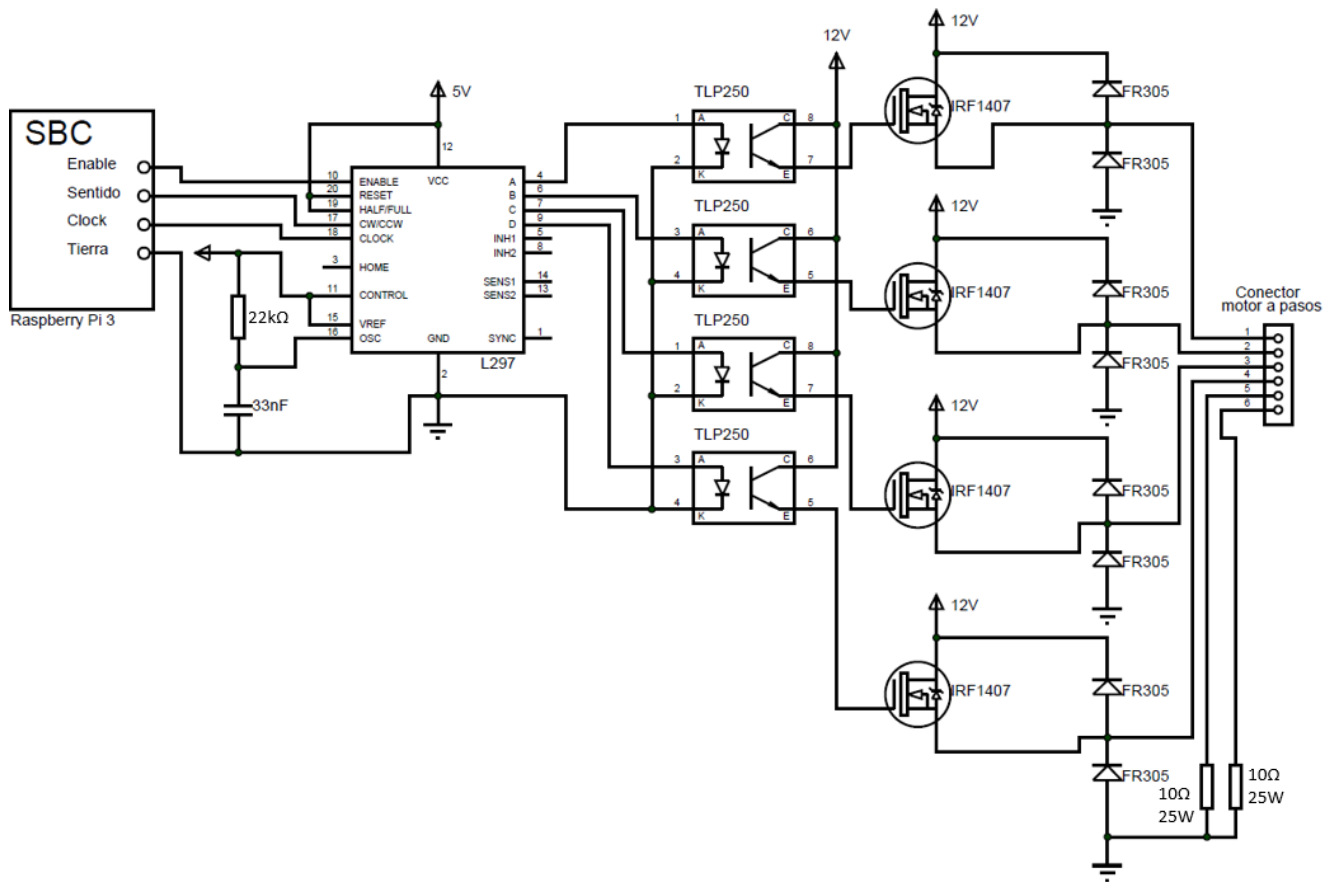


Figura 5.2.1 Sistema de mando para motores a paso.

5.2.2 Construcción del sistema de filtrado del electrolito

El proceso de maquinado electroquímico produce compuestos derivados de la remoción de material, tal como se muestra en la Figura 5.2.2, éstos compuestos obstruyen la circulación del electrolito a través del electrodo, llegando a generar una condición de cortocircuito debido a que el material disuelto se acumula generando una nata de residuos, hasta llegar a tener contacto con el electrodo y generar dicha condición, cuando sucede esta condición se debe interrumpir el proceso, debido a que la temperatura de la herramienta de trabajo aumenta llegando al sobrecalentamiento y por consiguiente sufre deformaciones físicas haciéndolo inservible para su utilización en el proceso de maquinado electroquímico.

De acuerdo con (Catarino Aguilar , 2017) y (Altena & De Silva, 2012), afirman que para mantener una remoción constante es requerido un sistema de filtrado, ya que los residuos

generados en el proceso tienden a obstruir el flujo del electrolito y acumularse en el área de maquinado llegando a ocasionar cortocircuitos que dañan la herramienta de trabajo.

El sistema de filtrado propuesto consiste en 3 bombas de agua; encargadas de la circulación y limpieza de la pieza de trabajo. La bomba número 1 es la encargada de hacer circular electrolito limpio del contenedor al electrodo, mientras que la bomba número 2 bombea electrolito limpio hacia la pieza de trabajo para evitar que se genere una nata de residuos y la bomba número 3 es la encargada de bombear el electrolito sucio del recipiente de trabajo al contenedor para que la solución sea filtrada. La solución utilizada es $H_2O + NaCl$, con una concentración de masa del 16.6% lo cual genera una conductividad de 217.1 mS/cm o $4.7 \Omega \cdot \text{cm}$ (medido con un conductímetro HANNA modelo HI5521-02). El sistema de filtrado y recirculación por decantación está compuesto por cuatro etapas, en donde el electrolito entrante al contenedor contiene los residuos o lodos con mayor peso que se van sedimentando y el electrolito con menor cantidad de residuos se encuentra en la parte superior y pasa a la siguiente sección, donde se repite el proceso hasta llegar a la etapa 4, que contiene un filtro encargado de retener los residuos antes de que llegue a la bomba para la recirculación del electrolito. En la Figura 5.2.2 se observa el sistema de recirculación del electrolito, el cual cuenta con tres bombas que tienen un flujo de 1 l/min, de igual forma se tiene un filtro poroso encargado a retener los lodos que pasan a la etapa 4, con el fin de que el electrolito recirculado contenga una menor cantidad de residuos que llegasen a afectar el proceso de maquinado electroquímico por pulsos.

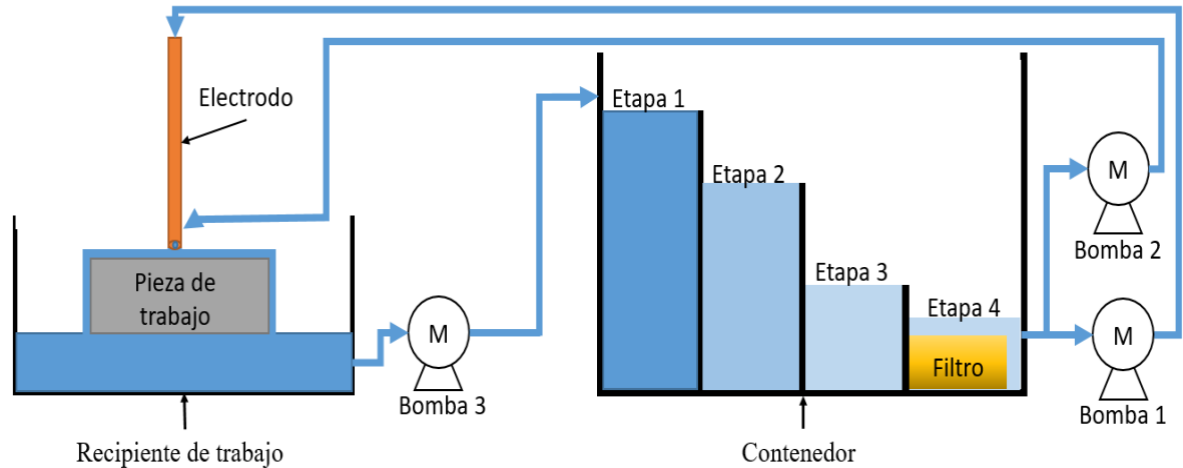


Figura 5.2.2 Sistema de filtrado y recirculación del electrolito.

5.2.3 Desarrollo de la fuente pulsada

En el proceso de maquinado electroquímico se requiere de una fuente de alimentación pulsada con las siguientes características:

1. Velocidad de conmutación a ajustable de 10 kHz a 50 kHz
2. Selección del ciclo de trabajo
3. Voltaje de salida a 10V
4. Corriente de salida a 3A

Estas características son esenciales en el proceso de maquinado electroquímico por pulsos, con el fin de que ocurra el proceso de disolución anódica. Para establecer el proceso de maquinado electroquímico, se desarrolló una fuente pulsada basada en (Martinez Alvarado , et al., 2015), donde se utilizó un controlador de medio puente IRF2111 asociados a MOSFETS IRFZ44N capaces de computar hasta velocidades de 100 kHz. En la Figura 5.2.3 se muestra el diagrama esquemático de la fuente pulsada.

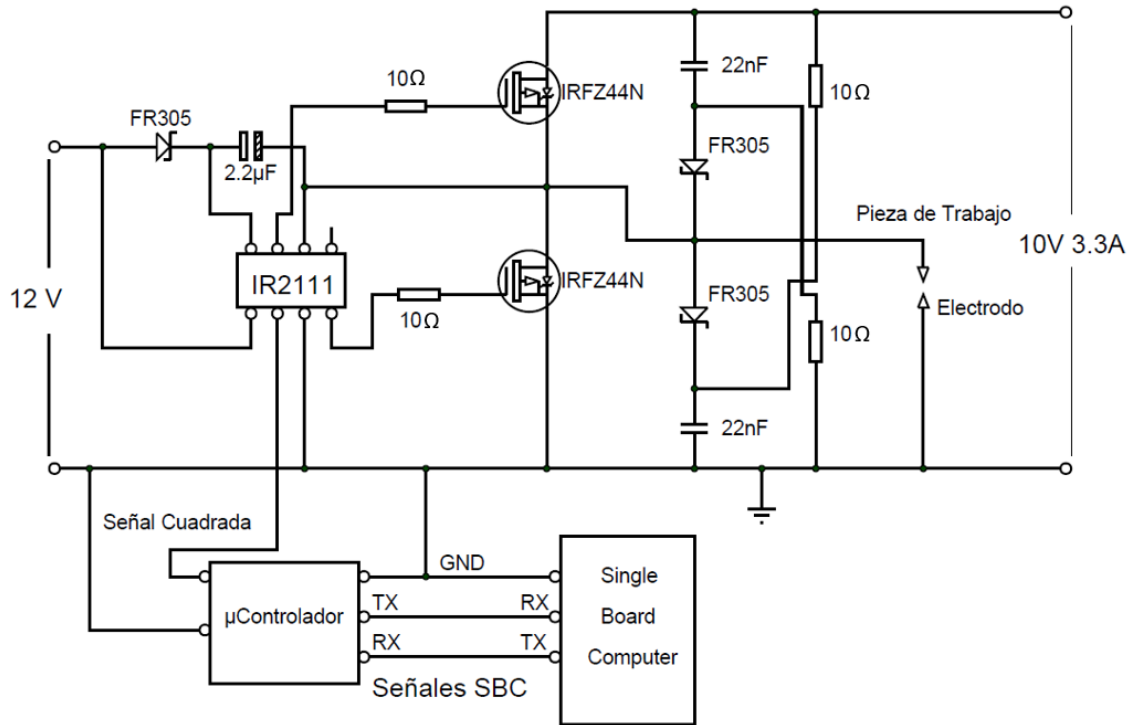


Figura 5.2.3 Diagrama esquemático de la fuente pulsada.

5.2.4 Etapa de adquisición de datos

La corriente de maquinado se considera en este trabajo como la variable de mayor importancia, ya que permite estimar la distancia entre los electrodos y mantenerla dentro de un intervalo que permita realizar de manera adecuada el proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos. Si la corriente de maquinado aumenta, se debe a que el electrodo tiene mayor cercanía con la pieza de trabajo; de lo contrario, si la corriente de maquinado disminuye es porque el electrodo se está alejando de la pieza de trabajo. Por esta razón se requiere monitorear la corriente de maquinado para que el sistema de cómputo pueda realizar una acción de control a fin de mantener una distancia inter-electrodos de manera constante o mantenerla lo más apegada a una constante.

Para realizar la medición de la corriente de maquinado; se utilizó un sensor con matrícula ASC712, el cual se conecta en serie en el circuito que integra la herramienta y la pieza de trabajo en conjunto con la fuente de voltaje. La salida del sensor es conectada a un circuito integrado AD536 que obtiene el valor cuadrático medio (RMS), con la finalidad de

obtener el valor eficaz de la corriente de maquinada pulsada. La salida del integrado AD536 es adquirida por una SBC (Single Board Computer) modelo Raspberry Pi 3 mediante un convertidor de analógico a digital modelo MCP3208 de 12 bits de resolución que se comunica mediante protocolo SPI (Serial Peripheral Interface, por su significado al inglés). El diagrama de conexión del sensor de corriente ASC712 y el divisor de voltaje se muestra en la Figura 5.2.5.

Para monitorear la corriente de maquinado se hace uso del sensor de corriente de efecto Hall, el cual puede medir magnitudes de corriente de CD y CA de hasta 30 A, con una sensibilidad de 1 V/A con un ancho de banda de 50 kHz. En la Figura 5.2.5, se presenta el diagrama esquemático de conexión del sensor ASC712, donde la terminal I+ se conecta a la herramienta de trabajo (electrodo), mientras que I- se conecta al cátodo de la fuente de voltaje encargada de suministrar la energía para el proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos, VCC se conecta a la fuente de 5V, tierra a la referencia de la polarización; IOUT se conecta a la entrada del circuito integrado AD536 y la salida de este es conectada al canal 1 del convertidor de analógico a digital MCP3008. La función del integrado AD536, es la obtención de valor cuadrático medio de una señal y como salida generar un voltaje equivalente en CD.

La adquisición del voltaje de polarización se realiza mediante un divisor de voltaje, el cual puede realizar mediaciones de hasta 20 V, la conexión se realiza en paralelo a la pieza y herramienta de trabajo, donde la salida del divisor de voltaje es conectada al circuito integrado AD536 y la salida de este es conectada al ADC (Convertidor de Analógico a Digital). El diagrama esquemático del divisor de voltaje se muestra en la Figura 5.2.5.

La proporción del voltaje de salida con respecto al voltaje de entrada puede ser descrito mediante la ecuación (5.2). En la Figura 5.2.4, se muestra el diagrama esquemático del divisor de voltaje utilizado para el monitoreo del voltaje de polarización.

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

Donde:

V_{out} = Voltaje de salida [V].

V_{in} =Voltaje de entrada [V].

$R1, R2$ = Resistencias que forman el divisor de voltaje [Ω].

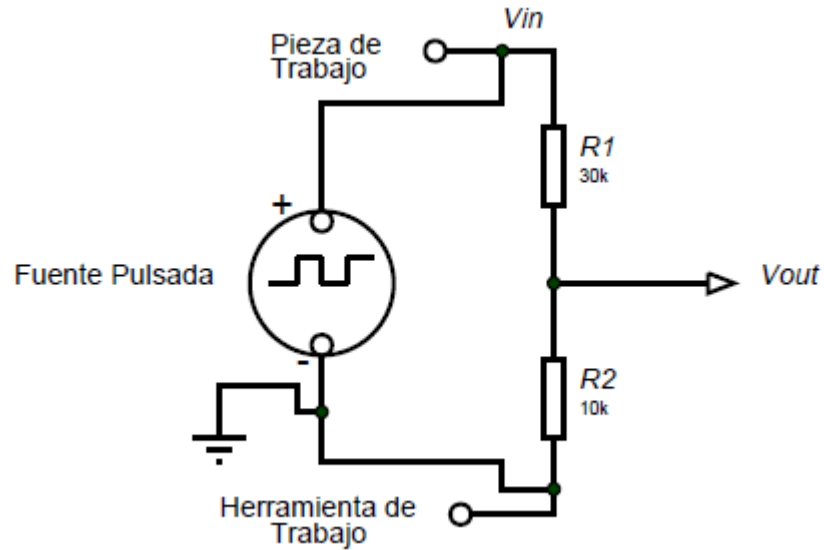


Figura 5.2.4 Diagrama esquemático del divisor de voltaje utilizado para el monitoreo del voltaje de polarización.

En la Figura 5.2.1 se muestra el diagrama electrónico de la etapa de adquisición de datos, en la que la corriente de maquinado y el voltaje de polarización son conectados a un integrado AD536 y su salida a un convertidor de Analógico a Digital, donde el voltaje de polarización es adquirido por el canal 0 y la corriente de maquinado por el canal 1 del ADC.

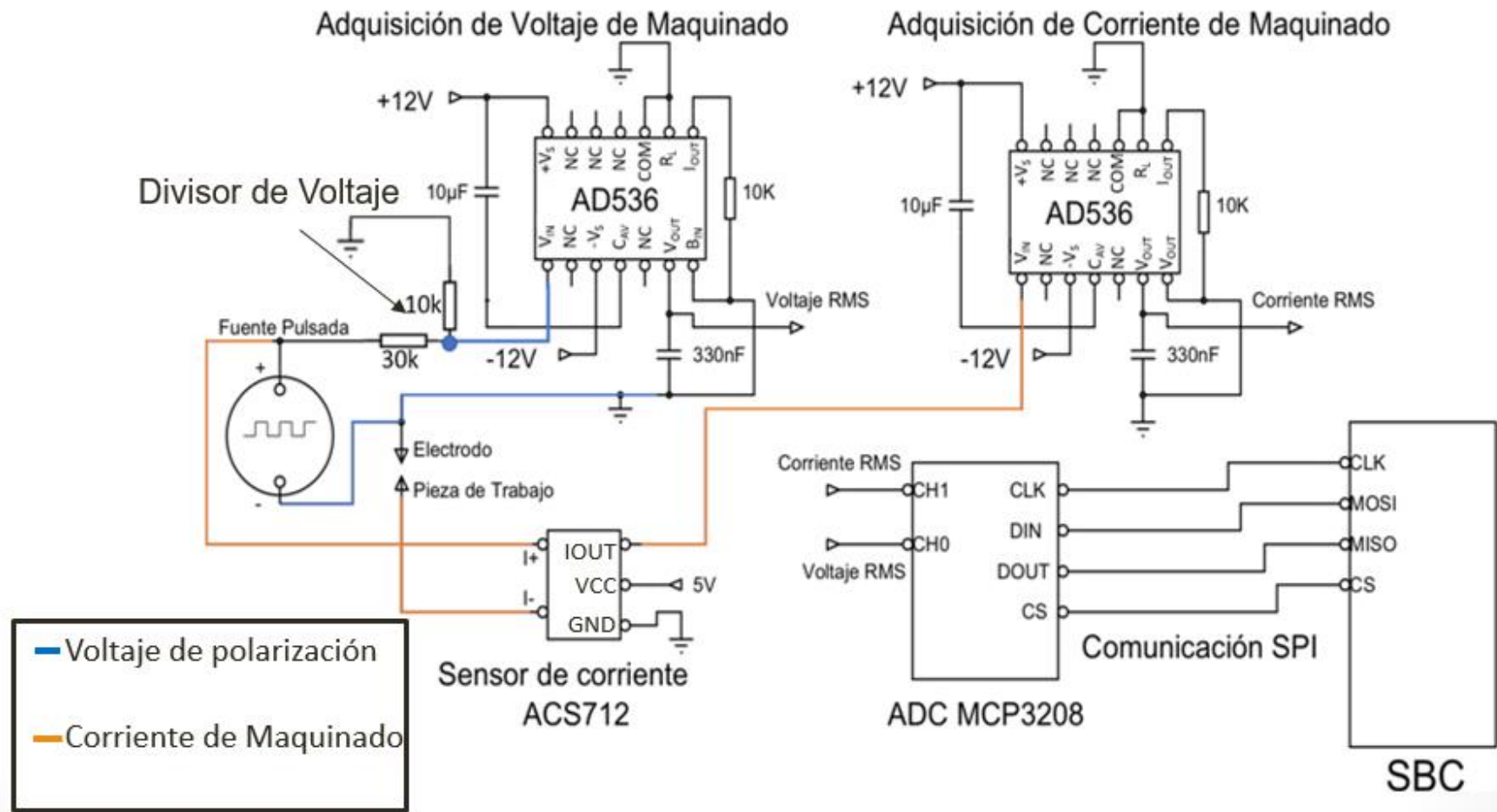


Figura 5.2.5 Conexión esquemática de la etapa de adquisición de voltaje de polarización y corriente de maquinado con la SBC.

Al contar con las partes de control mecánico, sistema de bombeo y sistema de adquisición del Voltaje de polarización y corriente de maquinado, es necesario caracterizar el proceso de maquinado electroquímico por pulsos, con el fin de conocer el comportamiento del proceso e identificar las variables que se encuentran inmersas dentro del proceso.

5.3 Diseño y desarrollo del Sistema Computacional

Para el desarrollo de este proyecto, se realizó un programa de computadora, en donde para su diseño es necesario conocer los requerimientos del cliente para generar un análisis de requerimientos y poder generar un software que cumpla con las restricciones proporcionadas por el cliente (S. Pressman, 2012). Para el diseño se emplearon diagramas de ingeniería de software que ayudaron a el desarrollo del sistema.

5.3.1.1 Diagrama de requisitos

El diagrama de requisitos se genera a partir de las necesidades del cliente; con la finalidad de identificar la herramientas y características que se deben cubrir para la funcionalidad del prototipo, establece una descripción general de cada una de las partes, además del funcionamiento o tarea que debe realizar cada una (S. Pressman, 2012).

La característica del diagrama de requisitos es el uso de rectángulos seccionados, donde se coloca como cabecera el requisito con una numeración continua y dentro de ella se describe el requisito; que puede ser una sección de programación, almacenamiento, presentación de la información, parte física o un proceso específico (Genero Bocco , et al., 2014). Cada requisito se enlaza mediante una línea, que parte del rectángulo especificaciones hacia los requisitos.

El diagrama de requisitos del sistema computacional se presenta en la Figura 5.3.2.1, donde los requisitos principales del sistema son: el sistema mecánico, circuitos de control de los motores a pasos, adquisición de variables, tarjeta programable, interfaz de usuario, seguridad y almacenamiento de datos.

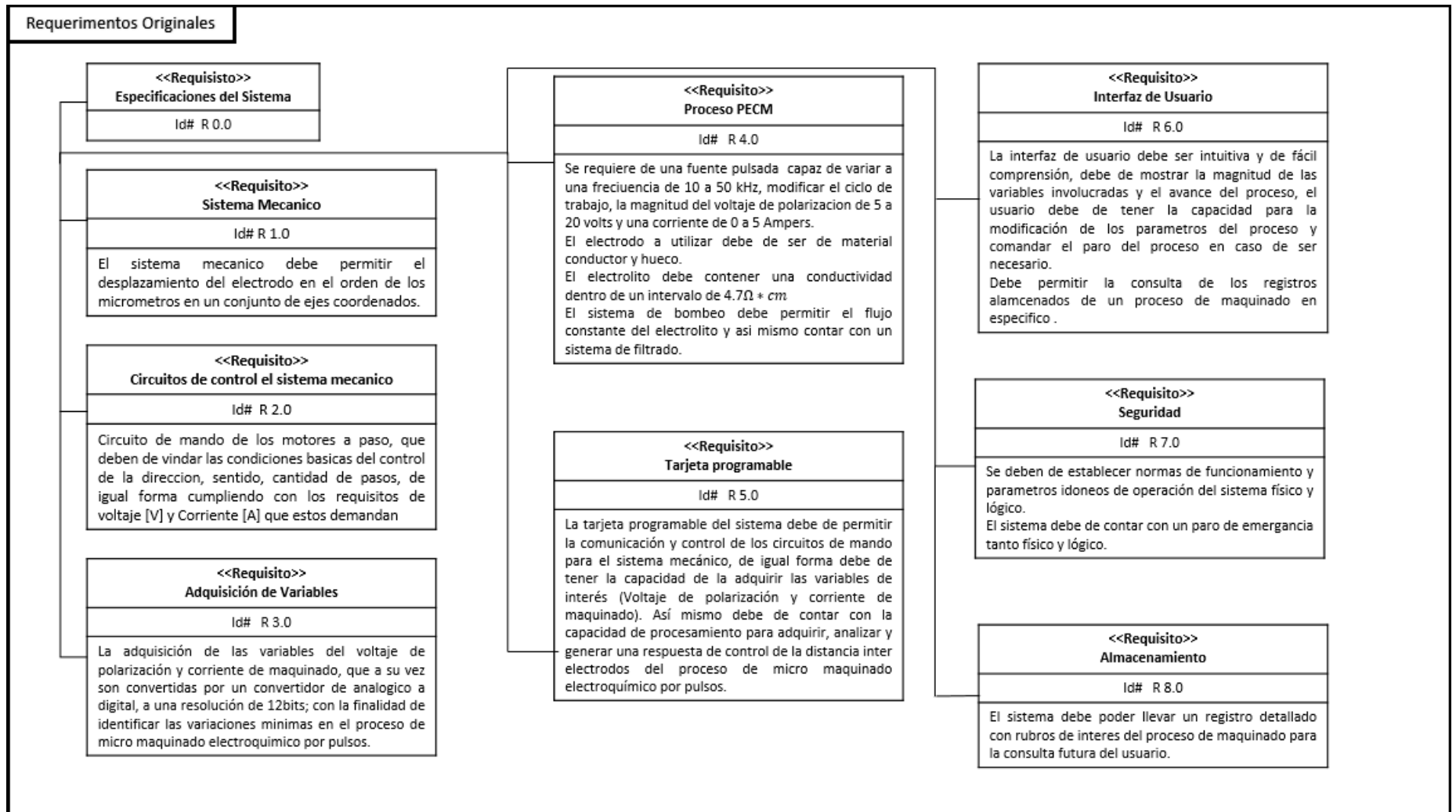


Figura 5.2.4.1 Diagrama de requisitos para el sistema computacional de proceso PECM.

5.3.1.2 Diagrama de flujo del sistema de Cómputo

Una vez definido el diagrama de requerimientos, se genera el diagrama de flujo del sistema de micro maquinado electroquímico por pulsos, que se muestra en la Figura 5.3.2.2 en donde de forma general se describe la secuencia y los pasos que debe seguir el software.

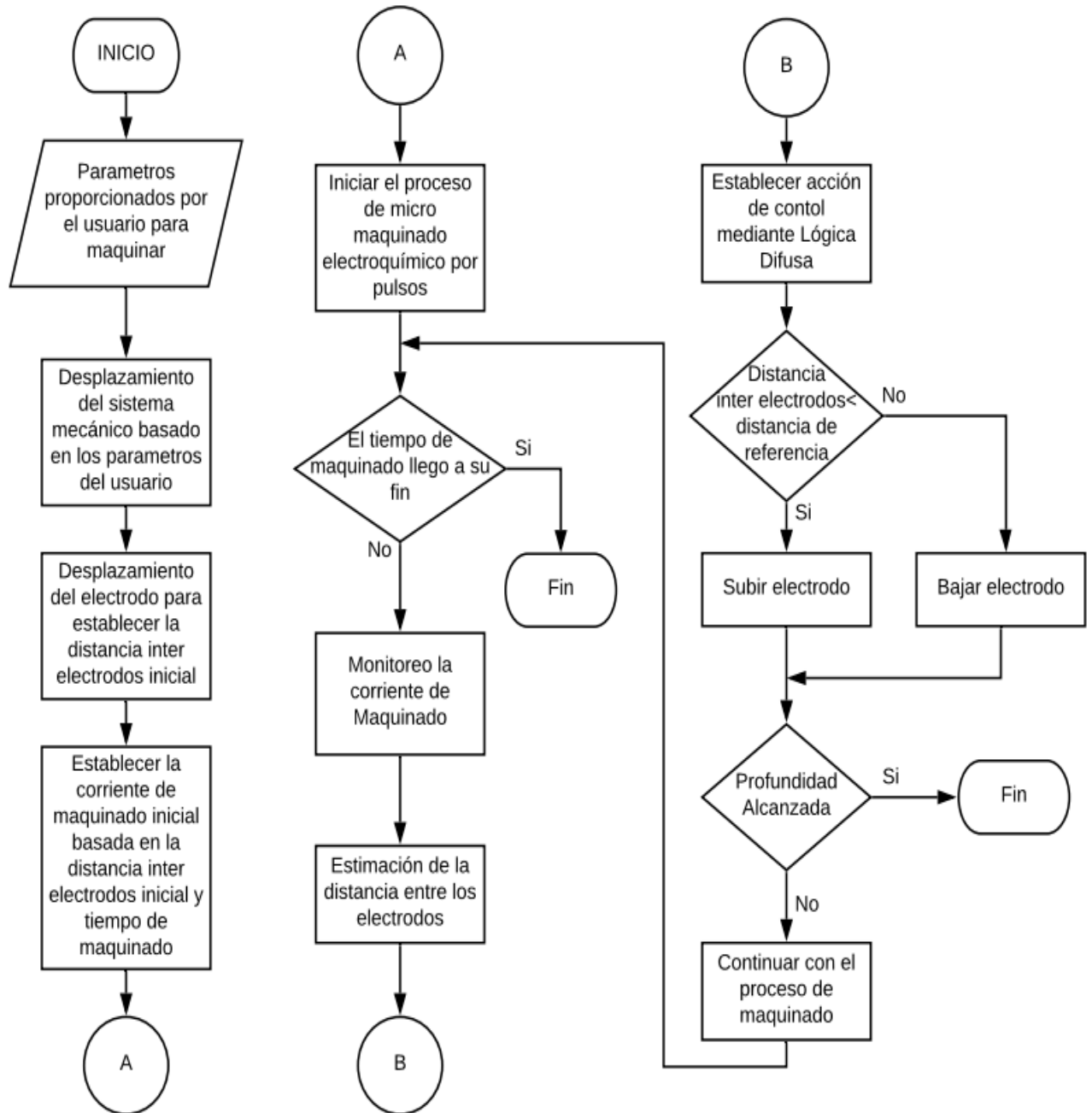


Figura 5.2.4.2 Diagrama de flujo del sistema de Cómputo

5.3.1.3 Diagrama de Casos de uso

Mediante el diagrama de casos de uso es posible modelar a través de actores, los cuales interactúan entre sí; esto para verificar y ejemplificar que el sistema tenga un correcto desempeño. El modelado de casos de uso ayuda a identificar de manera gráfica las tareas que el actor puede y debe realizar y la interacción que existe entre las diferentes tareas involucradas (Genero Bocco , et al., 2014) (S. Pressman, 2012).

El diagrama de casos de uso es una herramienta para el programador, que permite identificar la relación entre cada uno de los elementos y la manera en que interactúan, de igual forma permite conocer el número de actores involucrados y la influencia que tiene el uno del otro. La finalidad del diagrama de casos de uso es que al programador le brinda la información para programar cada módulo y cada etapa de manera más clara, evitando la repetibilidad y redundancia, esto influye para disminuir las líneas de código del programa (S. Pressman, 2012).

En los diagramas de casos de uso los actores se representan con formas humanas, mientras que los roles o tareas son representadas por óvalos; se utilizan flechas para determinar las tareas correspondientes a cada actor o si estas dependen una sobre la otra. Las tareas pertenecientes al proceso deben de estar dentro de un rectángulo definido como la frontera del sistema (Genero Bocco , et al., 2014).

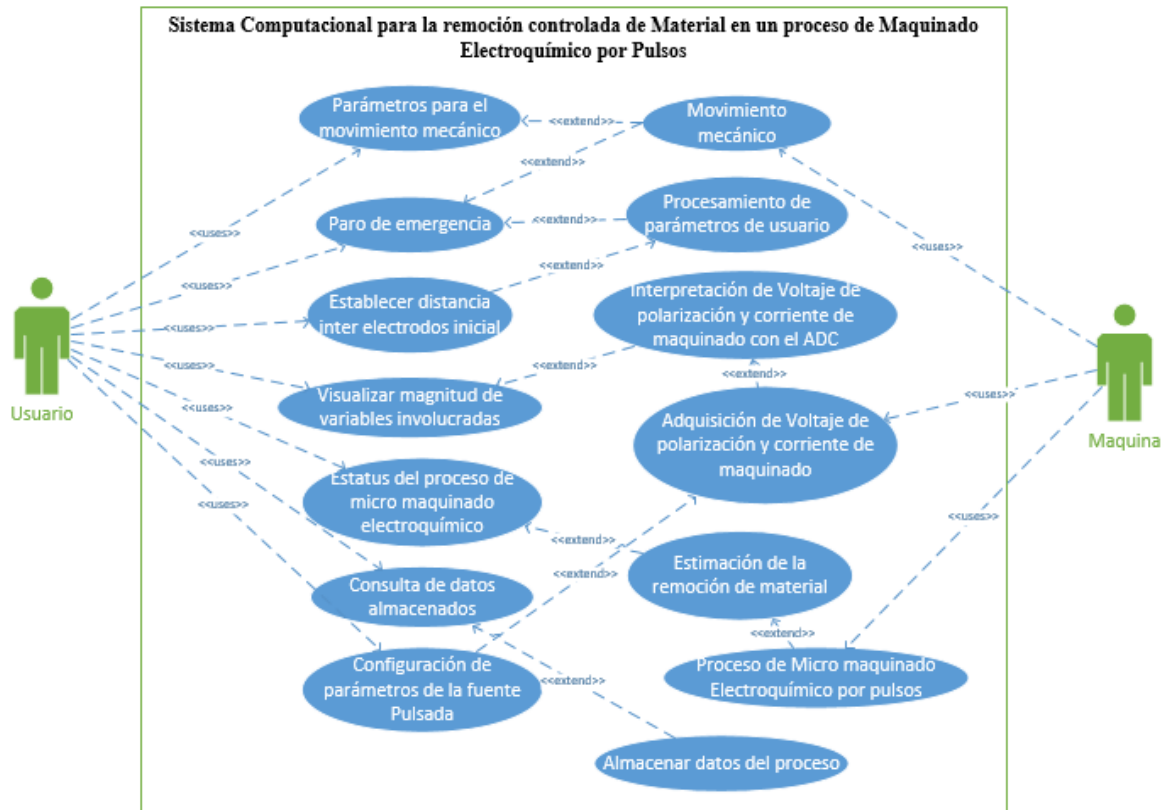


Figura 5.2.4.3 Diagrama del sistema de casos de uso del sistema cómputo

En la figura 5.3.2.3 se muestra el diagrama de casos de usos de sistema, en donde se puede apreciar que cuenta con dos actores, teniendo al usuario que opera el sistema y el hardware involucrado, que tiene tareas en específico, el cual compone la parte física del sistema total, dicho usuario se nombró “Sistema”, que tiene los roles del movimiento mecánico que está relacionado de forma directa con los parámetros proporcionados por el actor “Usuario”, otro de los roles que desempeña es la parte física de adquisición de las magnitudes del voltaje de polarización y corriente de Maquinado y estas son consultadas por el usuario. Mientras que el usuario puede realizar paros de emergencia, realizar la consulta de los datos almacenados en el sistema, de igual forma conocer la distancia entre los electrodos mientras es ejecutado el proceso de maquinado.

5.3.1.4 Diagrama de Distribución

El diagrama de distribución permite conocer la dimensión del sistema a realizar, de igual forma es posible identificar las partes que compondrá el sistema, así mismo es posible modelar las partes que integran cada módulo (S. Pressman, 2012).

Cuando se diseña un sistema es conveniente separarlo en secciones; esto con la finalidad de conocer las partes físicas que compondrán el hardware de prototipo y con ello poder diferenciarlas de las partes que contendrá el software, de manera tal que es posible localizar las relaciones que tiene uno sobre el otro, por lo que es posible identificar de forma secuencial el desarrollo de los procesos, para así evitar repetitividad, redundancia y atrasos en el desarrollo de sistema (Patt N. & Patel J., 2004).

Para el diseño del diagrama de distribución se realiza utilizando cubos, los cuales tienen la finalidad de representar las secciones que componen al sistema de cómputo, estos se conectan mediante el uso de una flecha punteada hacia las secciones donde tienen interacción o dependencia y las partes no tangibles del proceso se representan mediante un folder y dentro la su función específica que se realiza (Genero Bocco , et al., 2014).

En la Figura 5.3.2.4, se muestra el diagrama de distribución del sistema de cómputo, en donde se muestran las partes hardware y software que componen el sistema, así mismo las relaciones que tienen y las secciones que lo componen.

La representación de las partes lógicas del sistema es simbolizada con un folder, mientras que la representación de las partes físicas se realizan utilizando un cubo, este a su vez está compuesto por subsecciones, que son representadas con un rectángulo; como lo es el caso del sistema mecánico, que está formado por los motores a pasos y un sistema de ejes coordenados. Así mismo la sección de adquisición de datos, la cual está compuesta por los sensores para adquirir las variables involucradas en el proceso y el convertidor de analógico a digital; mientras que en la sección Proceso de Micro PECEM, se compone por el electrodo, la fuente pulsada y el sistema de bombeo y filtrado. La sección de Base de almacenamiento de los datos es considerada como parte física del sistema debido a que el almacenamiento de los datos se realiza en medios tangibles como discos duros o memorias.

Las secciones del sistema de cómputo son unidas mediante una línea punteada con una flecha, la cual determina si es recepción o envío de la información, mientras que las etiquetas <<send >> se utilizan para el envío de datos de forma automática, <<import>> es utilizada para definir que requiere de información de un bloque en específico para que este funcione, <<call> es utilizada para realizar las peticiones de la información de manera

bidireccional como lo es el caso almacenamiento de los datos y consulta de ello (Genero Bocco , et al., 2014)s.

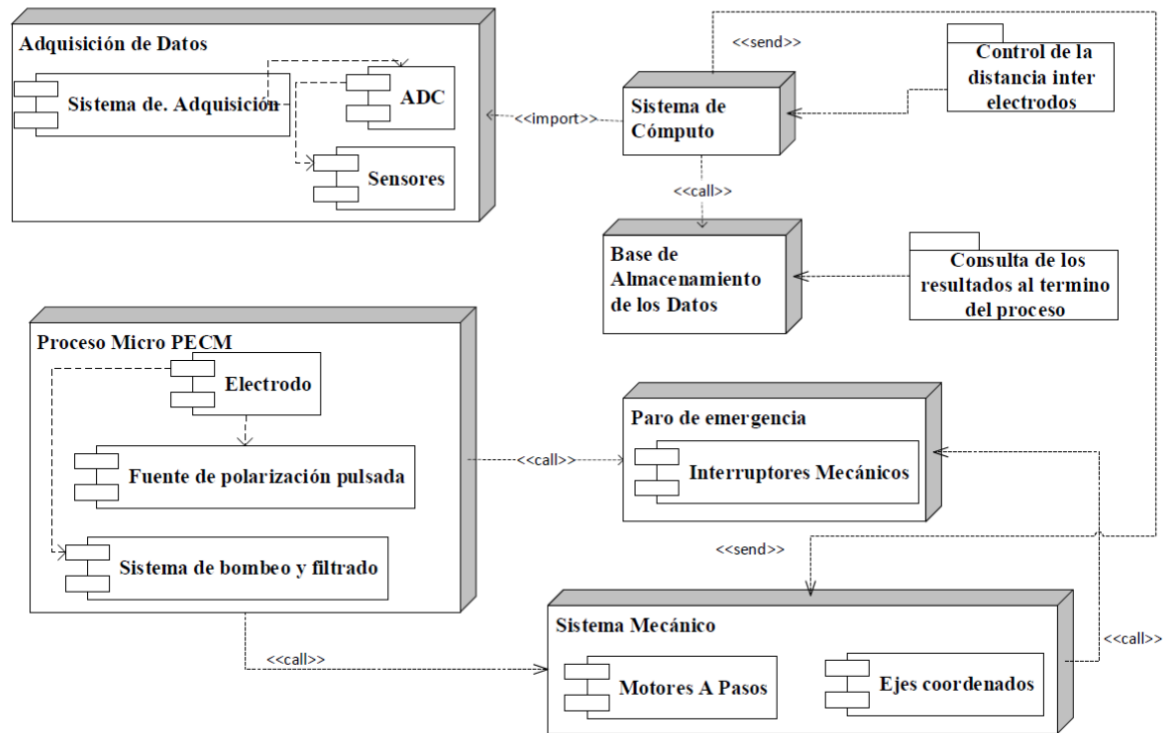


Figura 5.2.4.4 Diagrama de Distribución de los componentes del sistema de Cómputo.

5.3.1.5 Diagrama de secuencia

El diagrama de secuencia es el resultado de los diagramas anteriores, donde se usan los actores del diagrama de casos de usos, la secuencia del diagrama de flujo, las secciones del diagrama de distribución, con el fin de observar detalladamente el flujo de la información y los procesos involucrados (Genero Bocco , et al., 2014) (S. Pressman, 2012).

El diagrama de secuencias es de gran utilidad para el programador ya que permite identificar de manera gráfica la relación que tienen las sesiones de códigos entre sí, con ello diseñar funciones que retornen un valor en específico para evitar la redundancia en la declaración de variables, generando un código sin duplicidad de los datos y creando operaciones de eficiencia.

Para denotar el inicio y fin en el diagrama de secuencia, se denotan con círculos de color negro, mientras que para representar el tiempo de vida de cada actor es representado con un rectángulo de color gris y las flechas interconectan cada una de las funciones realizadas en el proceso; donde las flechas que en su señalización rellena de color negro, tienen la función de brindar una respuesta a una petición realizada, por otro lado las flechas que no cuentan con un relleno de color negro, tienen la función de realizar ejecución de instrucciones sin retorno de valores. Las flechas con una línea continua son ordenes e instrucciones que son ejecutadas al mismo tiempo y retornan un valor a ese mismo proceso generando una retroalimentación, mientras que el uso de un bucle simboliza el tiempo de ejecución del sistema de cómputo y cada uno de los rectángulos representa la sección a ejecutar.

El diagrama de secuencia del sistema de cómputo se presenta en la Figura 5.3.2.5, en donde se integra al usuario, la parte lógica del sistema de cómputo, el sistema mecánico, el proceso de PECM, adquisición y almacenamiento de las variables involucradas en el proceso. Al inicio del proceso el usuario se encarga de ingresar los parámetros necesarios, los cuales son interpretados y procesados por la parte lógica del sistema, para que se genere la secuencia de movimiento para el sistema mecánico y posicionar la herramienta de trabajo a un punto inicial. Después el proceso de maquinado electroquímico es puesto en funcionamiento, donde de forma automática se obtiene la corriente RMS de referencia para generar el efecto de control y sistema de cómputo inicia un ciclo de ejecución para comandar los movimientos del sistema mecánico, controlando de manera primordial la distancia inter-electrodos para mantener la remoción constante de material, durante todo el proceso se almacenan los datos: corriente RMS de maquinado, duración del proceso, hora y fecha en que se realizó en proceso de maquinado electroquímico por pulsos.

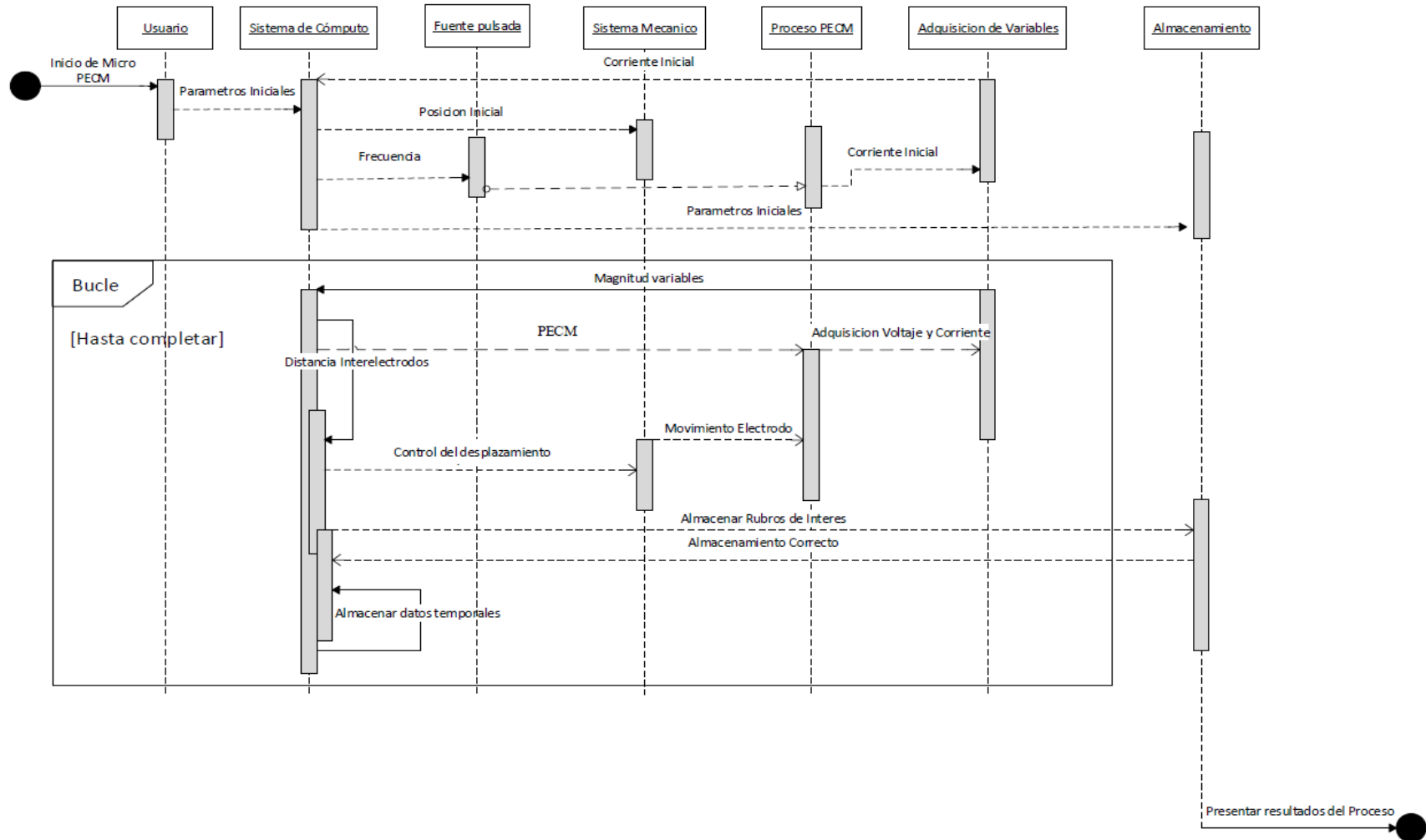


Figura 5.2.4.5 Diagrama de Secuencia del proceso de maquinado electroquímico por pulsos.

5.4 Caracterización del proceso de maquinado electroquímico por pulsos

5.4.1 Fase 1

El desarrollo de las etapas anteriores permitió realizar la caracterización del Proceso de maquinado electroquímico, con el fin de conocer la proporción de mejora en la disminución del efecto de sobre corte al trabajar con una polarización en CD, en comparación con una fuente pulsada, donde se modificaron los parámetros de frecuencia de 10 a 50 kHz y ciclo de trabajo del 25 y 50 %, con un voltaje pulsado de 5V y un gap de 480 μm . El proceso de maquinado electroquímico realizado con una fuente de polarización de CD presenta un efecto que se denomina sobre corte, el cual consiste en un maquinado de diámetro mayor en comparación con las dimensiones del electrodo. El proceso de maquinado electroquímico genera el negativo de la forma del electrodo de polarización, pero en la realidad el maquinado presenta un borde redondeado en las esquinas de la pieza de trabajo. Lo anterior es ejemplificado en la Figura 5.4.1.

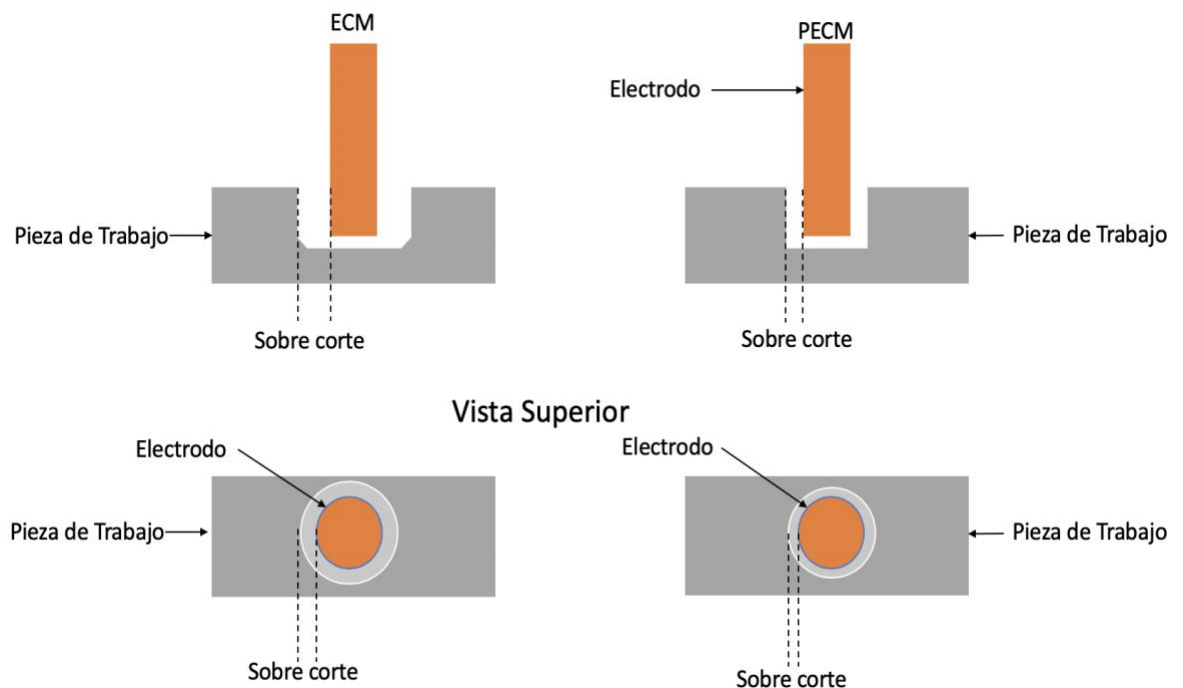


Figura 5.4.1 Ejemplificación del efecto de sobre corte en ECM y PECM

De acuerdo con el trabajo de (Martinez Alvarado , et al., 2015) es posible minimizar el efecto de sobre corte. Una técnica es aplicando una fuente de polarización pulsada, sin embargo, no está definido el grado de reducción del efecto y en qué condiciones. De acuerdo con las pruebas realizadas al trabajar a una frecuencia en el orden de los kHz y a un voltaje del orden de las decenas de V, el efecto de sobre corte disminuye. Por lo cual se propone trabajar a una frecuencia de conmutación desde 10 kHz hasta 50 kHz, con dos ciclos de trabajo, de 25 y 50%.

Para establecer la separación entre el cátodo y el ánodo inicial, se realiza la detección de la continuidad eléctrica entre la herramienta de trabajo y la pieza que se quiere maquinar; cuando se detecta la continuidad se establece que ambas piezas tienen contacto físico. A partir de este punto se separan 480 μm los cuales son establecidos por un número definido de pasos en el eje Z, que es donde se ajusta la distancia entre electrodos del sistema mecánico. Para la caracterización, ésta distancia se ajusta de manera manual por el usuario, que mantiene la corriente de maquinado lo más cercano a la corriente inicial medida con un amperímetro. La duración de cada prueba es de 300 segundos (5 minutos).

El material para realizar las pruebas es acero AISI1018, cuya composición química es 0.14 - 0.2 C, 0.6 - 0.9 Mn, Fe balance (% peso) (SUMITEC, 2018). Como electrodo o herramienta de trabajo se utilizó un tubo hueco de cobre, con un diámetro externo de 3mm. Al término del proceso; se realizaron mediciones del diámetro y profundidad del orificio generado, utilizando un calibrador Vernier digital Insize 1112-200.

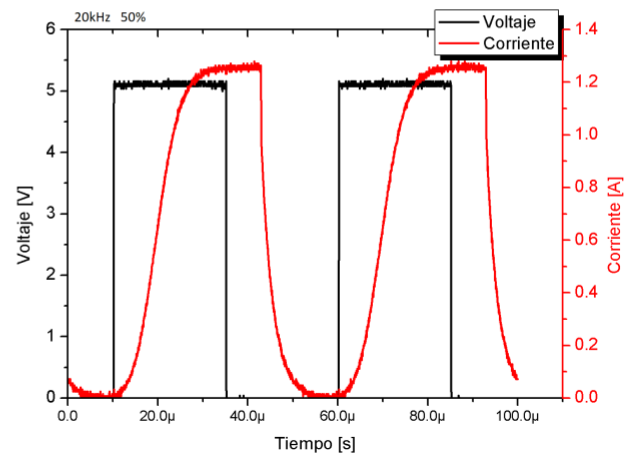
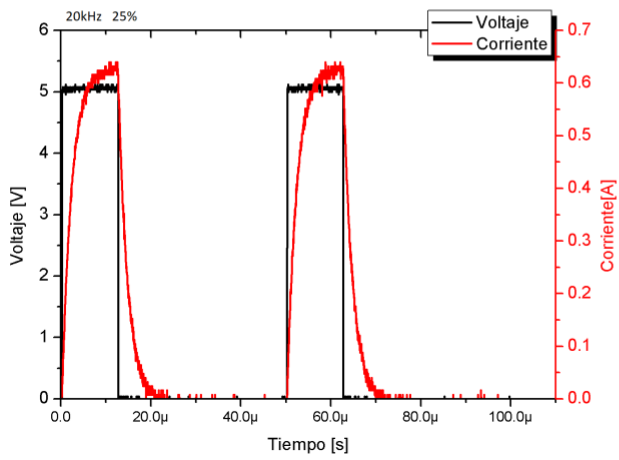
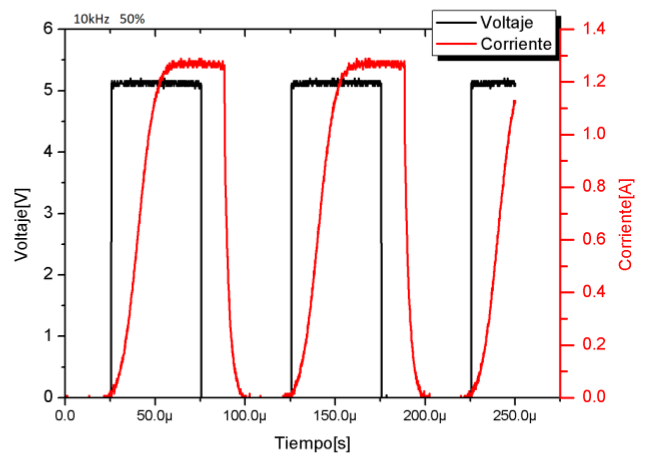
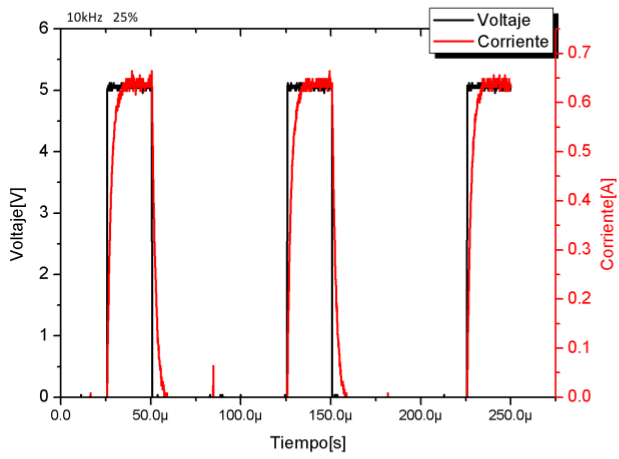
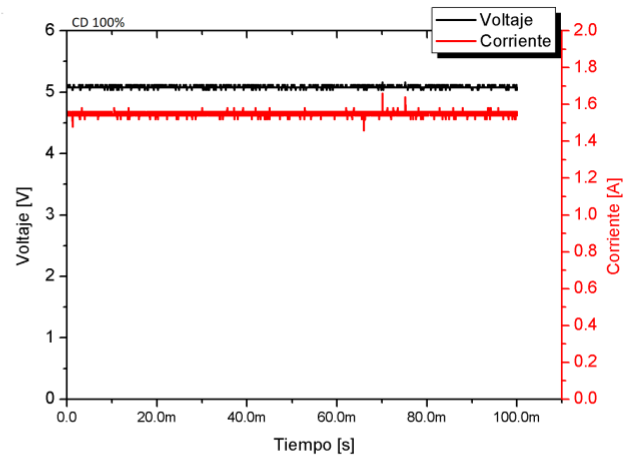
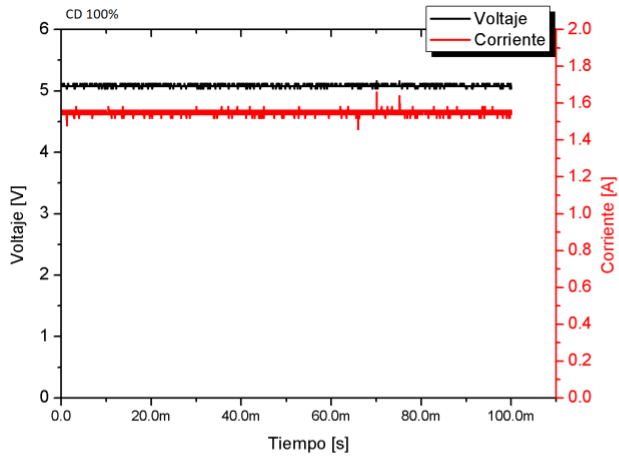
El comportamiento de la corriente de maquinado en el proceso de maquinado se considera una variable de gran importancia, ya que es indispensable para que exista el proceso de disolución anódica. Siendo necesario conocer el comportamiento del voltaje de polarización y la corriente de maquinado, en las diferentes condiciones propuestas en la Tabla 8. El comportamiento de la corriente de maquinado y el voltaje de polarización, en cada una de las pruebas son presentados en la Figura 5.4.2.

En la Tabla 8 se muestran los resultados de las pruebas, se registra la profundidad del maquinado, medición del efecto de sobre corte y la corriente (RMS) de maquinado. En donde se puede observar que el comportamiento de la corriente de maquinado depende de la configuración de la frecuencia de la frecuencia pulsada. Así mismo se puede establecer

que al maquinar a una frecuencia mayor o igual a 40 kHz; se obtienen características similares en la corriente RMS de maquinado, profundidad y sobre corte, esta misma condición puede observarse en la Figura 5.4.2, que se obtiene una forma de onda de la corriente de maquinado al trabajar a 40 y 50 kHz. (Martinez Alvarado , et al., 2015), resalta que la forma de onda de la corriente en el proceso de maquinado electroquímico por pulsos cambia, debido a que el modelo eléctrico del proceso PECM; es representativo a la carga y descarga de un capacitor, donde a mayor frecuencia; la acción de carga y descarga no es efectuada por completo por él capacitor.

Tabla 8. Resultados de la caracterización del proceso de maquinado electroquímico.

Prueba	Ciclo de Trabajo [%]	Profundidad del barreno [μm]	Corriente RMS Inicial de maquinado [mA]	Sobre corte [mm]
CD	No aplica	870	1540	1
10kHz	25	120	332	.82
	50	511	831	.82
20kHz	25	119	328	.75
	50	505	819	.75
30kHz	25	110	278	.68
	50	463	453	.68
40kHz	25	121	282	.63
	50	483	523	.63
50kHz	25	121	283	.63
	50	483	522	.63



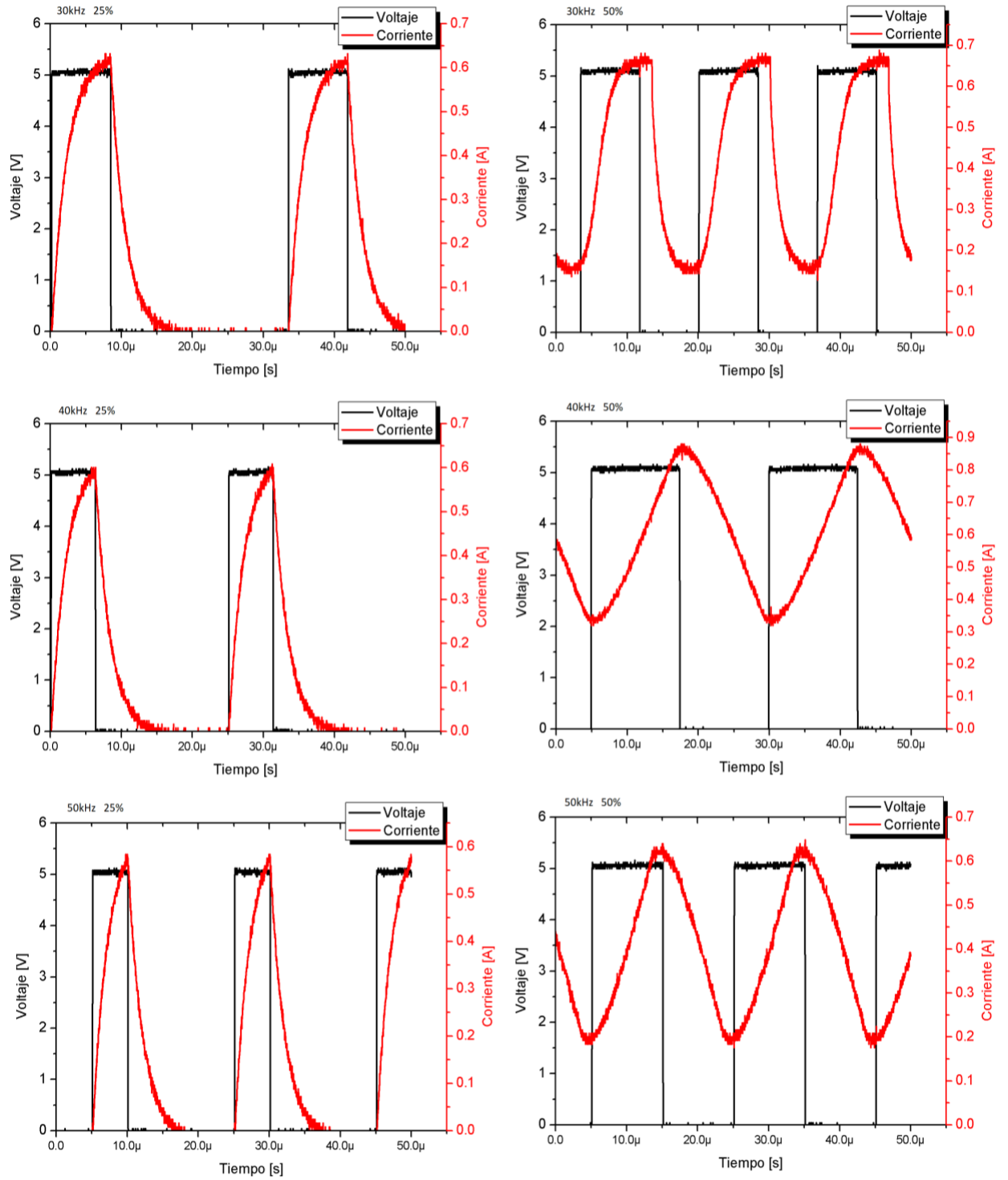


Figura 5.4.2 Formas de onda del comportamiento del voltaje y corriente de maquinado.

Un resultado observable del maquinado electroquímico por pulsos, es que se obtiene el mismo efecto de sobre corte al trabajar al 25 y 50% del ciclo de trabajo, con respecto al mismo intervalo de frecuencia. Sin embargo, la profundidad obtenida es mayor al trabajar con un ciclo de trabajo del 50%.

Al trabajar con una fuente pulsada, la polarización efectiva es menor comparado con una fuente de CD, por lo que el proceso de maquinado genera una perforación de menor dimensión, debido a que la conmutación en encendido genera el desbaste mientras que cuando esta apagado son limpiados los residuos de metal mediante el flujo del electrolito (Martinez Alvarado , et al., 2015).

El comportamiento de la corriente de maquinado RMS se muestra en la Figura 5.3.1.2, observando que su comportamiento se modifica conforme el maquinado avanza, debido a que genera la remoción de material y a medida que el electrodo tiene mayor cercanía a la pieza de trabajo, se requiere mayor tiempo para que la corriente de maquinado disminuya y se pueda realizar el reposicionamiento, el efecto es debido a que empiezan a interactuar las superficies laterales del electrodo teniendo mayor área de exposición, teniendo que esperar hasta que la corriente de maquinado disminuya para efectuar un ajuste. El ajuste del electrodo se realizó después de que la corriente se encuentra fuera de una ventana definida por un cambio de corriente correspondiente al cambio de un paso en el eje del sistema mecánico. Al principio del proceso de maquinado el ajuste de la posición se realizó en tiempos de 22 segundos, a medida que ocurría la disolución de la pieza de trabajo requería mayor tiempo para poder modificar la posición del electrodo; en la Figura 5.3.1.3 se ejemplifica este efecto: a medida que el electrodo se acerca a la pieza de trabajo se focaliza la corriente en el anillo formado por el borde del electrodo y a medida que va generando el maquinado, la superficie del borde se va extendiendo en las caras laterales del electrodo, por consiguiente es requerido mayor tiempo de exposición para poder realizar el ajuste.

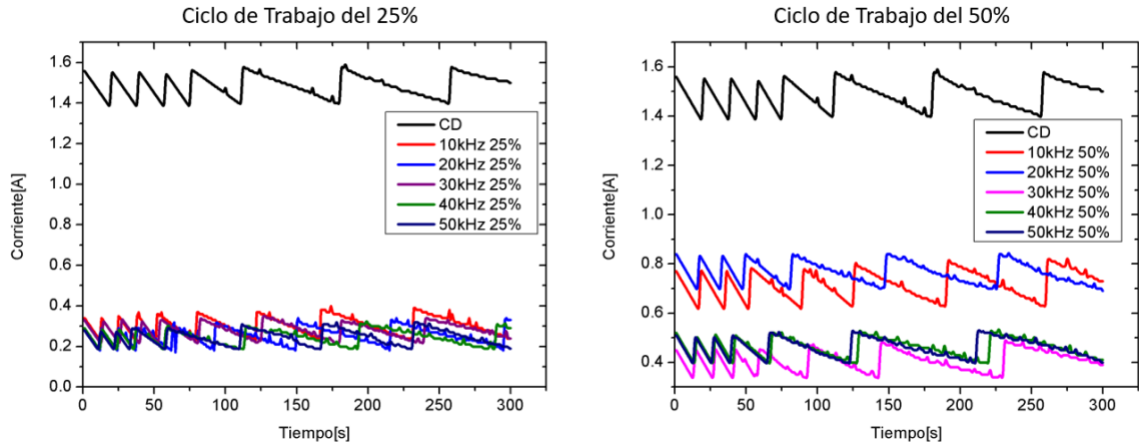


Figura 5.4.1.1 Comportamiento de la corriente de maquinado en ECM y PECM.

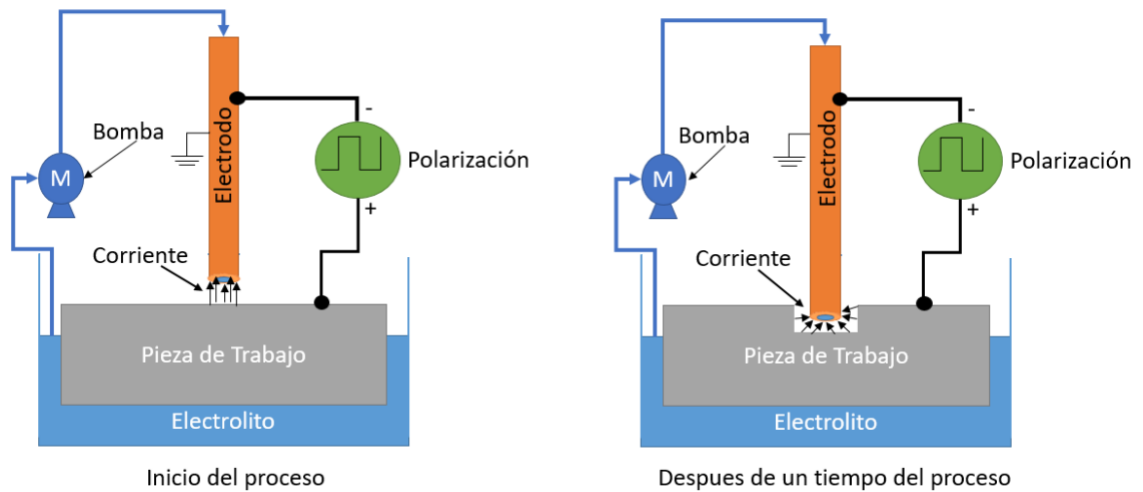


Figura 5.4.1.2 Representación del proceso al inicio del maquinado y después de un tiempo de maquinado.

Al término del maquinado electroquímico se realizaron las mediciones del efecto de sobre corte que se presenta en el proceso. El trabajar a un ciclo de trabajo del 25% se tiene un inconveniente ya que requiere mayor tiempo de maquinado para alcanzar la profundidad que se tiene al trabajar a un ciclo de trabajo del 50%.

En la Figura 5.3.1.4 es posible verificar el efecto que se obtiene al reducirse el efecto de sobre corte, a 10 kHz, el efecto es de 820 μm y va reduciéndose significativamente hasta 40 kHz con 630 μm y se mantiene en ese valor aun cuando la frecuencia aumenta a 50 kHz. Con respecto a la profundidad se observa que depende directamente del ciclo de trabajo, es decir que, a mayor ciclo de trabajo, la remoción de material es mayor.

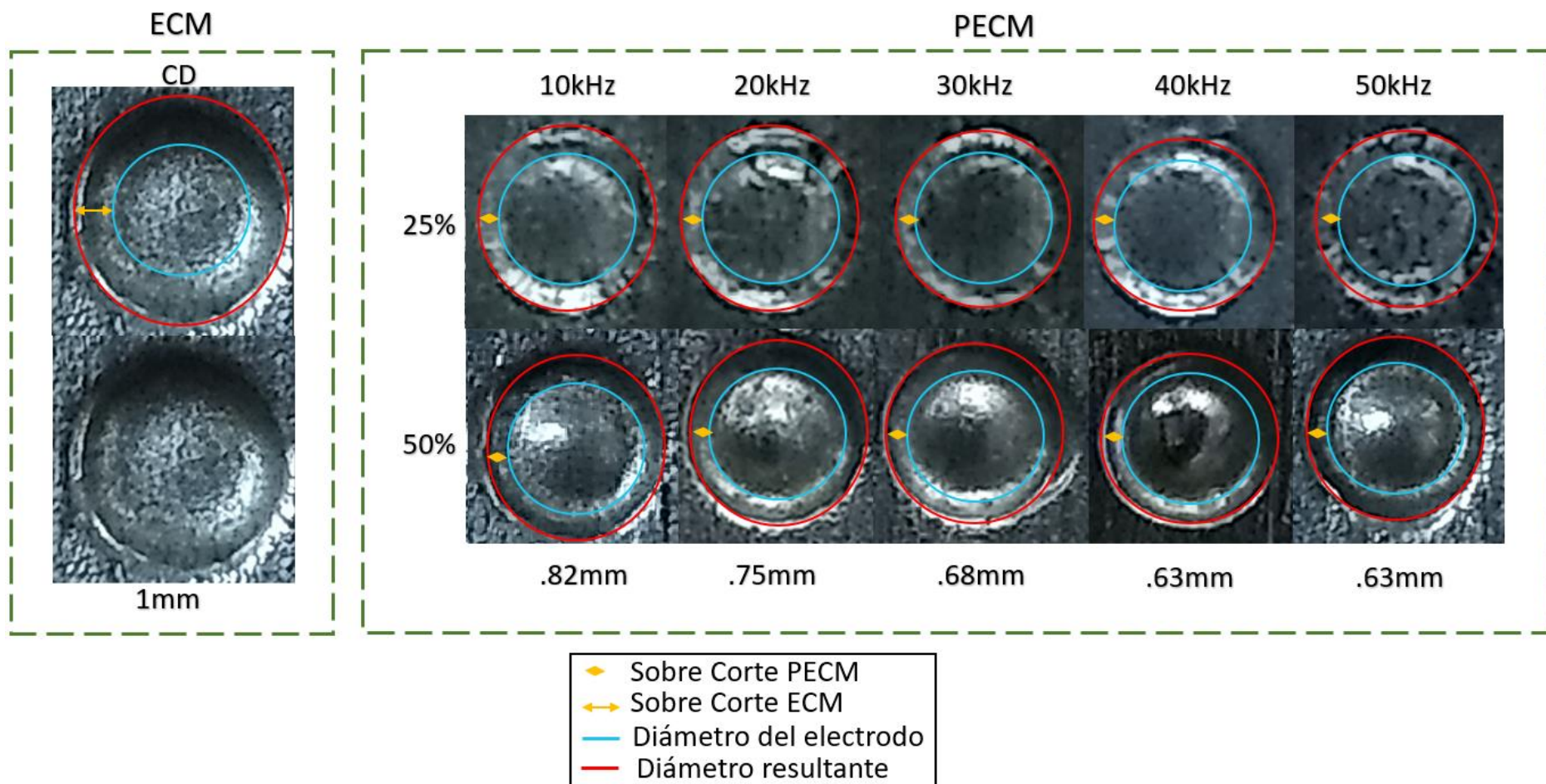


Figura 5.4.1.3 Resultados de PECM comparado con ECM, la flecha representa el efecto de sobre corte.

El proceso de Maquinado Electroquímico (ECM) presenta un efecto de sobre corte de aproximadamente 1 mm mientras que en las pruebas realizadas el PECM permite disminuir dicho efecto un 47%, además se observó que el mínimo efecto de sobre corte se obtiene a partir de los 40 kHz; inclusive si se aumenta la frecuencia de trabajo, en este caso a 50 kHz, aunque ya no se realizaron pruebas a frecuencias mayores. El proceso ECM por pulsos es una viable alternativa si se requiere manufacturar una pieza donde se requiera minimizar el efecto de sobre corte.

5.4.2 Caracterización del proceso de maquinado electroquímico Fase 2

La caracterización Fase 2, se realizó con la finalidad de conocer los resultados que se obtienen al modificar las variables; voltaje de polarización en un intervalo de 5 y 10 V a una distancia inter-electrodos a intervalos de 120 y 240 μm . Cuya finalidad es conocer la configuración óptima del proceso de micro maquinado electroquímico por Pulsos, en la mejora del efecto de sobre corte y efectividad En esta fase se implementó un diseño de experimentos nombrado Anova, que es una metodología que sirve para diseñar las condiciones ideales proceso de Micro Maquinado Electroquímico por Pulsos mediante usando un mínimo número de experimentos (Pulido & Salazar, 2008).

El material utilizado como pieza de trabajo para realizar las pruebas es el acero AISI1018 y como electrodo o herramienta de trabajo hueco de acero inoxidable 300 de tipo 90°, con un diámetro externo de 700 μm . Al término del proceso; se realizaron mediciones del diámetro y profundidad del orificio generado. La medición de la profundidad se realizó con el medidor de alturas Marca FOWLER, modelo 48976, mientras que para la medición del diámetro se utilizó un microscopio digital marca JINGOU, modelo 20X-800X.

En la Tabla 9 se muestra en forma de resumen los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con una polarización de 5 y 10 V; teniendo profundidad del maquinado, medición del efecto de sobre corte del proceso, la corriente (RMS) de maquinado, potencia (RMS), sobre corte y el volumen removido al término del maquinado a una distancia entre los electrodos de 120 μm y 240 μm . De acuerdo (Grover P., 2010) con al utilizar un electrodo cuya dimensión es menor, es posible reducir la separación entre el electrodo y la pieza de trabajo y validar el diseño de experimentos.

De acuerdo con (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008), para realizar un diseño de experimentos, únicamente se requieren realizar 2 pruebas de cada experimento y con ello es posible predecir el comportamiento del sistema a analizar; por tal motivo se efectuaron pruebas en los puntos máximos y mínimos de la experimentación. Teniendo que el proceso de maquinado electroquímico por pulsos, los resultados obtenidos dependen en gran parte de la frecuencia, distancia inter-electrodos y del voltaje de polarización. Con estos datos es posible generar un análisis de varianza para efectuar un estudio y conocer la configuración idónea para obtener un mejor resultado. Por tal motivo se realizó una comparativa del comportamiento del proceso al modificar los parámetros: voltaje de polarización, gap y frecuencia.

Teniendo la relación de la corriente de maquinado, diámetro resultante, potencia de maquinado, energía de maquinado, sobre corte, profundidad resultante al término del maquinado, volumen removido, tasa de remoción de material y efectividad de cada una de las pruebas. En la Figura 5.4.3 se muestra la comparativa del comportamiento de la corriente inicial de maquinado.

La obtención de los valores del volumen removido fue mediante la medición de la profundidad y diámetro resultante en cada una de las pruebas, a partir de dichos parámetros se obtiene el volumen del cilindro resultante. En la ecuación 5.1 se muestra la ecuación utilizada.

$$Volumen = \left(\pi * \left(\frac{Diametro\ resultante}{2} \right)^2 \right) * profundidad\ resultante \quad (5.1)$$

Tabla 9. Resultados de la caracterización fase 2 del proceso de maquinado electroquímico 5V electrodo de 700 μ m.

Polarización	Frecuencia	GAP [μ m]	Profundidad del barreno [μ m]	Corriente RMS Inicial de maquinado [mA]	Potencia de maquinado RMS [W]	Remoción Sobre corte [mm]	Volumen removido [mm ³]	
5V	10kHz	120	740	247	0.89167	1.095	2.131376501	
		240	350	135	0.48735	0.947	0.97881979	
	20kHz	120	703	235	0.84835	1.061	1.945210155	
		240	330	124	0.44764	0.512	0.546434447	
	30kHz	120	670	197	0.71478	0.695	1.207788709	
		240	310	112	0.40432	0.366	0.415278019	
	40kHz	120	650	198	0.71117	0.561	0.973624762	
		240	290	105	0.37905	0.391	0.403501363	
	50kHz	120	650	201	0.74005	0.57	0.986356371	
		240	300	102	0.36822	0.391	0.417415203	
	10V	10kHz	120	1130	425	3.06425	1.712	5.689796622
			240	610	228	1.64388	0.786	1.427257437
		20kHz	120	960	414	2.98494	1.511	4.096818057
			240	580	219	1.57899	0.616	1.102904924
30kHz		120	930	407	2.93447	1.632	4.391519112	
		240	530	202	1.45642	1.044	1.638513795	
40kHz		120	890	406	2.92726	0.874	2.005892782	
		240	500	205	1.47805	0.383	0.687354198	
50kHz		120	890	407	2.93447	0.817	1.87317461	
		240	500	206	1.48526	0.278	0.582579875	

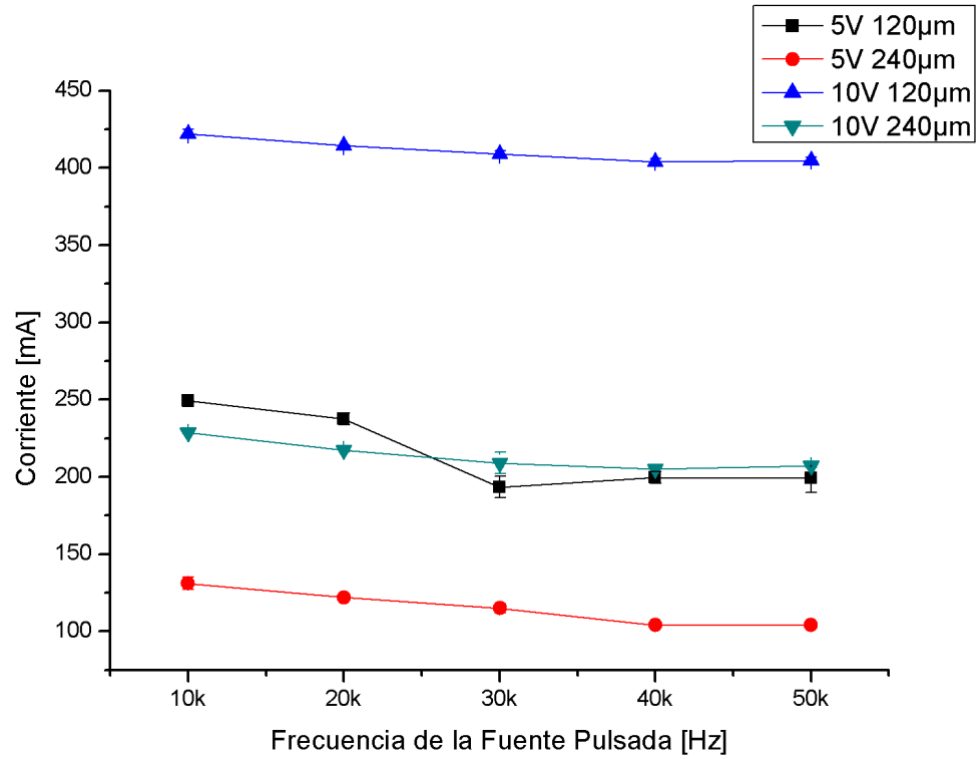


Figura 5.4.3 Comportamiento de la corriente de maquinado en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.

La medición del diámetro obtenido muestra que el trabajar con un gap de 120 µm aumenta en comparación al gap de 240 µm, de igual forma se observa que el trabajar con una polarización de 5 V a un gap de 240 µm y una frecuencia de 40 kHz, el diámetro es el menor en comparación con las otras pruebas debido a que a mayor voltaje de polarización y a menor gap la remoción de material es mayor. En la figura 5.4.4 se muestran los resultados de las mediciones.

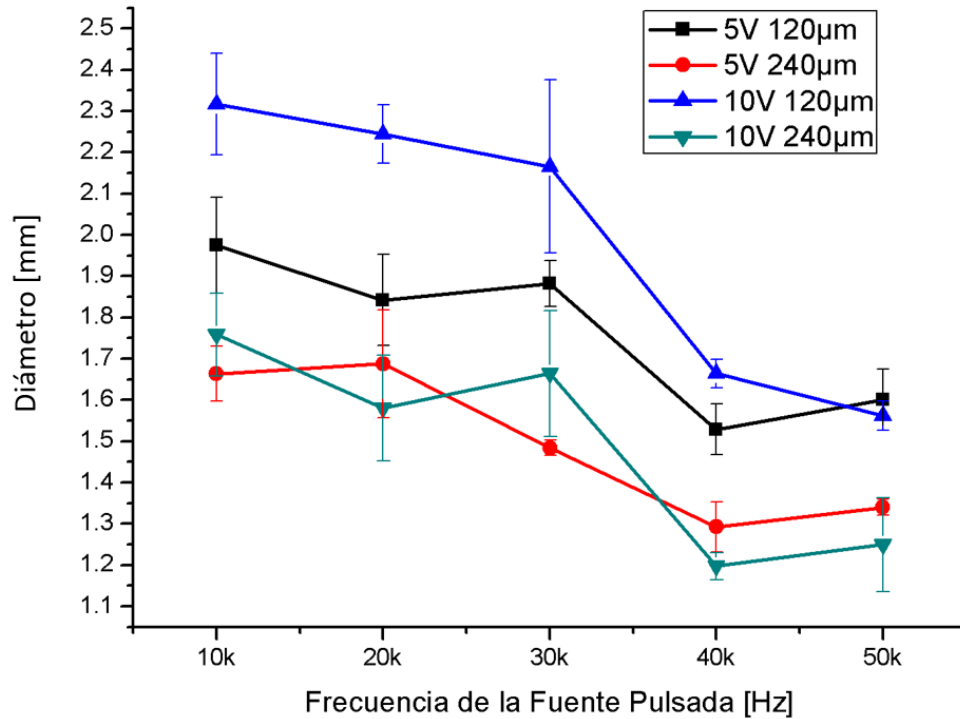


Figura 5.4.4 Diámetro resultante al término del proceso PECMM, en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.

En la Figura 5.4.5 se presenta la gráfica de la potencia utilizada en el proceso PECMM, se observa que la potencia aplicada es mayor cuando se tiene un gap de 120 µm pues la corriente que demanda el proceso a menor distancia también es mayor, mientras que a mayor distancia la impedancia es mayor por lo que la corriente disminuye y la potencia también disminuye. Mientras que en la Figura 5.4.6 se muestra la comparativa de la energía utilizada en el proceso PECMM, donde al utilizar la configuración con una polarización de 5 V y un gap 240 µm el consumo de energía es el menor en comparación con las demás pruebas realizadas. La energía se obtuvo utilizando la ecuación (5.2).

$$Energía = \frac{Potencia}{Tiempo de duración de la prueba} \quad (5.2)$$

$$Tiempo de duración de la prueba = 300 \text{ segundos}$$

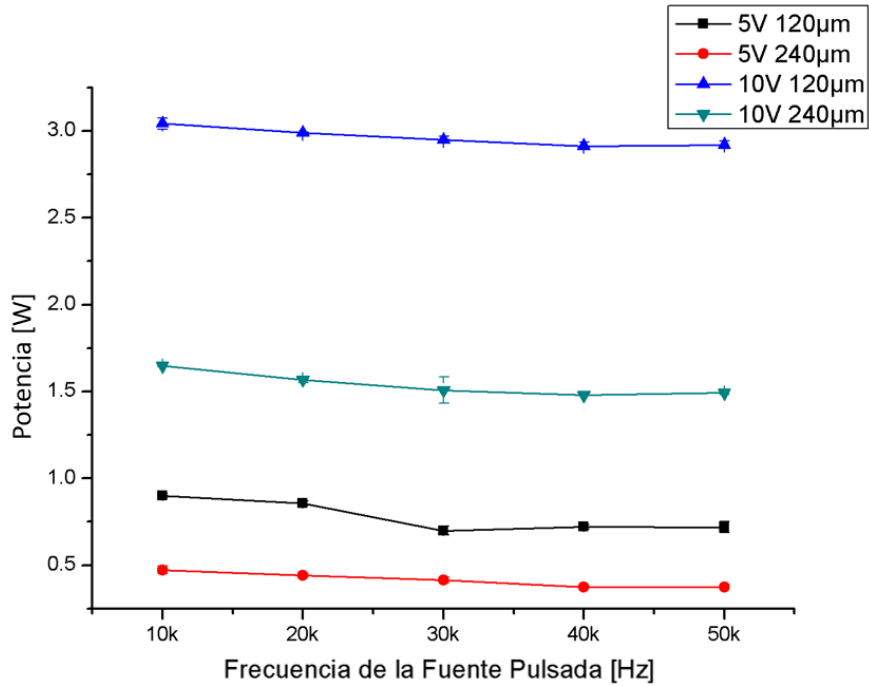


Figura 5.4.5 Potencia demandada en el proceso PECMM a diferentes condiciones en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.

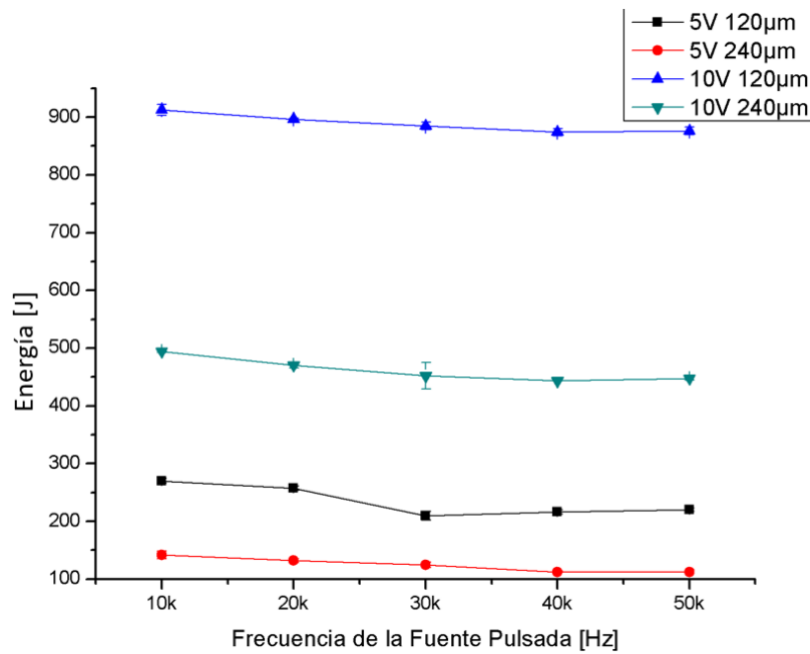


Figura 5.4.6 Energía demandada en el proceso PECMM a diferentes condiciones en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.

En la Figura 5.4.7 se muestra los resultados de la profundidad obtenida en cada una de las pruebas, donde a menor gap y mayor voltaje; la profundidad y el sobre corte es mayor en

comparación con las demás pruebas. En la Figura 5.4.8, en donde es posible observar que para obtener el menor efecto de sobre corte en todas las pruebas es necesario trabajar a una frecuencia de 40 y 50 kHz, las pruebas tuvieron una duración de 300 segundos cada una.

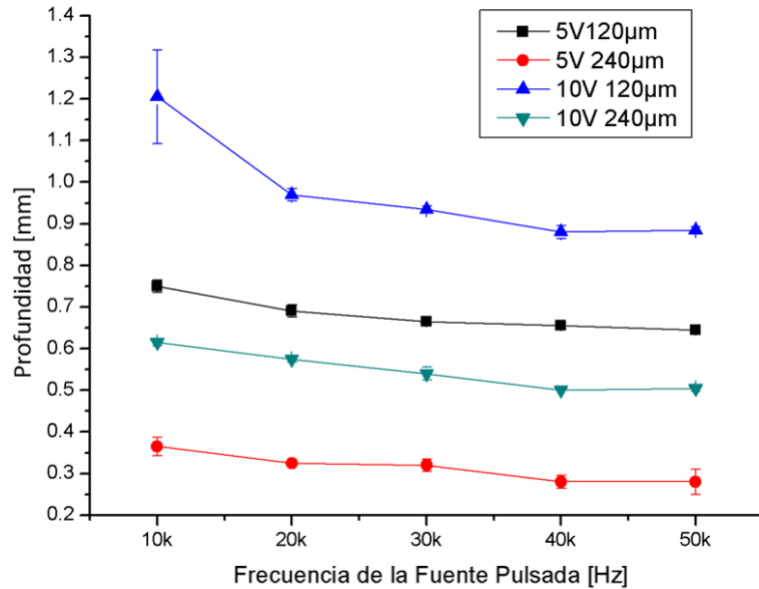


Figura 5.4.7 Profundidad resultante en el proceso PECMM a diferentes condiciones en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.

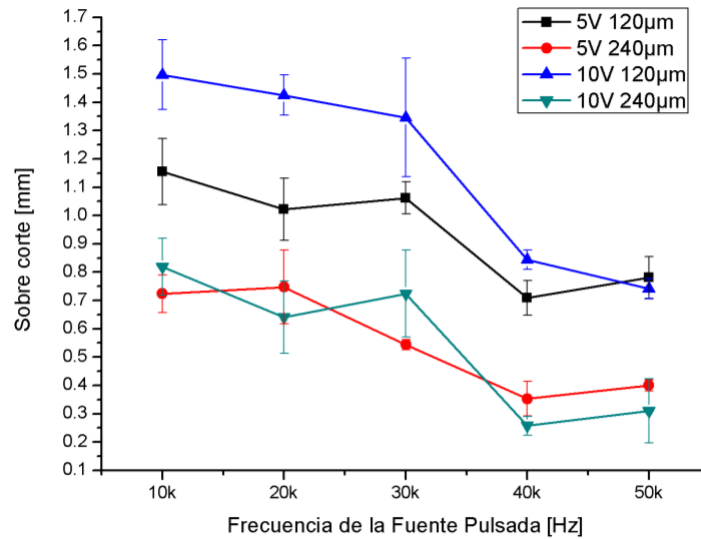


Figura 5.4.8 Sobre corte resultante en el proceso PECMM a diferentes condiciones en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.

El volumen de material removido de la pieza de trabajo al término del proceso PECMM, se muestra en la figura 5.4.9, donde es posible apreciar que a mayor voltaje a un *gap* menor; el volumen de material removido aumenta en comparación con las demás pruebas.

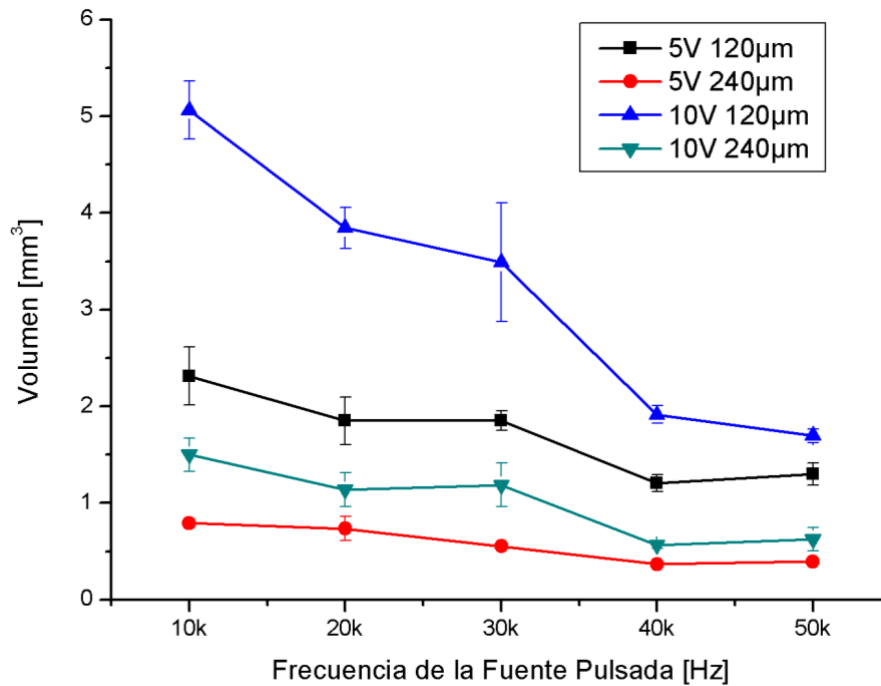


Figura 5.4.9 Volumen resultante en el proceso PECMM a diferentes condiciones en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.

La Tasa de Remoción de Material (MRR de su abreviatura en inglés), de cada una de las pruebas se presenta en la Figura 5.4.10, en donde es posible apreciar que si se requiere aumentar la remoción de material es necesario aumentar el voltaje de polarización, acercar el gap a 120 µm y trabajar con una frecuencia de 10 kHz. Dependiendo de los requerimientos del usuario, si requiere aumentar la remoción de material es necesario aumentar el voltaje de polarización y reducir la distancia inter-electrodos, pero si se requiere disminuir el efecto de sobre corte es necesario disminuir el voltaje de polarización y aumentar la separación de los electrodos. Las líneas verticales en la Figura 5.4.10, representan el margen de repetitividad de la prueba. El calculo del MRR se muestra en la ecuación 5.3.

$$MRR = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo de duración de la prueba}} \quad (5.3)$$

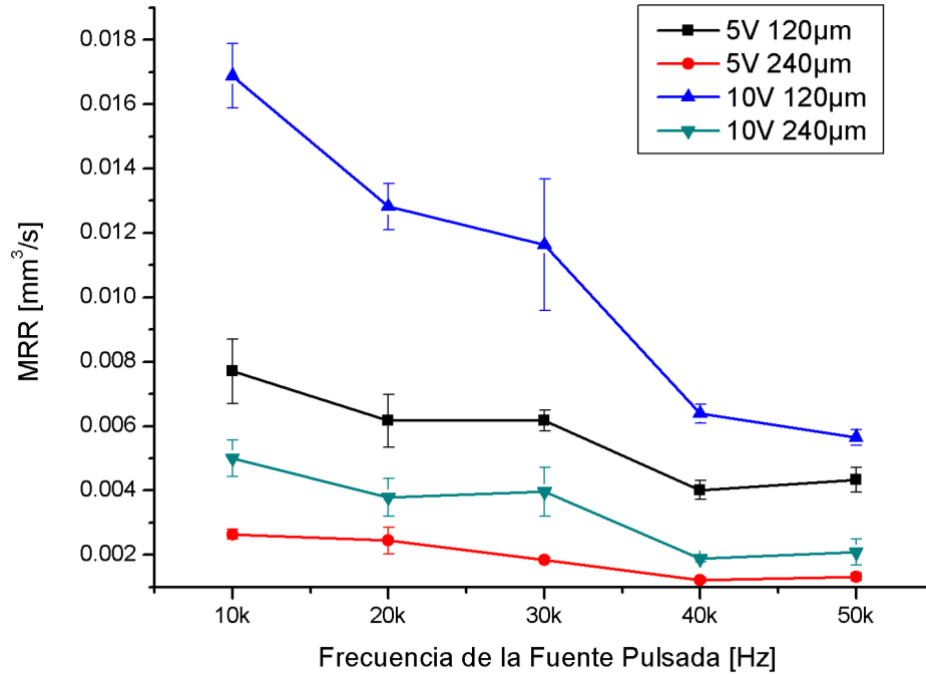


Figura 5.4.10 Tasa de remoción de material del proceso PECMM en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.

Al conocer la tendencia de la configuración de los parámetros de entrada en comparación con los resultados, es posible saber la efectividad del proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos, obtenida mediante la ecuación 5.4; donde se realiza la relación energía requerida para remover un cierto volumen de material, formula obtenida de (W. Nugroho, et al., 2016).

$$\text{Efectividad} = \frac{\text{Energía [J]}}{\text{Volumen [mm}^3\text{]}} \quad (5.4)$$

En la Figura 5.4.11 se muestra la gráfica de efectividad del proceso PECMM a diferentes condiciones en función del voltaje de polarización, distancia inter-electrodos y frecuencia.

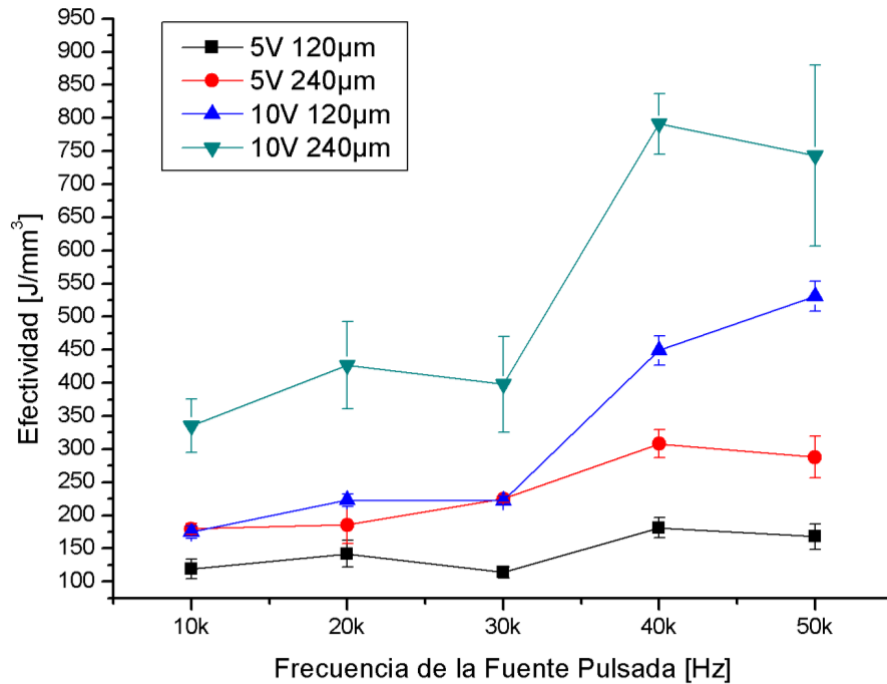
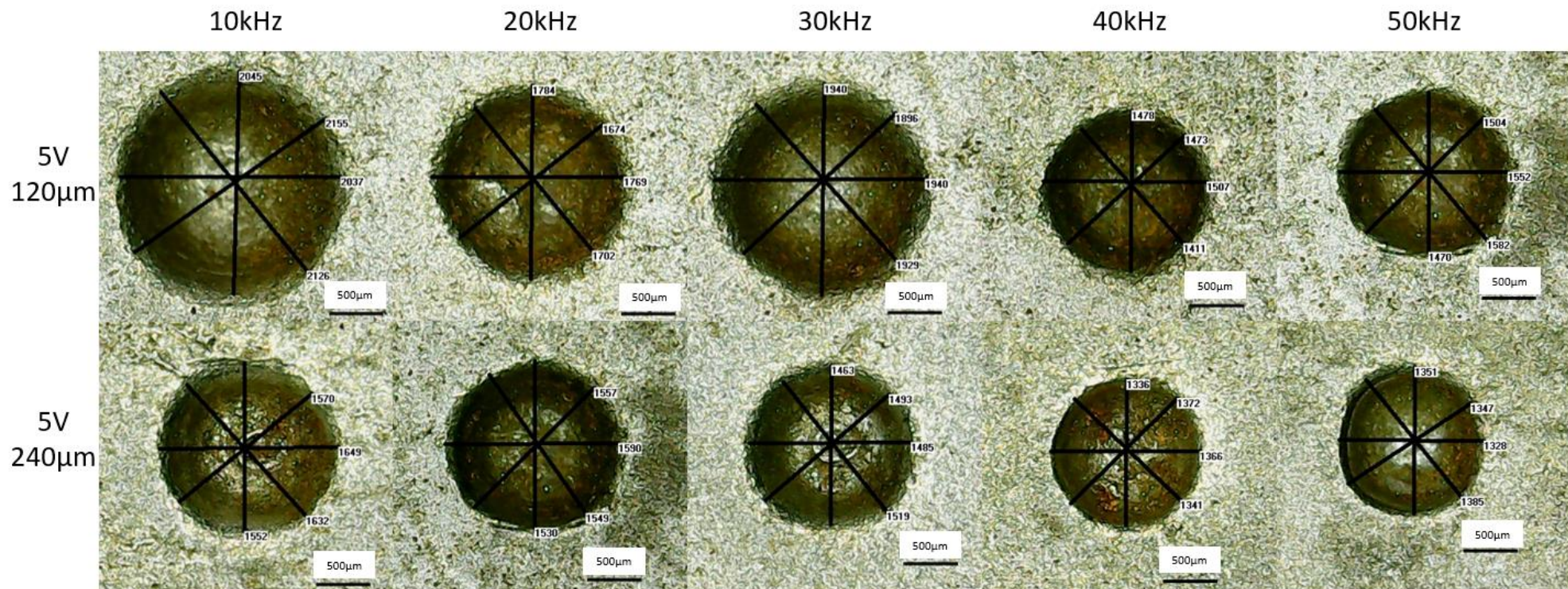


Figura 5.4.11 Efectividad del proceso PECMM en función del voltaje de polarización, gap y frecuencia.

De acuerdo con los resultados de efectividad, resalta que el polarizar con un voltaje de 10V a una distancia inter-electrodos de 240 µm, presentan una mayor efectividad en comparación con las demás pruebas, sin embargo, es posible resaltar que el margen de repetitividad cae dentro de una ventana de parámetros posibles resultantes.

En la Figura 5.4.12, se muestran barrenos resultantes al término del proceso PECMM en las diferentes condiciones de prueba. De acuerdo con los barrenos resultantes, el polarizar a 5 V a una distancia inter-electrodos se obtienen perforaciones con un sobre corte menor y la forma del barreno es semejante al negativo del electrodo, pero al aumentar el voltaje de polarización el efecto de sobre corte aumenta y los barrenos resultantes presentan deformidades en ambas configuraciones de la separación de la distancia inter-electrodos, bajo las condiciones presentadas se optó trabajar con una polarización de 5 V a un gap de 240 µm y una frecuencia de 40kHz.



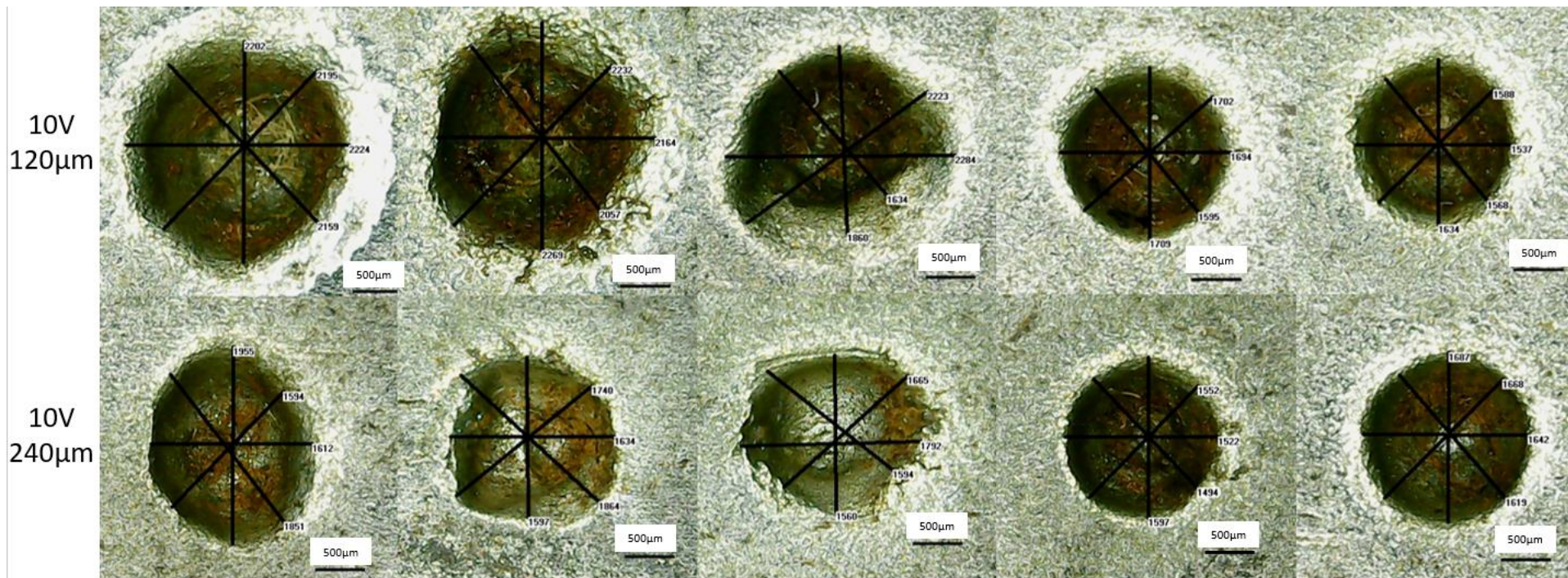


Figura 5.4.12 Barrenos resultantes al término del proceso PECMM a diferentes condiciones variando voltaje de polarización, gap y frecuencia.

5.5 Diseño del sistema de control

En base a los mejores resultados obtenidos de la caracterización 2, se dictaminó el utilizar los parámetros en donde se presenta el menor efecto de sobre corte y las perforaciones resultantes se maquinaron de manera uniforme, lo cual es a un voltaje de 5 V y con una distancia inter-electrodos de 240 μm .

Mediante el monitoreo del comportamiento de la corriente de maquinado, es posible estimar la distancia inter-electrodos dado que es proporcional, de acuerdo con la ecuación 5.5 (Grover P., 2010): (SUMITEC, 2018)

$$g = \frac{A}{I_{RMS} * (R * c)} \quad (5.5)$$

Donde:

g = Distancia inter-electrodos.

A = Área de exposición del electrodo.

I_{RMS} = Corriente RMS de Maquinado.

R = Resistividad del electrolito.

c = (Densidad²*Velocidad de remoción específica) = $(7.87)^2 * (3.0 * 10^{-2})$, constante que depende del material utilizado obtenido de la hoja de datos de la composición del acero AISI 1018 (SUMITEC, 2018) (González, et al., 2015).

Donde la acción de control para mantener la distancia inter-electrodos constante se realizó mediante lógica difusa es realizada por la SBC, que es la encargada de comandar el movimiento en el eje Z; buscando mantener la distancia inter-electrodos dentro de un intervalo similar a la distancia inicial.

En la Figura 5.3.2.2, se muestra el diagrama de flujo representativo del proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos, siendo necesario establecer los parámetros iniciales del proceso, después inicia el proceso de PECMM y se comienza con el monitoreo de la corriente de maquinado para estimar la distancia inter-electrodos y generar una acción de control mediante lógica difusa de acuerdo a la posición en que se encuentre, si durante el proceso se genera una remoción de material, la distancia entre los electrodos aumentará y

la corriente de maquinado disminuye. Tal efecto es monitoreado y el sistema detectará el cambio en la corriente, la acción del control es compensar esa disminución en la corriente moviendo el electrodo hacia la pieza de trabajo con lo cual disminuye la distancia entre electrodos hasta que la corriente se incremente y se mantenga en un intervalo determinado por el propio control; de tal manera se pretende que la distancia entre los electrodos se mantenga constante.

Durante el proceso PECMM, es necesario mantener la distancia inter-electrodos en un intervalo cercano a los 240 μm , a fin de obtener remoción de material constante al desplazar el electrodo de forma lineal y generar micro canales cuya profundidad sea la misma, esto es posible controlando la distancia inter-electrodos mediante lógica difusa. Por tal motivo para el diseño de las reglas de inferencia es necesario contar con la experiencia y el conocimiento de la operación del proceso PECMM, ya que son fuentes de información críticas que se requieren para identificar las condiciones óptimas de operación.

El desarrollo del sistema de control tuvo como base al diseño establecido por Mamdani, y el modelo mediante un sistema SISO (single input- single output). De acuerdo con (Diciembre Sanahuja, 2017) el problema al realizarlo mediante series de conjuntos requiere de el doble del recurso computacional y no es posible trabajar con conjuntos de datos discretos, debido a que es necesario definir de forma precisa los márgenes de las series a utilizar. En la Figura 5.5.1. La etapa de entrada contiene 3 funciones de membresía cada uno, mientras que la salida cuenta con tres funciones de membrecía. La entrada al sistema de control es el error de la distancia inter-electrodos, que es establecida a través del monitoreo de la corriente de maquinado, mientras que la salida es generar el movimiento del motor a pasos para mantener una la distancia cercana a los 240 μm . En la Tabla 10 se muestran conjuntos difusos de la entrada o “Error” de la distancia inter-electrodos, donde los parámetros son definidos en base a caracterización y a la resolución del sistema mecánico, mientras que en la Tabla 11; se muestran los conjuntos difusos de la distancia requerida para desplazar el electrodo y mantener al punto de referencia.

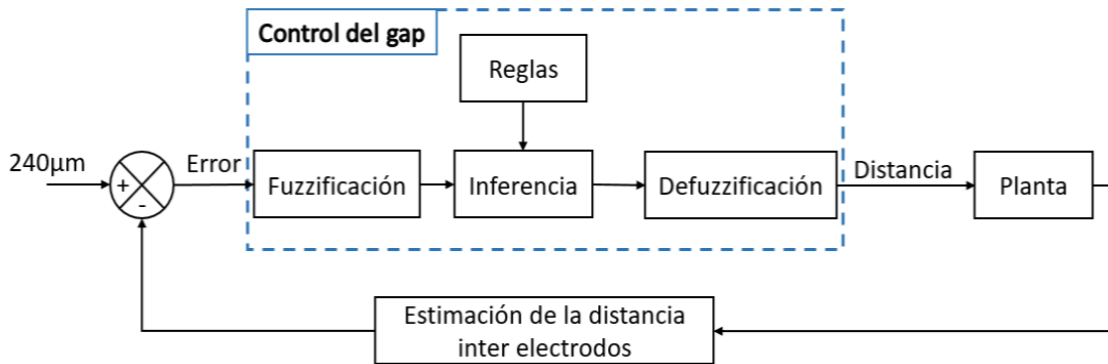


Figura 5.5.1 Modelo SISO del sistema de control para mantener la distancia inter-electrodos.

Tabla 10 Conjuntos Difusos del universo de discurso error.

Variable Lingüística	Tipo de Función	Ponderación
Negativo	μ_L	(-60, 60)
Nulo	μ_T	(-60, 0, 60)
Positivo	μ_L	(-60, 60)

Tabla 11 Conjuntos Difusos del universo de discurso Distancia.

Variable Lingüística	Tipo de Función	Ponderación
Acércate	μ_L	(120, 480)
Estable	μ_T	(120, 240, 480)
Aléjate	μ_L	(120, 480)

En la Tabla 6., se muestran las reglas de inferencia generadas. Las reglas de inferencia relacionan los conjuntos difusos de entrada y salida para definir el comportamiento del sistema.

Los conjuntos difusos de entrada utilizados para el control del proceso PECMM, son representados en 3 intervalos, teniendo representaciones de una saturación abierta como μ_L y representaciones triangulares como μ_T , como se muestra en la Tabla 10. Mientras que en la Tabla 11 se presentan los conjuntos difusos de la salida pertenecientes al universo

de discurso “Distancia”, definidos en tres intervalos contando con formas μ_L y μ_T . De acuerdo con Bonifacio Martín del Río y Alfredo Sanz Molina (Martín del Brío & Sanz Molina, 2012), el trabajar con conjuntos difusos con formas trapezoidales y triangulares; requiere de operaciones simples y la respuesta a la acción de control se realiza en un menor tiempo que al utilizar conjuntos difusos con formas de tipo gaussianas y sigmoides.

Tabla 12 Reglas de inferencia.

Número de Regla	Reglas de inferencia
1	Si (Error es negativo) entonces (Distancia es Aléjate)
2	Si (Error es nulo) entonces (Distancia es Estable)
3	Si (Error es positivo) entonces (Distancia es Acércate)

La defusificación es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. La etapa de inferencia obtiene una conclusión a partir de la información de entrada en términos difusos. Mientras que la salida difusa es obtenida por la etapa de inferencia, de acuerdo con ello se genera un conjunto borroso, donde el dato de salida del sistema de control debe ser un número real. El método de defusificación utilizado es el Centroide, el cual transforma la salida difusa en un número real, ubicando la coordenada zeta (z) del centro de gravedad del conjunto difuso resultante a la salida. En la ecuación 5.5 se presenta el método de defusificación por centroide, este método es el mas utilizado debido a su robustez y precisión para los sistemas de control (Diciembre Sanahuja, 2017).

$$centroide = \frac{\int z\mu_Y(z)dz}{\int \mu_Y(z)dz} \quad (5.5)$$

Donde:

z es el universo de discurso

μ_Y es la función de pertenencia al conjunto de salida

La validación del sistema de control propuesto se realizó mediante tres pruebas, las cuales se presentan mediante el diagrama de la Figura 5.5.2. La primera se realizó aplicando el proceso en una pieza de prueba con el eje del movimiento del electrodo paralelo a la superficie de la pieza de trabajo, como se muestra en la Figura 5.5.2 (a), la segunda prueba se realizó inclinando la pieza de trabajo un ángulo de 3.5° , Figura 5.5.2 (b). Para la tercera prueba se maquinaron canales a lo largo de la superficie de la pieza de trabajo simulando un desnivel sobre la superficie, posteriormente se realizó un maquinado mediante PECMM en dirección perpendicular, en la Figura 5.5.2 (c), se muestra que al finalizar las pruebas se realizó la medición de la profundidad. Si el sistema de control funciona de manera adecuada, la profundidad del maquinado a lo largo del canal generado mediante el PECMM debe ser de la misma dimensión.

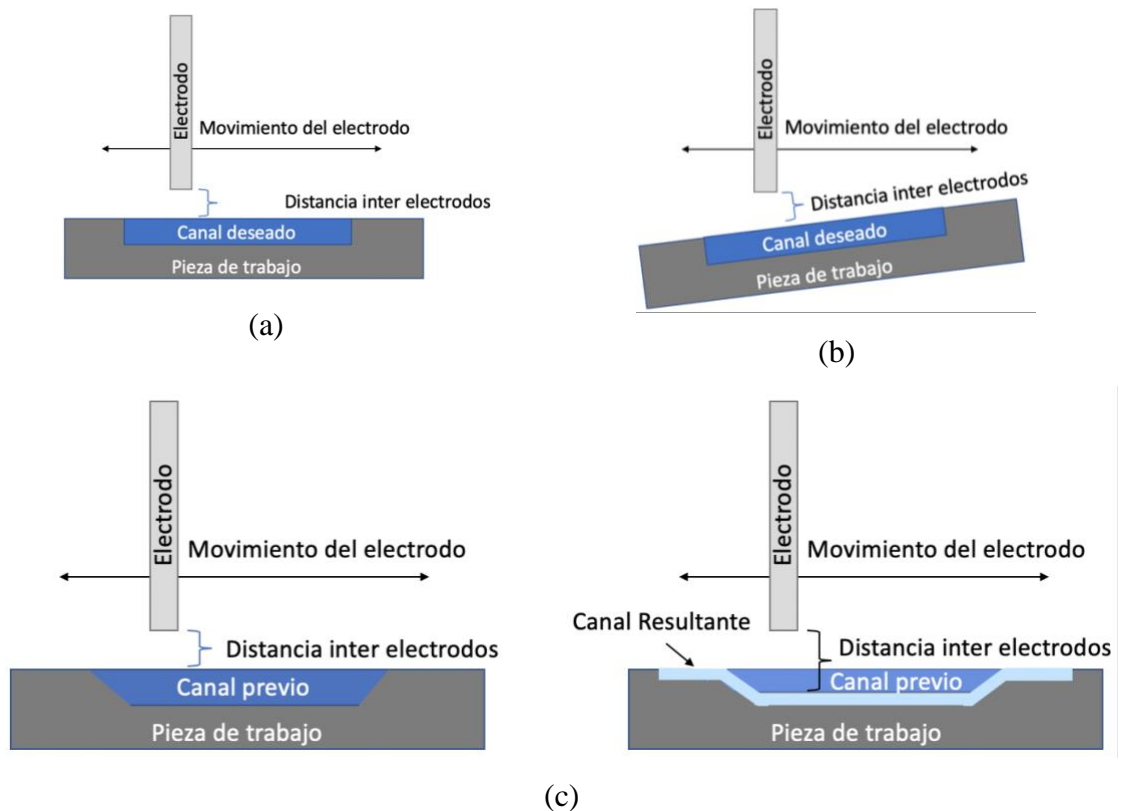


Figura 5.5.2 Pruebas propuestas para realizar la validación del sistema de control, (a) sin perturbaciones, (b) con la superficie de maquinado inclinada y (c) sobre una superficie con un canal como perturbación al sistema.

En la Tabla 13, se muestra a manera de resumen la configuración inicial y la profundidad alcanzada al término cada una de las pruebas. La medición de la profundidad de los canales resultantes se realizó al término del maquinado utilizando un medidor de alturas digital marca FLOWLER, modelo 48976.

La configuración que se realiza al principio del proceso PECMM, es establecer el punto de referencia de la corriente de maquinado equivalente a $240\mu\text{m}$, después el sistema genera una ventana que corresponde al cambio de un paso en sentido positivo y negativo del eje Z, esto dependiente de corriente de maquinado. Dado que el ajuste de altura se realiza mediante motores a pasos, este proceso permite establecer la resolución correspondiente al sistema mecánico.

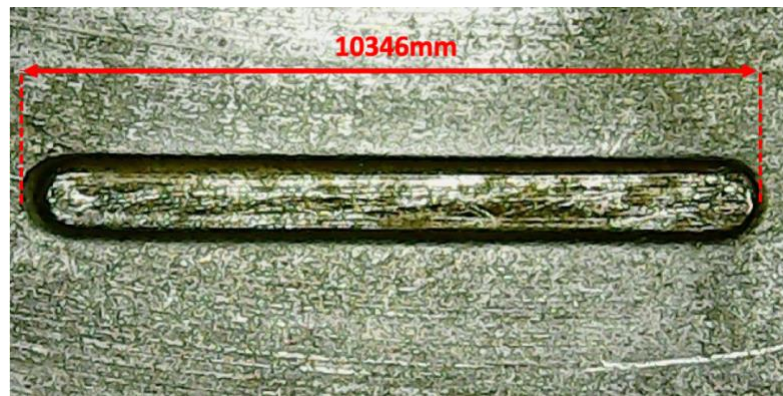
Tabla 13. Configuración inicial y mediciones de longitud y profundidad.

Prueba	Duración del proceso PECMM [min]	Longitud preestablecida en el sistema [mm]	Longitud resultante del proceso PECMM [mm]	Profundidad del canal resultante [μm]
1	15	1000	1134	200
2	15	1000	1136	190
3	30	2000	2136	150
4	25	2000	2135.6	120
5	40	2000	2132	300
6	40	2000	2131.5	300
7	33	2000	2130	250

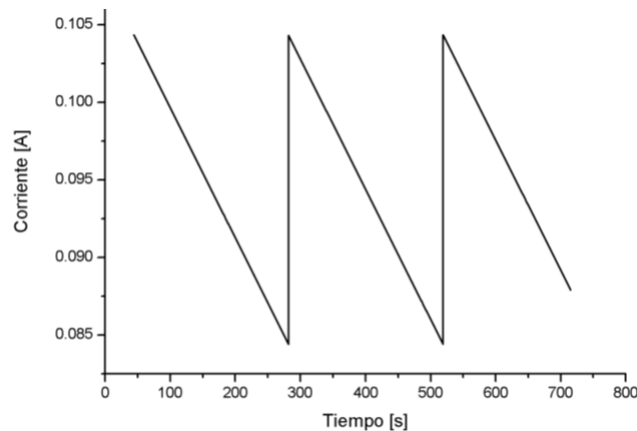
Posteriormente, el control efectúa la acción de mantener constante la distancia inter-electrodos y en el momento que detecta que se puede realizar el ajuste de la distancia inter-electrodos realiza el reposicionamiento del electrodo, para mantener constante la separación entre la pieza y la herramienta de trabajo a $240\mu\text{m}$.

Para maquinar el canal, el electrodo hace un recorrido constantemente sobre la longitud total del canal, este movimiento se repite hasta obtener la profundidad deseada del maquinado, en la Figura 5.5.3(a) se muestra el resultado del maquinado de la prueba 1 y

en la Figura 5.5.3(b) se muestra el comportamiento de la corriente de maquinado, la cual presenta un decremento debido al avance en la remoción de material, con lo que la distancia inter-electrodos aumenta; las condiciones en las que se realizó ésta prueba son las que se consideran las más apegadas a la idealidad. La corriente de maquinado muestra una forma de onda triangular, que corresponde a los ajustes de profundidad con base en la resolución del sistema mecánico que realiza el controlador, de acuerdo a la ecuación 5.5. Se puede observar que la distancia es inversamente proporcional a la corriente RMS de maquinado, por lo cual, en términos de la distancia, la gráfica representa un aumento del gap, dado que se ha removido material de la pieza metálica, hasta un punto que el controlador determina que requiere un reajuste de la distancia, lo que provoca acercar el electrodo a la pieza de trabajo.



(a)



(b)

Figura 5.5.3 (a) Resultados de maquinado sin perturbación y (b) comportamiento de la corriente de maquinado, se considera sin perturbaciones.

En la Figura 5.5.4 (a), se muestran los resultados de la prueba 2, al someter el proceso de PECMM a una perturbación que consiste en una inclinación de 3.5° , siendo un punto intermedio de la perturbación máxima soportada por el sistema de control, mientras que la Figura 5.5.4 (b) muestra el comportamiento de la corriente de maquinado, donde se observa la acción de control, cuando la corriente aumenta o disminuye dentro de los parámetros soportados por el sistema mecánico, se realizan los ajuste para mantener a una distancia inter-electrodos constante. En la forma de onda de la corriente es posible apreciar que la acción de control obliga al proceso a reajustar la posición del electrodo para mantener constante la distancia inter-electrodos dentro de la ventana correspondiente a la resolución del sistema mecánico, buscando la estabilidad del proceso.

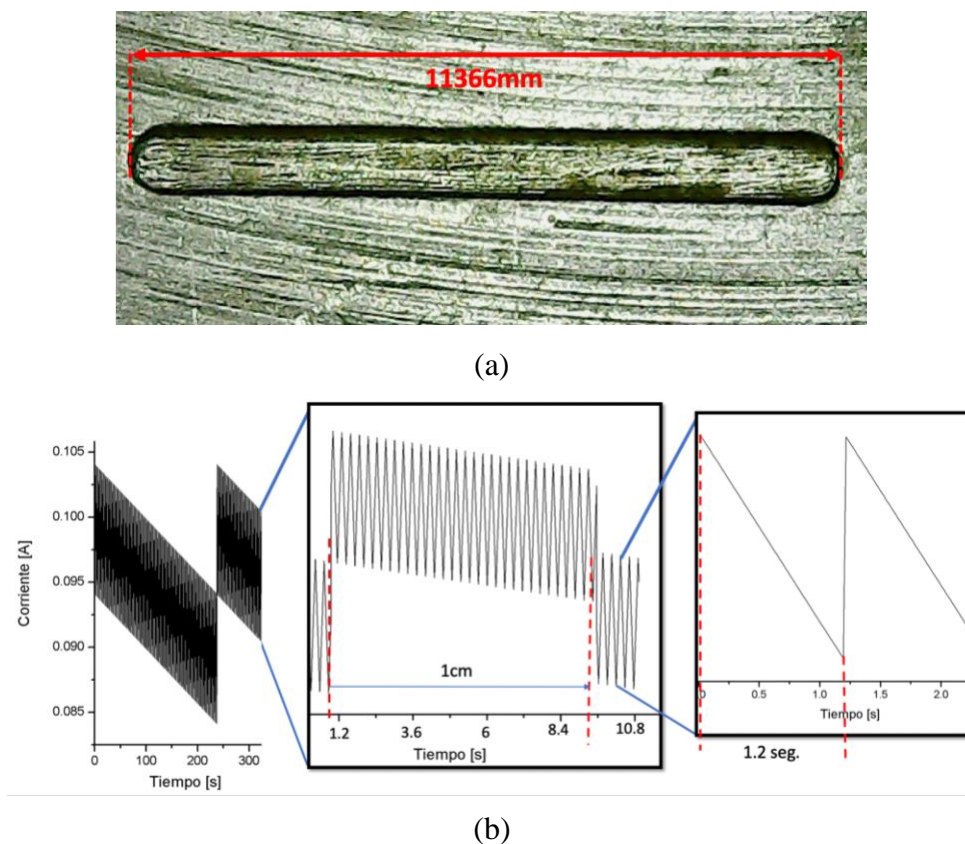


Figura 5.5.4 (a) Resultados de maquinado con 3.5° de inclinación y (b) forma de onda de la corriente de maquinado, con una inclinación de 3.5° .

En la Figura 5.5.5(a), se muestra el resultado del sistema de control, sometido a la prueba 3, donde la profundidad de la perturbación 1(p1) es de $330\mu\text{m}$, mientras que profundidad de la perturbación 2 (p2) es de $270\mu\text{m}$. En la Figura 5.5.5(b), se muestra la representación de los puntos en donde se realizaron las mediciones de profundidad de cada uno de los

canales resultantes. Los resultados de las mediciones de profundidad se muestran en la Tabla 14 y en la Figura 5.5.6, se muestra el comportamiento de la corriente de maquinado.

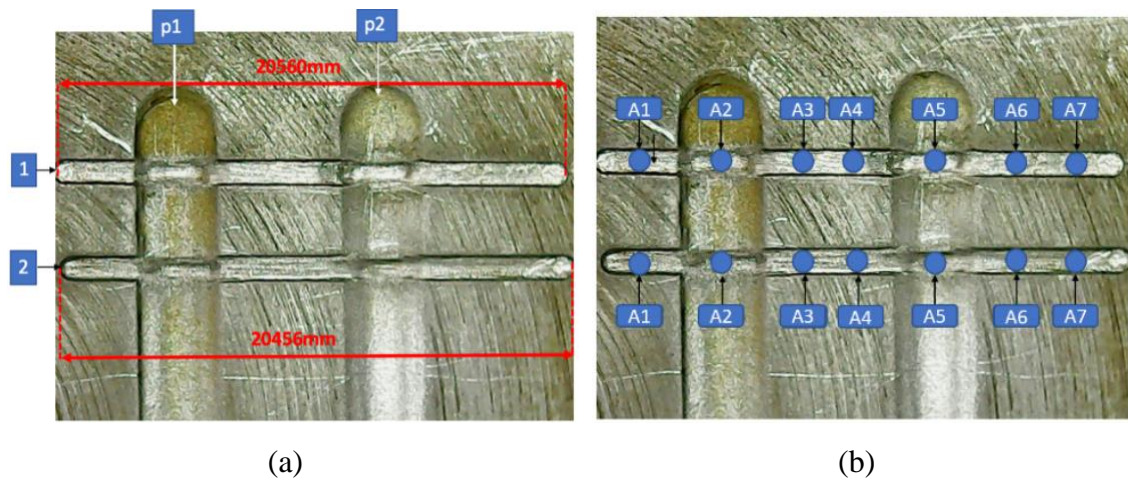


Figura 5.5.5 (a) Resultado del sistema de control sujeto a perturbaciones, (b) Ubicación de puntos donde se realizaron las mediciones.

Tabla 14. Medición de la profundidad resultante en los canales 1 y 2.

Canal	Profundidad [μm]							Media [μm]
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	
1	150	470	160	150	480	150	150	150 \pm 2.9
2	120	380	120	120	390	120	120	118.6 \pm 2.4

El comportamiento de la corriente de maquinado de la prueba 3 se muestra en la Figura 5.5.6, es posible apreciar en la forma de onda de la corriente de maquinado que la acción de control obliga al proceso a reajustar la posición del electrodo para mantener constante la distancia inter-electrodos dentro de la ventana correspondiente a la resolución del sistema mecánico, buscando la estabilidad del proceso. La forma de la corriente muestra picos máximos y mínimos que corresponde a los puntos de frontera donde se encuentra el borde del canal previamente realizado. Al realizar el recorrido y el maquinado mediante el PECMM, el sistema encuentra las discontinuidades del borde del canal, por lo que el gap aumenta o disminuye drásticamente (cuando el electrodo entra al canal de la perturbación) lo que genera que la corriente disminuya o aumente abruptamente.

Posteriormente el efecto del sistema de control es reajustar la distancia para regresar a la magnitud de corriente en que se encontraba antes de presentarse la perturbación.

Se presenta solo la forma de onda de la corriente de maquinado para la prueba 3, dado que las formas de onda de las demás pruebas son similares debido a que solo fue repetición de dicha prueba. En la Figura 5.5.6 se observan líneas punteadas rojas, las cuales representan el recorrido del electrodo de acuerdo con la longitud establecida del largo del canal.

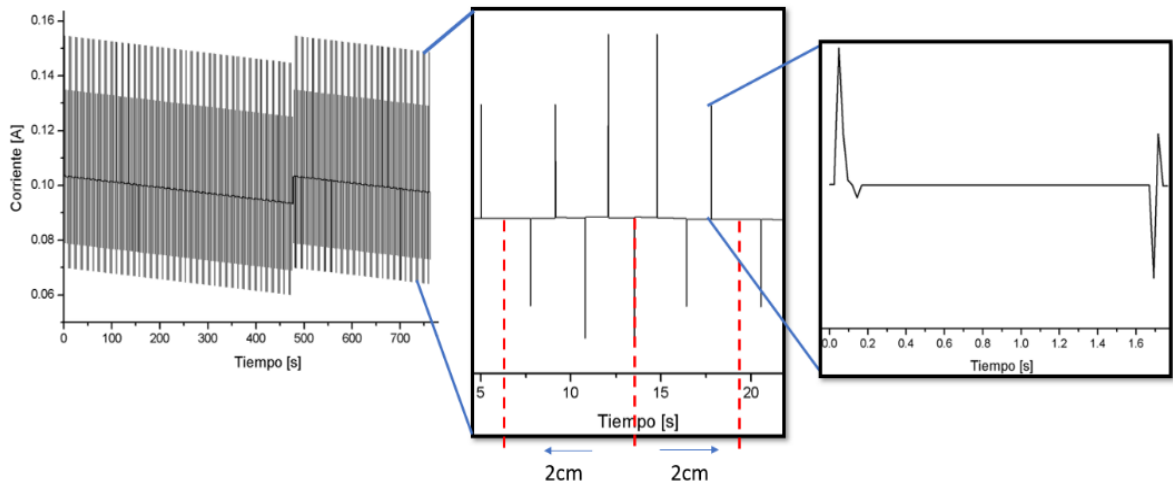


Figura 5.5.6 Comportamiento de la corriente de maquinado de la prueba 3 y 4.

En la Figura 5.5.7(a), se muestran los resultados del sistema de control, al ser sometido a una perturbación, la cual tiene una profundidad discontinua, presentando una profundidad lineal vertical creciente, donde la profundidad de la perturbación 3(p3) es un canal con incremento en la profundidad. En la Figura 5.5.7(b), se muestra la representación de los puntos en donde se realizaron las mediciones de profundidad de cada uno de los canales resultantes. Los resultados de las mediciones de profundidad y la media de cada una de las pruebas se muestran en la Tabla 15.

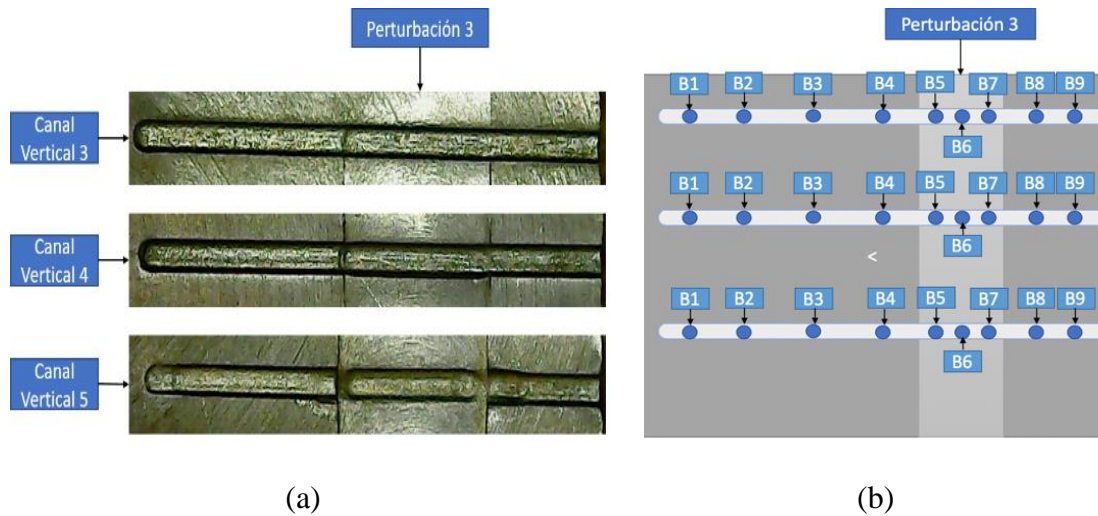


Figura 5.5.7 (a) Resultados del control del proceso PECMM con perturbación de un canal con profundidad incremental y (b) ubicación de los puntos en donde se realizaron las mediciones.

La profundidad de la intersección del canal 3 con la perturbación 3, previamente al maquinado fue de $20\mu\text{m}$, mientras que en la intersección del canal 4 con perturbación 3 la profundidad fue de $160\mu\text{m}$ y la profundidad del canal 5 con la perturbación 5 de $300\mu\text{m}$.

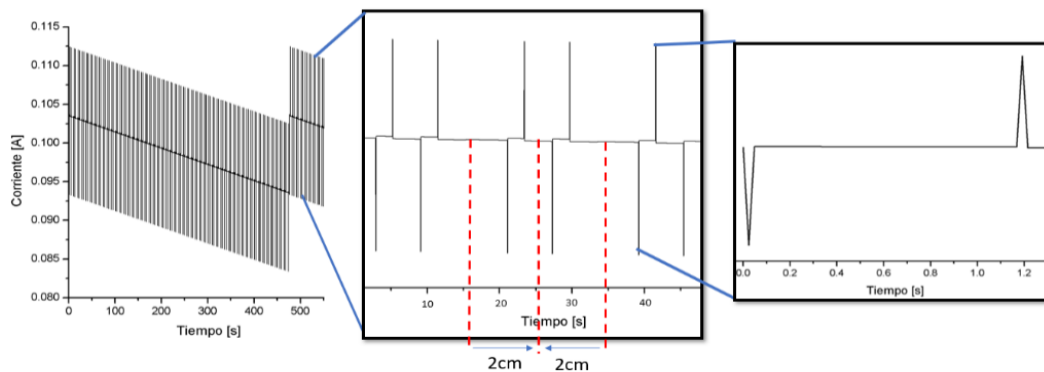
Tabla 15 Medición de la profundidad resultante en los canales 3, 4 y 5.

Canal	Medición de la profundidad resultante de los canales [μm]									Media [μm]
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	
3	310	300	300	300	320	320	320	300	300	301.1 ± 2.5
4	310	300	300	300	470	460	460	300	300	302.2 ± 4.4
5	260	250	250	250	540	540	540	260	250	248.9 ± 7.6

El comportamiento de la corriente de maquinado es similar a las pruebas realizadas en la prueba 3 y 4, es decir, al recorrer el electrodo la longitud del canal que se desea maquinar, en el trayecto encuentra perturbaciones de diferente magnitud; empezando con el canal 3 con una perturbación de una profundidad de $20\mu\text{m}$, mientras que el canal 4 presenta una perturbación con una profundidad de $160\mu\text{m}$ y el canal 5 con una perturbación cuya profundidad de $300\mu\text{m}$. Dichas perturbaciones se ven reflejadas en la forma de corriente y el tiempo entre cada pico de corriente coincide con la distancia recorrida por el electrodo. La acción de control se ve reflejada cuando el electrodo cae dentro del canal de

perturbación, el gap aumenta y la corriente disminuye, el controlador ajusta la distancia hasta que la corriente regresa a la condición de estabilidad (magnitud de corriente de maquinado). En caso opuesto, si el electrodo sale del canal de perturbación, el gap disminuye abruptamente y la corriente aumenta; el controlador ajusta la distancia alejándose de la pieza de trabajo hasta que la corriente regresa a la condición de estabilidad.

En la Figura 5.5.8, se muestra el comportamiento de la corriente de maquinado de los canales 3, 4 y 5. La diferencia entre las figuras es la magnitud de los picos de corriente, y es debido a las diferentes profundidades que se presentan en las perturbaciones. Para el canal 3, el pico de corriente es de 112 mA; para el canal 4 es de 164 mA y para el canal 5 es de 1185 mA. Donde se puede observar que a medida que aumenta la profundidad de la perturbación y la acción de control tiende a responder inclusive a perturbaciones con cambios abruptos, siendo capaz de regresar al valor de referencia inclusive a condiciones radicales. Las líneas punteadas en la Figura 5.5.8, equivalen a la distancia recorrida por el electrodo de acuerdo con la distancia dictaminada de las pruebas que es el recorrido de 2cm equivalente a la distancia del ancho del canal de la perturbación.



(a)

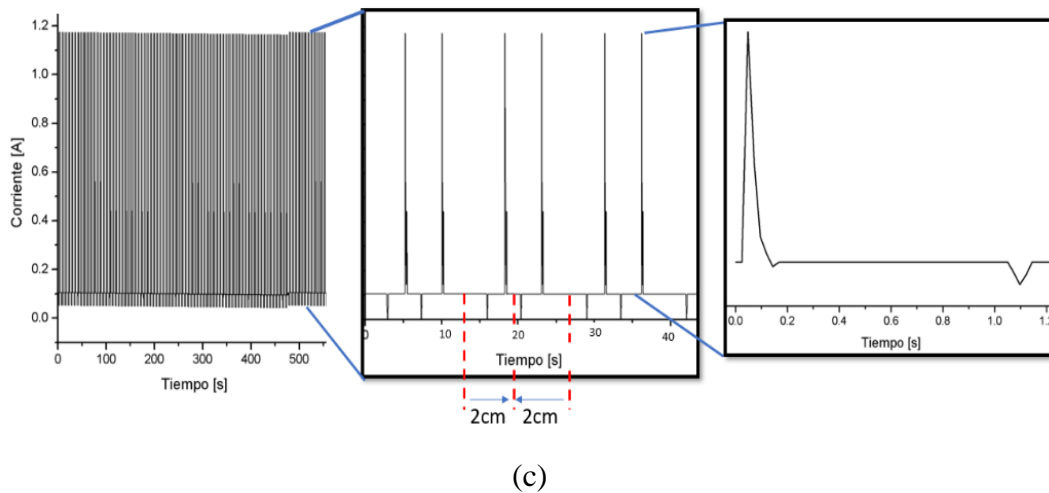
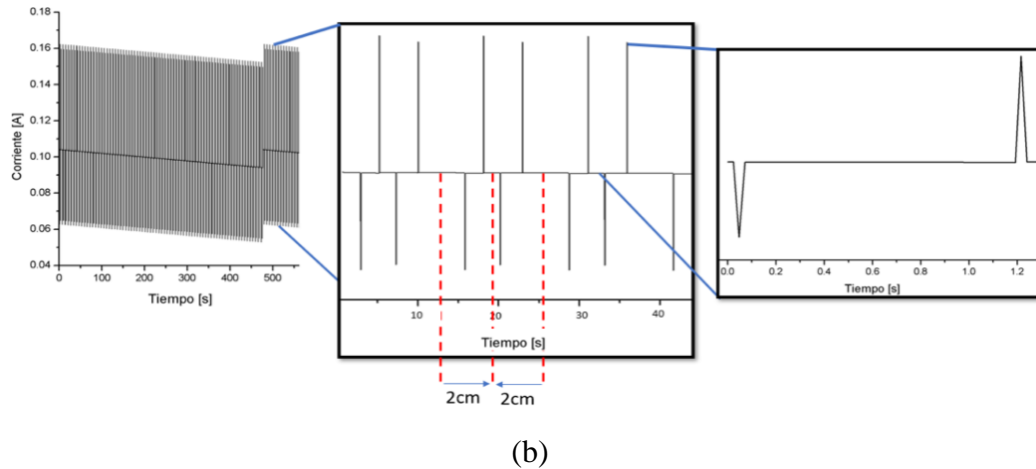


Figura 5.5.8 Comportamiento de la corriente de maquinado; (a) del canal 3, (b) del canal 4 y (c) del canal 5.

5.6 Establecer Profundidad establecida por el usuario

El proceso PECMM presenta un error, el cual consiste en que la profundidad resultante es mayor a lo que el sistema mecánico se desplazó, teniendo como resultado que la remoción de material es mayor a el avance del electrodo. Esto se debe a que al inicio del proceso el área de exposición del electrodo es constante, a medida que el electrodo se acerca a la pieza de trabajo el área de exposición aumenta debido a que conforme el electrodo se acerca a la pieza de trabajo, el área que genera la corriente de maquinado también aumenta pues se establece una corriente entre la cara exterior del electrodo y la pieza de trabajo, en un efecto como de cono ocasionando una mayor remoción de material. Los resultados de

la profundidad en comparación con distancia de avance se muestran en la Figura 5.6.1, apreciando que existe mayor profundidad y la distancia de avance menor, teniendo como resultado el aumento de la distancia inter-electrodos y por consiguiente un error, el cual aumenta a medida que se realizan los ajustes.

En la Figura 5.6.2 se muestra el comportamiento de la corriente de maquinado en cada uno de los ajustes, donde es posible observar que al realizar un acercamiento del electrodo a la pieza de trabajo; es requerido mayor tiempo de exposición, como resultado aumenta la tasa de remoción de material, por consiguiente, se tiene una profundidad mayor a la distancia de avance.

En la Figura 5.6.3 se muestra patrón del cambio de la magnitud del valor de la pendiente de la corriente de maquinado, la cual presenta un comportamiento creciente al graficar el comportamiento de las rectas en 6 ajustes realizados. Una alternativa es generar un ajuste para mantener la magnitud de la pendiente de la corriente de maquinado igual o muy cercana al valor de la pendiente del inicio del proceso, para ello en el momento en que se detecta un cambio, se realiza el ajuste: acercar o alejar el electrodo modificando la corriente de maquinado de referencia y en base a ello se realiza el despeje del área del electrodo en la ecuación 5.5 de la estimación de la distancia inter-electrodos, esta en proporción al comportamiento de la proporción de la pendiente de la corriente de maquinado. El cálculo de la pendiente de cada una de las rectas se muestra en la ecuación 5.6.

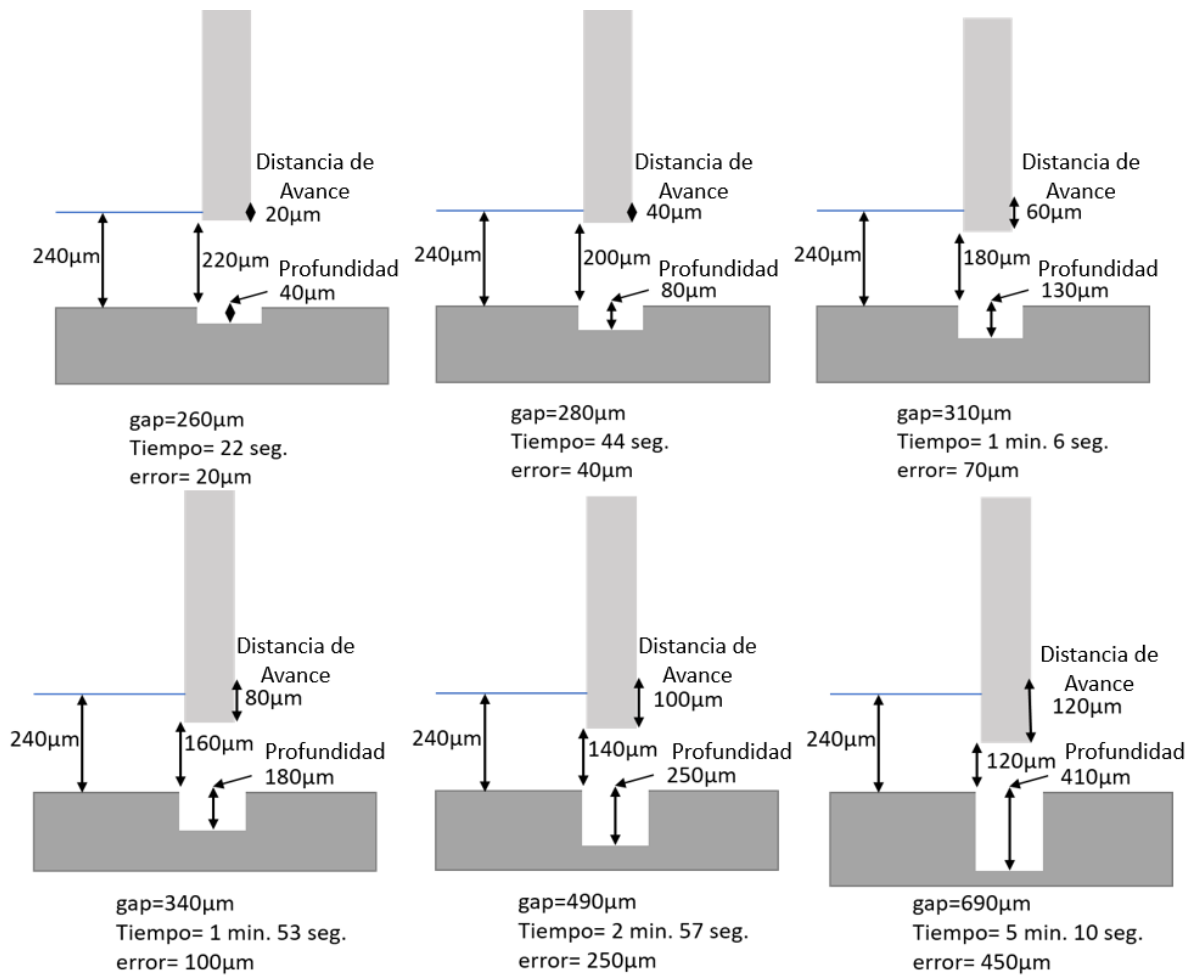


Figura 5.6.1 Profundidad resultante en comparación con distancia de avance.

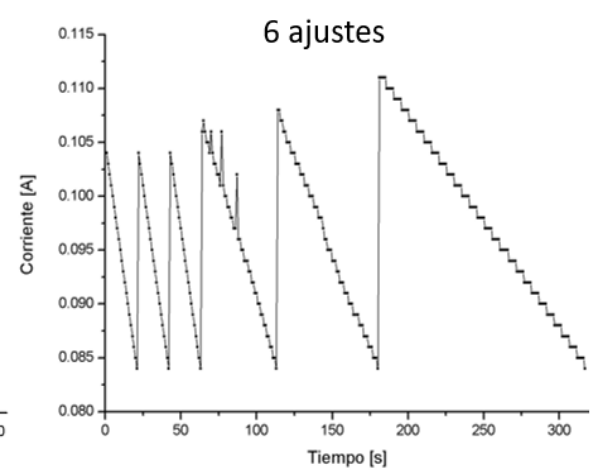
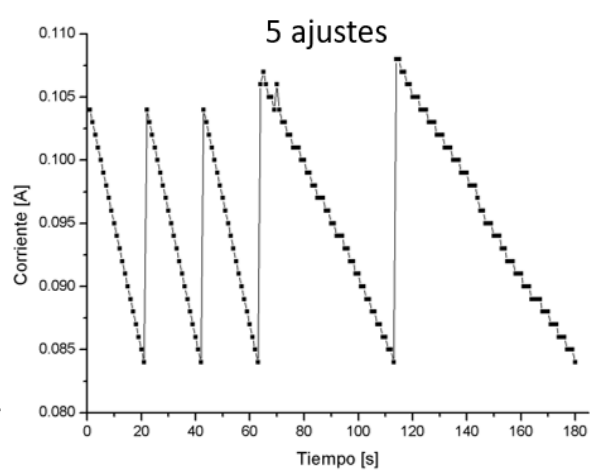
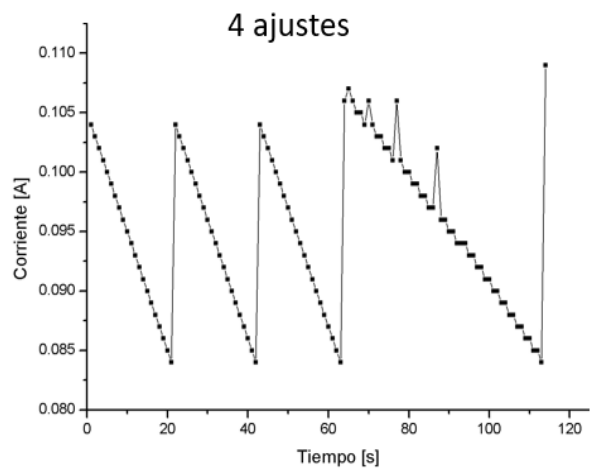
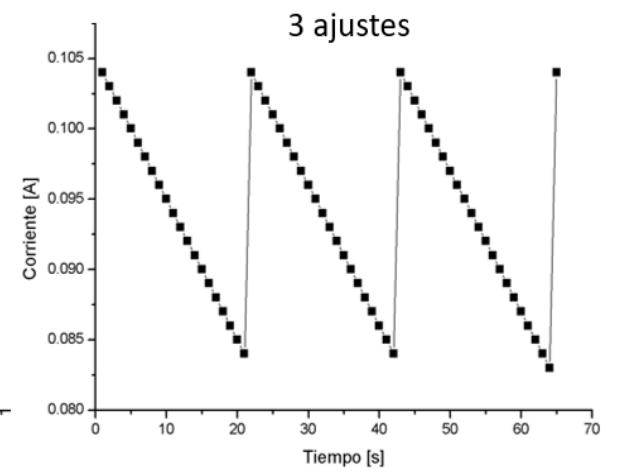
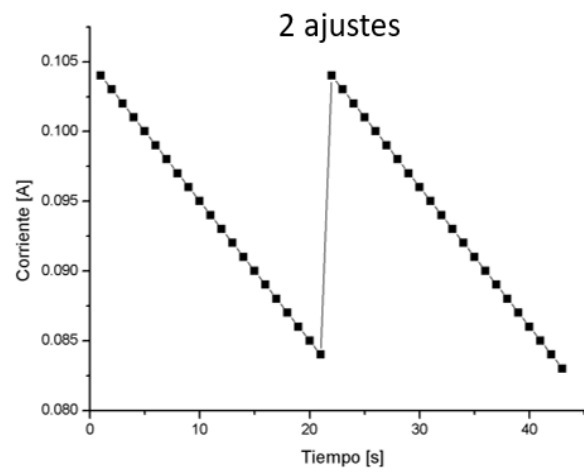
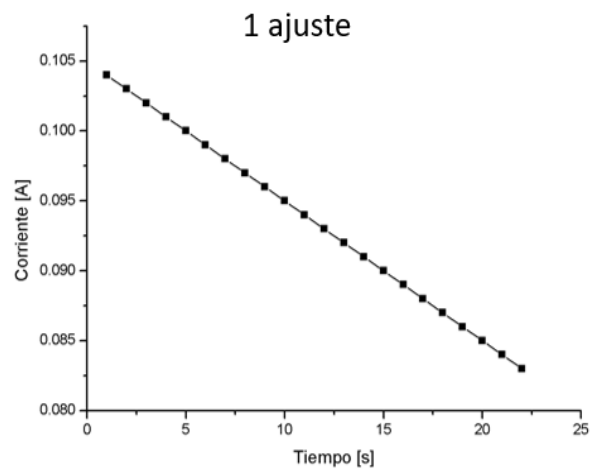
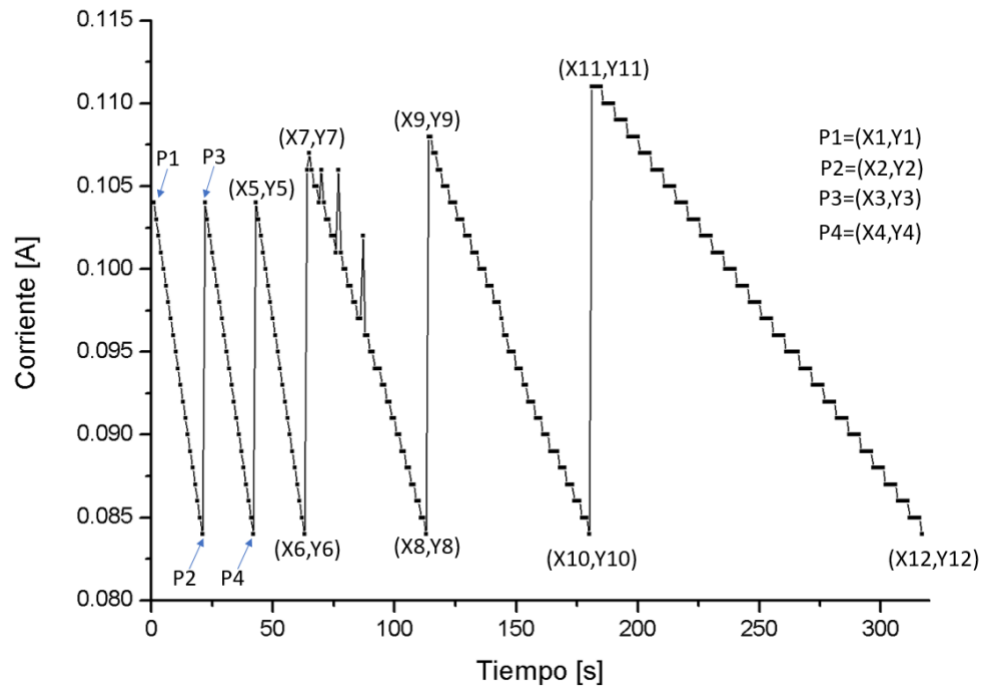
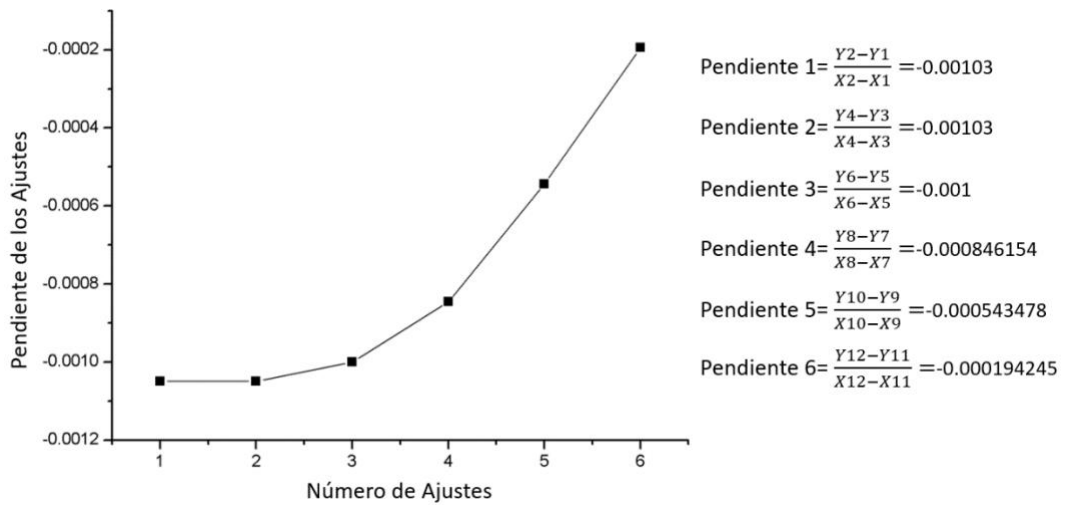


Figura 5.6.2 Ajuste de la corriente de maquinado.



(a)



(b)

Figura 5.6.3 Patrón del comportamiento de la pendiente en 6 ajustes.

$$Pendiente = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \quad (5.6)$$

Donde:

Y_1 es el punto máximo en el eje y

Y_2 es el punto mínimo en el eje y

X_1 es el punto máximo en el eje x

X_2 es el punto mínimo en el eje x

La propuesta para la solución al problema ya mencionado se obtuvo de forma empírica, esto acercando el electrodo a la mitad de tiempo del ajuste 1 de la Figura 5.6.2, cuya finalidad es mantener una remoción de material constante, mediante el análisis del valor de la pendiente es posible realizar una correlación entre Distancia de avance y profundidad. De tal forma es posible llegar a la profundidad dictaminada por el usuario y manteniendo constante la distancia inter-electrodos en el proceso PECMM. En la Figura 5.6.4 se muestra una serie de experimentos realizados para mantener una correlación entre distancia de avance y profundidad alcanzada, de tal forma se mantiene una remoción de material y distancia inter-electrodos constante.

En la Figura 5.6.5 se muestra el comportamiento de la corriente de maquinado, donde es posible apreciar que, al mantener el valor de pendiente constante, manteniendo un ajuste del área de exposición del electrodo y la corriente de maquinado constante, es posible llegar a un valor muy cercano a la profundidad dictaminada por el usuario.

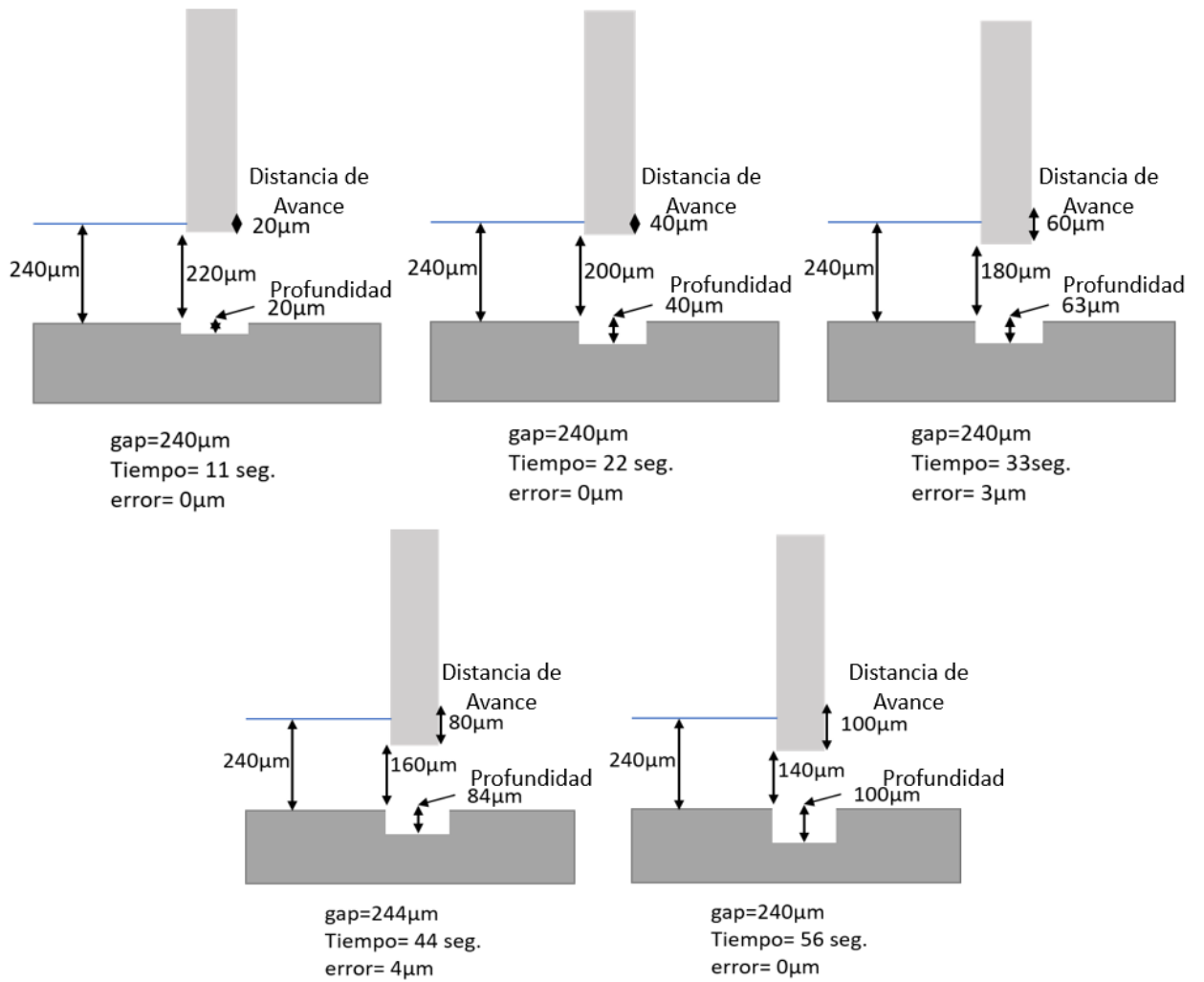


Figura 5.6.4 Avance y profundidad alcanzada con ajuste cada 11 segundos.

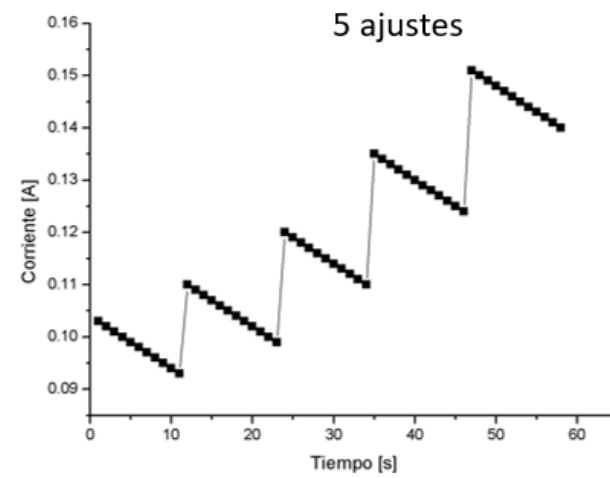
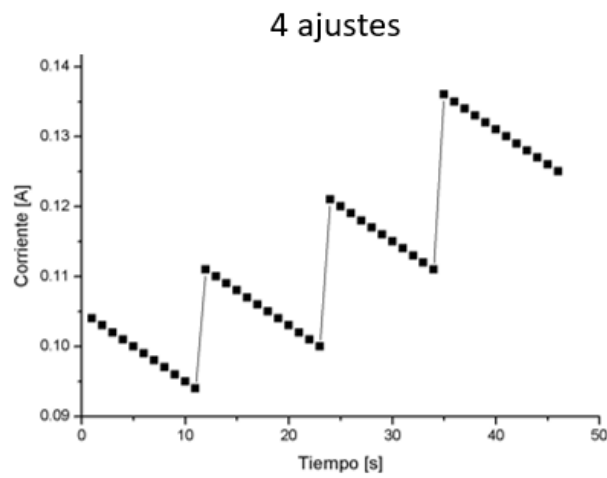
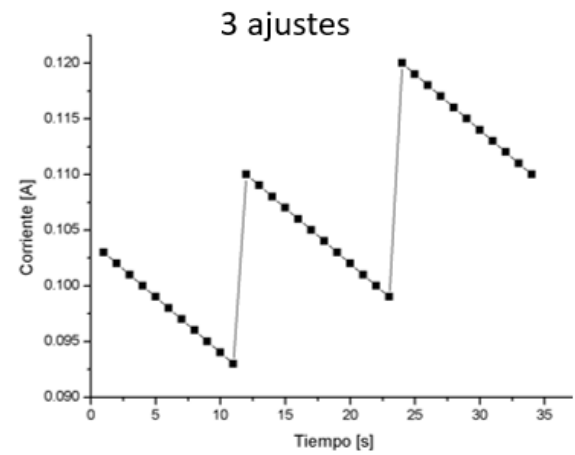
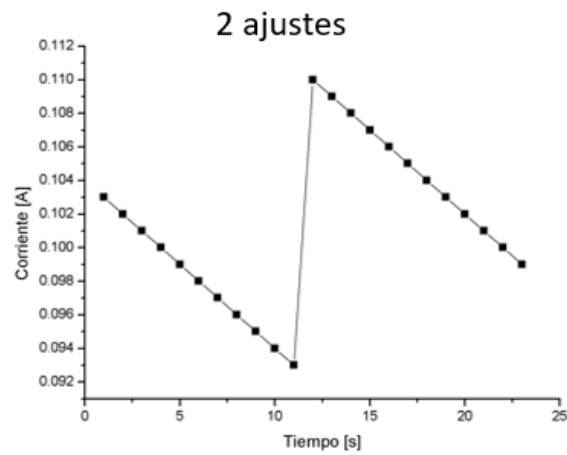
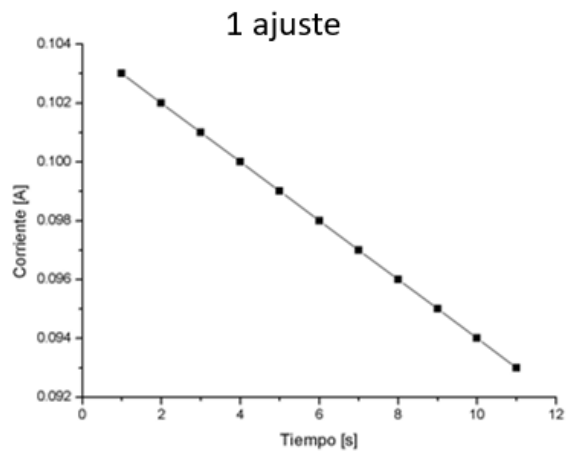


Figura 5.6.5 Comportamiento de la corriente con respecto a los ajustes realizados.

La corriente de maquinado presenta un aumento en medida que se realiza el ajuste, esto se debe a que el área de exposición del electrodo aumenta debido a que este se acerca a la pieza de trabajo e influyen los costados de la herramienta de trabajo por tal motivo se presenta la propuesta del rediseño en el sistema de control, el cual contiene un módulo encargado de realizar el análisis del comportamiento de la pendiente de la corriente de maquinado; en el momento en que se realiza un ajuste de forma automática, se actualizan los parámetros del área de exposición y la corriente de maquinado para mantenerlos constantes.

El diagrama planteado se presenta en la Figura 5.6.6, el cual estará reajustando la ecuación del gap modificando el área del electrodo expuesta. El ajuste de la estación de la distancia inter-electrodos dependerá del comportamiento de la pendiente de la corriente de maquinado resultante, al conservarla de forma constante es posible asegurar y mantener una remoción de material constante y con ello la obtención de la profundidad dictaminada por el usuario.

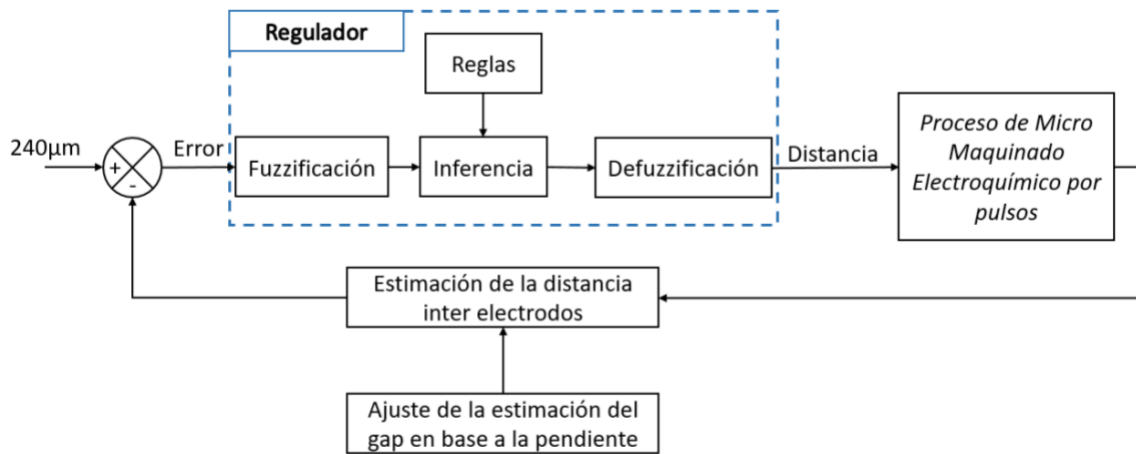


Figura 5.6.6 Comportamiento de la corriente con respecto a los ajustes realizados.

En la Figura 5.6.7 se presenta el diagrama de flujo utilizado para generar el ajuste de forma automática de acuerdo al comportamiento de la corriente de maquinado, donde se toman los parámetros iniciales y se comienza almacenar los valores de la pendiente en un arreglo con un tamaño de cinco elementos, en el momento que el arreglo se encuentra lleno obtiene la magnitud de la nueva pendiente conforme la remoción avanza y en base a ello se comienza generar las comparaciones, si la magnitud de pendiente aumenta envía la

instrucción a la SBC para acercar o alejar el electrodo. La SBC es la encargada de actualizar los parámetros de la ecuación de la distancia inter-electrodos, de tal forma es posible mantener la equivalencia de ajuste de distancia recorrida y gap existente.

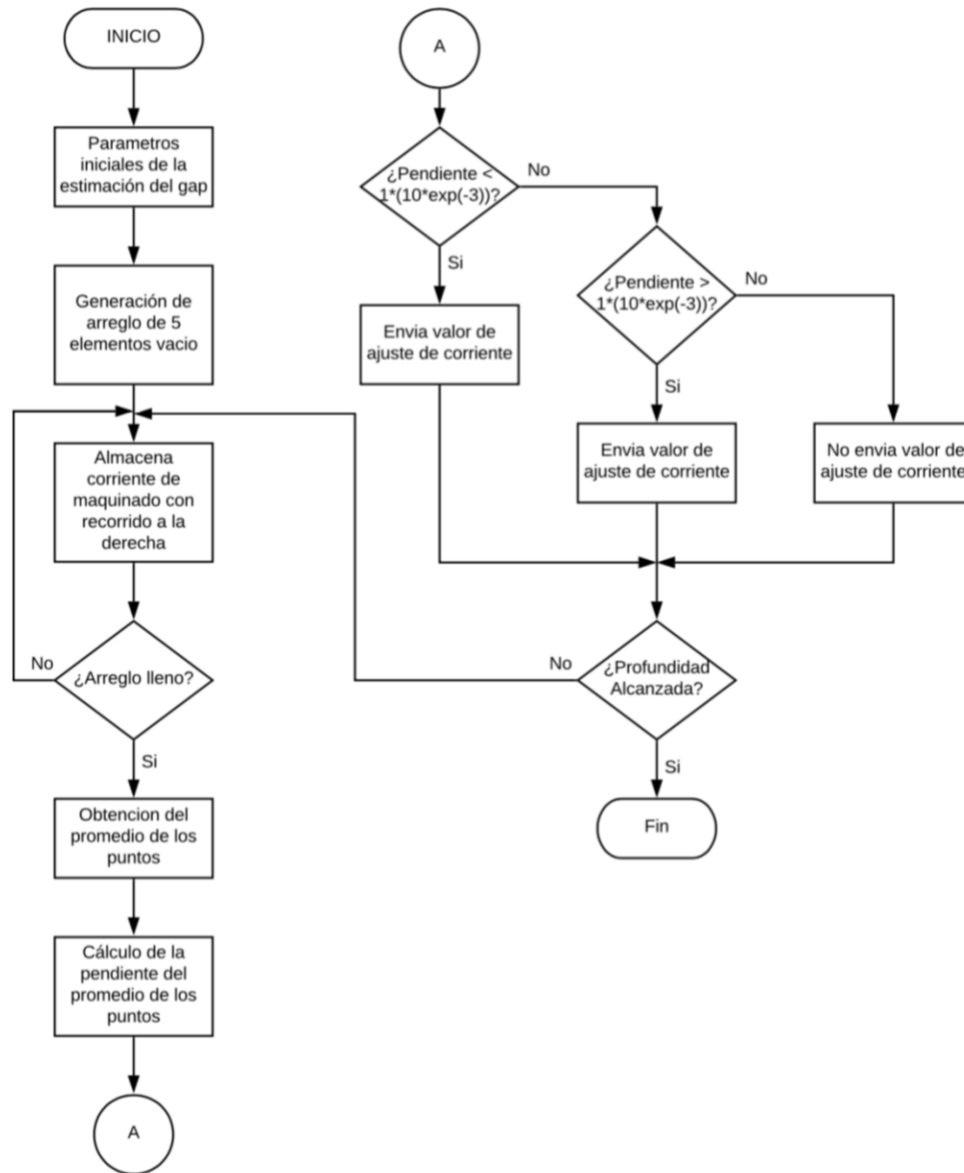


Figura 5.6.7 Diagrama de flujo para el ajuste en la estimación de la distancia inter-electrodos.

Para corroborar que se llega a la profundidad establecida por el usuario, se realizaron dos canales, cada uno con una longitud de 1 centímetro a una profundidad de 240 y 500 μ m.

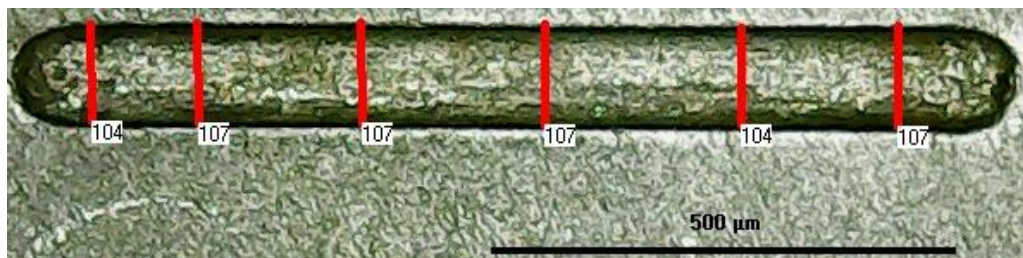
En la Tabla 10, se muestra a forma de resumen los resultados al implementar el ajuste en la ecuación de la estimación de la distancia inter-electrodos. La prueba 1 consistió en

realizar un canal con una longitud de 10 milímetros a una profundidad de 240 μm y la prueba 2 consistió en realizar un canal cuya longitud determinada por el usuario fue de 10 milímetros a una profundidad de 500 μm .

En la Figura 5.6.8(a) y (b) se muestran los resultados, donde se obtuvo una profundidad de 240 μm y en la Figura 5.6.8(c) y (d) con una profundidad de 500 μm ; con las profundidades preestablecida por el usuario, también se muestran las mediciones del largo y ancho del canal resultante. Las mediciones del ancho del canal resultante se realizaron con la finalidad de observar la homogeneidad de los resultados. En la Figura 5.6.9 se muestra una imagen representativa de la ubicación de los puntos, donde se realizó la medición de la profundidad del canal resultante, mientras que en la Tabla 16 se muestran las de ambos canales en diferentes puntos, corroborando la homogeneidad de la profundidad.

Tabla 16 Configuración inicial y mediciones de longitud y profundidad.

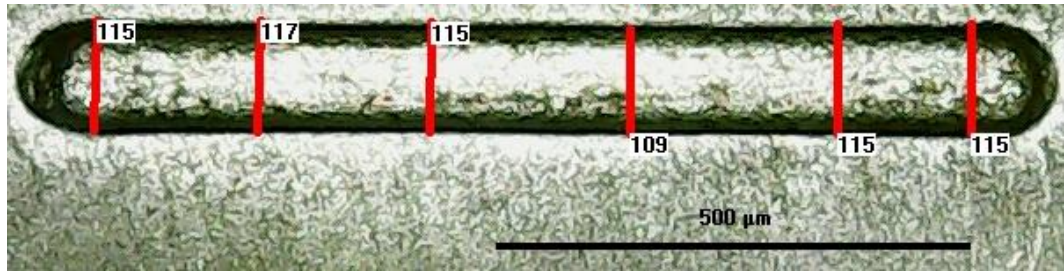
Prueba	Duración del proceso PECMM [min.]	Longitud preestablecida en el sistema [mm]	Longitud resultante del proceso PECMM [mm]	Profundidad del canal resultante [μm]
1	16	10	10.78	240
2	33	10	10.89	500



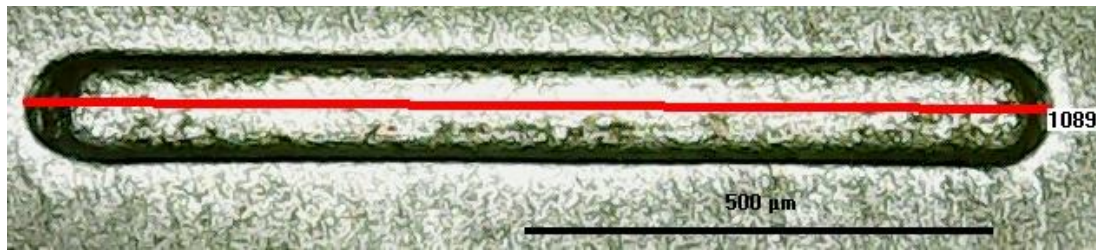
(a) Canal con una profundidad de 240 μm con mediciones de ancho.



(b) Canal con una profundidad de 240 μm con medición del largo.



(c) Canal con una profundidad de 500 μm con mediciones del ancho



(d) Canal con una profundidad de 500 μm con medición del largo.

Figura 5.6.8 Canales resultantes para validación de la profundidad dictaminada por el usuario.

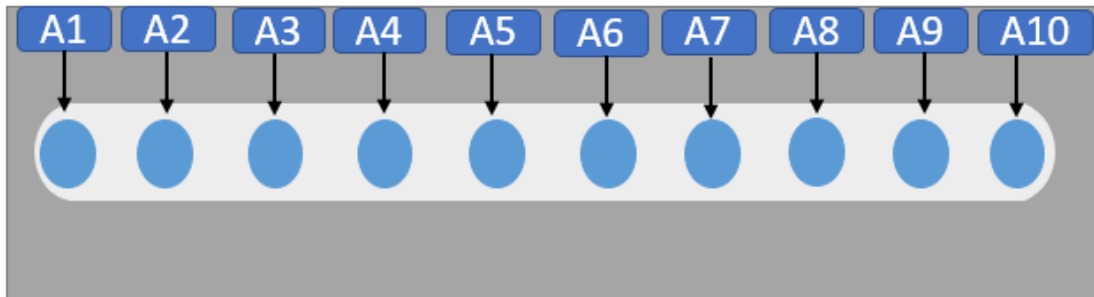


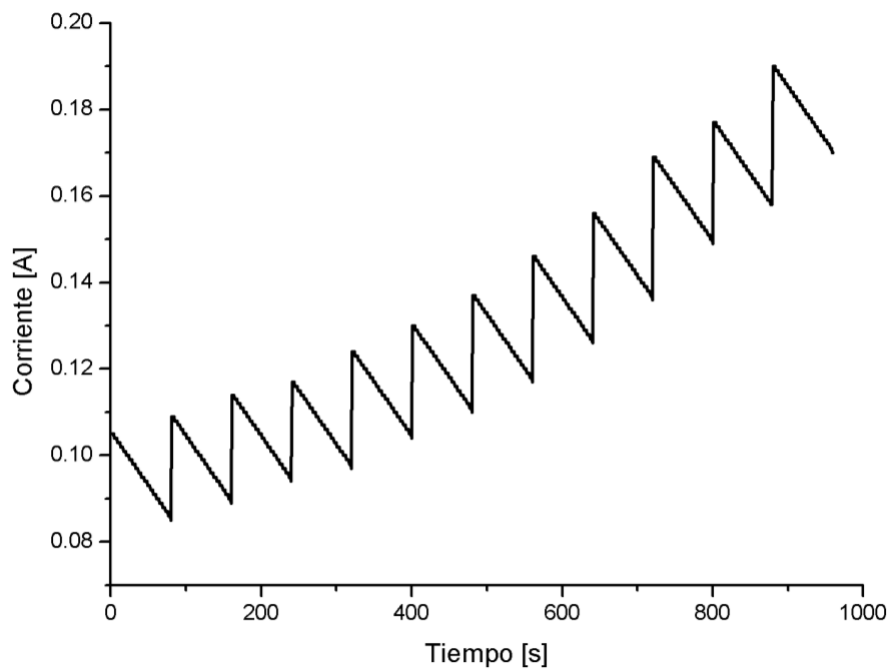
Figura 5.6.9 Representación de los puntos de medición de la profundidad del canal.

Tabla 17 Mediciones de la profundidad de los canales resultantes.

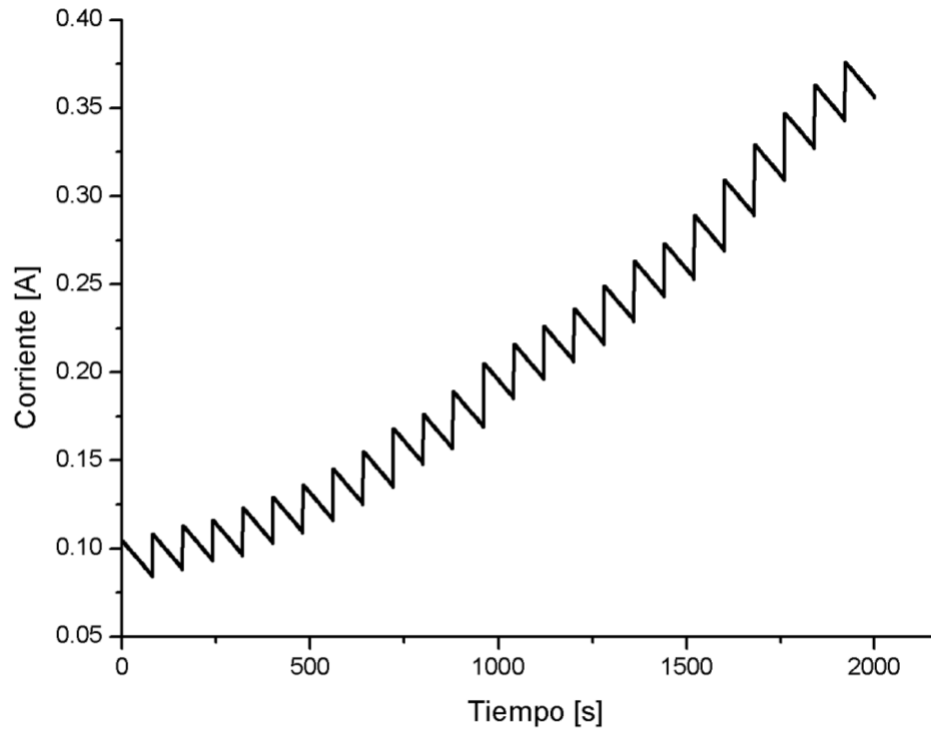
Canal	Medición [μm]										Media [μm]
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	
240 μm	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	± 0
500 μm	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	± 10

Al generar el ajuste en la ecuación de la estimación de la distancia entre los electrodos, se obtiene una remoción constante de material, lo cual se puede constatar con las mediciones

mostradas en la tabla 17. En la Figura 5.6.10, se muestra el comportamiento de la corriente de maquinado de ambos canales, con el continuo ajuste del valor de la pendiente, cada ajuste equivale a la resolución de $20\mu\text{m}$ del sistema mecánico. Así mismo es posible observar que el crecimiento de la corriente de maquinado no es similar al presentado al generar un barreno, esto se debe a que el área de exposición del electrodo no es la misma, debido a que la herramienta de trabajo se encuentra en movimiento y solo influye el anillo del electrodo secciones laterales del mismo. En la Figura 5.6.11, se muestra la imagen representativa del área de exposición de los costados del electrodo al encontrarse en movimiento.

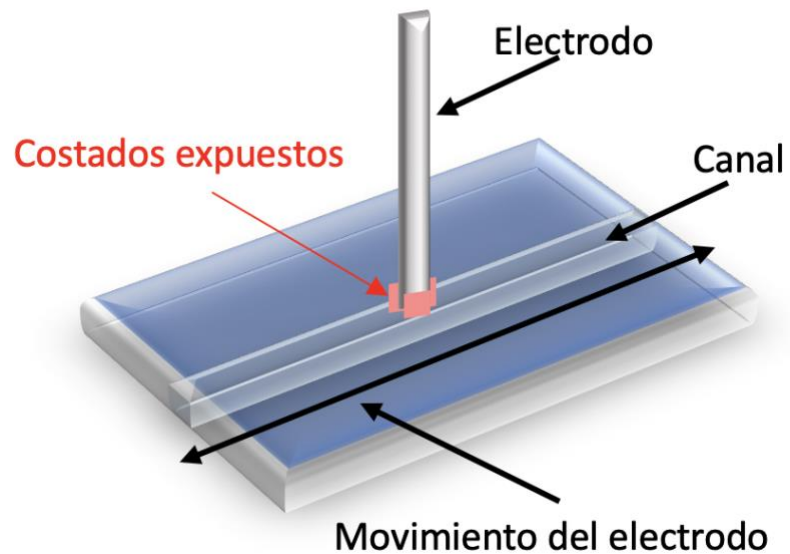


(a) Comportamiento de la corriente de maquinado al perforar $240\mu\text{m}$



(b) Comportamiento de la corriente de maquinado al perforar 500µm

Figura 5.6.10 Comportamiento de la corriente de maquinado con ajuste en la ecuación de la estimación de la distancia inter-electrodos.



5.6.11 Área de exposición del electrodo al encontrarse en movimiento.

6 RESULTADOS Y DISCUSIONES.

Para evaluar el funcionamiento del sistema de control con el sistema de cómputo se realizaron pruebas de maquinado, con las siguientes características:

1. Voltaje de polarización de 5V a una frecuencia de 40kHz con un ciclo de trabajo del 50%
2. Solución acuosa de $H_2O + NaCl$ en una concentración del 16% en masa, lo que genera una conductividad del electrolito de $4.7 \Omega \cdot \text{cm}$.
3. Electrodo hueco de cobre con un diámetro externo de $700 \mu\text{m}$ y un diámetro interno de $400 \mu\text{m}$.
4. Sistema de recirculación para electrolito con filtros para la retención de residuos generados en el proceso.
5. Distancia inter-electrodos inicial de $240 \mu\text{m}$.
6. El material utilizado es acero AISI1018.

El sistema computacional permite la medición de la corriente de maquinado, ya que es una variable para estimar la separación de los electrodos, la magnitud de esta es medida por el sistema computacional cada 10 ms , tiempo que demora el sistema mecánico en desplazarse $20 \mu\text{m}$. Para la generación de canales lineales y poligonales, inicialmente se guarda el primer valor de la corriente de maquinado, cuya finalidad es establecer un valor de referencia inicial para el control, después el sistema almacena en un arreglo 10 valores de la corriente de maquinado los cuales se van actualizando conforme el proceso avanza, además esos 10 valores permiten obtener la pendiente de la gráfica de la corriente RMS del maquinado con respecto al tiempo. La acción del control es mantener la magnitud de la pendiente lo mas cercana a una constante; si se detecta una variación significativa, el sistema reajusta la distancia inter-electrodos, mediante la acción de control establecida en la sección 5.6.

El sistema almacena la magnitud RMS de la corriente de maquinado y genera un archivo con extensión .xls, lo que permite tener disponibles los datos en un formato de fácil acceso; el archivo se genera de manera automática al término del proceso con los datos de identificación, la fecha y hora de término del proceso para evitar duplicidad de archivos. El archivo almacena el tiempo y la corriente de maquinado que posteriormente puede ser

graficado en algún software especializado para visualizar los resultados, en caso de requerirse.

Para visualizar la variación que tiene la corriente de maquinado durante un proceso PECMM y la capacidad del sistema computacional para la adquisición y almacenamiento de los datos, se realizó una prueba de maquinado. En la Figura 5.6.1 se muestra la evolución con respecto al tiempo de la magnitud de la corriente de maquinado de una prueba PECMM durante un proceso de 80 segundos, donde se puede observar la variación de la corriente con respecto al tiempo de duración del proceso.

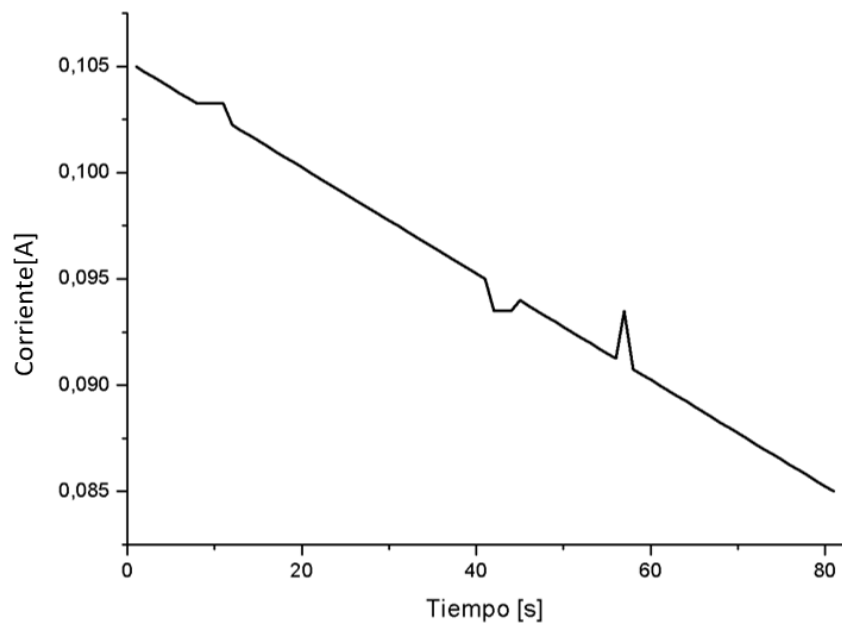


Figura 5.6.1 Variación de la corriente de maquinado en el proceso PECMM.

La Figura 5.6.1 presenta el comportamiento de la corriente de maquinado en un solo ajuste. El descenso de la corriente de maquinado se debe a que existe una remoción de material adecuada, dado que si la corriente de maquinado aumenta significa que la separación de los electrodos es menor al valor de referencia de los $240\mu\text{m}$, en caso contrario si la corriente de maquinado disminuye significa que la distancia inter-electrodos es mayor a los $240\mu\text{m}$, esto como causa de la remoción de material.

El desplazamiento de la herramienta de trabajo está condicionado con respecto a la resolución del sistema mecánico, por lo cual la herramienta puede desplazarse de forma vertical con una resolución de $20\mu\text{m}$. El monitoreo constante del proceso permitió

controlar y mantener constante la distancia inter-electrodos, estimándose una distancia de $240\mu\text{m}$, y al mantener un ajuste del área de exposición del electrodo en la ecuación 5.5, se logró llegar a la profundidad dictaminada por el usuario.

Dentro de los alcances del proyecto de investigación se encuentra el poder realizar maquinados lineales y otras formas simples compuestas por líneas rectas de una longitud y profundidad establecida por el usuario, lo anterior fue realizado con la finalidad de evaluar el sistema de control bajo ciertas condiciones fuera de las condiciones ideales a las cuales se llamaron perturbaciones y verificar que el sistema es capaz de contrarrestar los efectos de las mismas y verificar que como resultado del maquinado se obtuvo la profundidad requerida por el usuario. Se realizaron algunas pruebas de maquinado lineal con y sin perturbaciones, de igual forma se realizó una prueba con maquinado poligonal, las cuales se describen a continuación:

6.1 Prueba de maquinado Lineal sin perturbación

Con el uso del sistema de cómputo se realizó una prueba de maquinado lineal donde los parámetros fueron los siguientes:

- Longitud del canal: 1cm.
- Profundidad del canal: $800\mu\text{m}$.
- Sin perturbación (sin inclinar).

Una vez ingresados los parámetros al sistema computacional, se inició la prueba, la cual tuvo una duración de 40 minutos. Una vez que se alcanzó la profundidad se detienen todos procesos y se genera un archivo con extensión “xls”, con los datos del proceso. En la Figura 6.1.1, se muestra el comportamiento de la corriente de maquinado durante el proceso completo, hasta alcanzar la profundidad deseada de $800\mu\text{m}$. Donde existe el control de la distancia inter-electrodos, la cual mantiene constante a la referencia y en cada ajuste se actualizan los parámetros corriente y área de exposición. En medida que el electrodo se va adentrando a la pieza de trabajo, la corriente de maquinado aumenta por tal motivo es necesario estar actualizando los parámetros de la estimación de la distancia inter-electrodos hasta llegar a la profundidad dictaminada por el usuario.

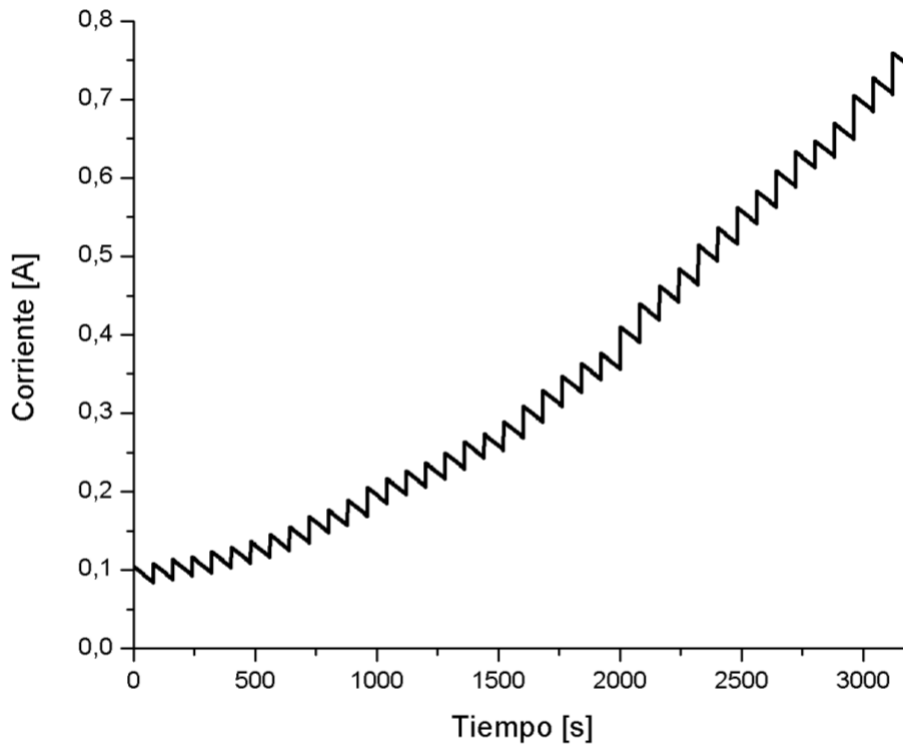


Figura 6.1.1 Comportamiento de la corriente de maquinado de canal con una longitud de 1 cm a una profundidad de 800 μm .

Al término de la prueba se realizó la medición de la profundidad alcanzada con un medidor de alturas digital marca FLOWLER, modelo 48976. En la Figura 6.1.2 se muestra una imagen representativa de la ubicación de los puntos de medición de la profundidad del canal, en la Tabla 18 se muestran las mediciones de ambos canales en diferentes puntos, se considera que la profundidad es la misma en todos los puntos ya que mide lo mismo, esto en base a la resolución del sistema mecánico. En la Figura 6.1.3 se muestra una fotografía del resultado obtenido de la prueba de maquinado lineal y la medición del largo y ancho resultante.

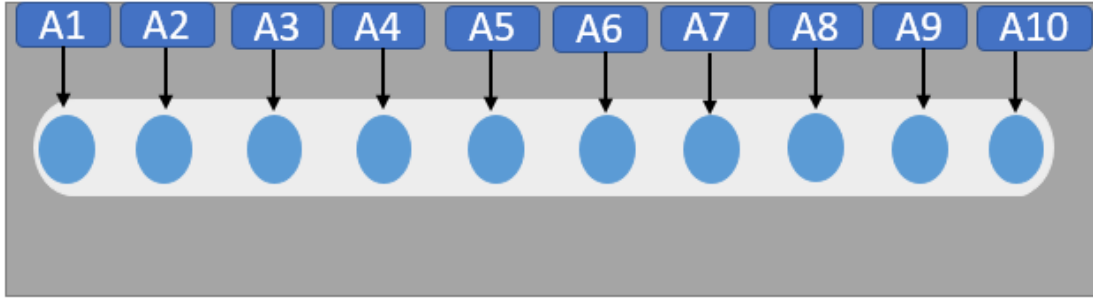
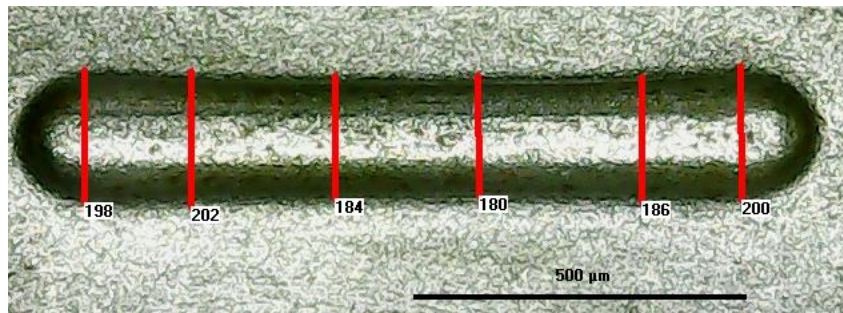


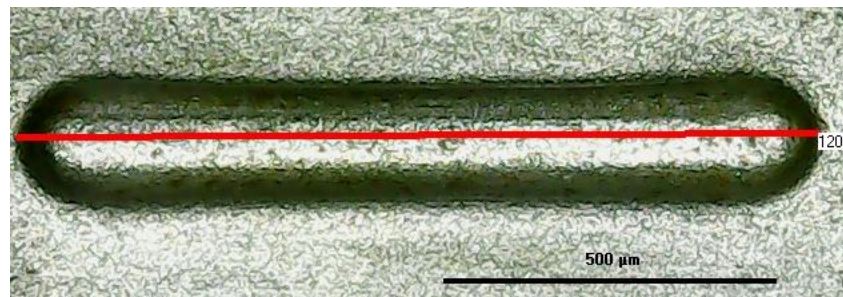
Figura 6.1.2 Imagen representativa de los puntos de medición de la profundidad resultante del canal de 800 μm .

Tabla 18 Mediciones de la profundidad del canal resultante.

Canal	Medición [μm]										Media [μm]
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	
800 μm	800	790	790	790	790	790	790	790	790	800	± 7.9



(a) Mediciones del ancho resultante del canal con una profundidad de 800 μm .



(b) Mediciones del largo resultante del canal con una profundidad de 800 μm .

Figura 6.1.3 Resultado del maquinado lineal con longitud de 1cm de largo a una profundidad de 800 μm .

6.2 Prueba de maquinado Lineal con perturbación

Se propusieron dos pruebas para validar los resultados del control expuesto a perturbaciones, las cuales se presentan mediante el diagrama de la Figura 6.2.1.

La primera prueba se realizó inclinando la pieza de trabajo un ángulo de 4.3° , con una profundidad deseada de 240 y $500\mu\text{m}$, tal como se muestra Figura 6.2.1 (a). Para la segunda prueba se maquinaron previamente canales a lo largo de la superficie de la pieza de trabajo simulando un desnivel sobre la superficie. Posteriormente se realizó un maquinado mediante PECMM en dirección perpendicular al canal previamente establecido, la profundidad deseada fue de $240\mu\text{m}$, tal como se muestra en la Figura 6.2.1 (b), al finalizar las pruebas se realizó la medición de la profundidad en diferentes puntos del canal. Lo que se espera es que, si el sistema de control funciona de manera adecuada, la profundidad del maquinado a lo largo del canal resultante debe ser de la misma magnitud en todos los puntos e igual a la deseada de $240\mu\text{m}$.

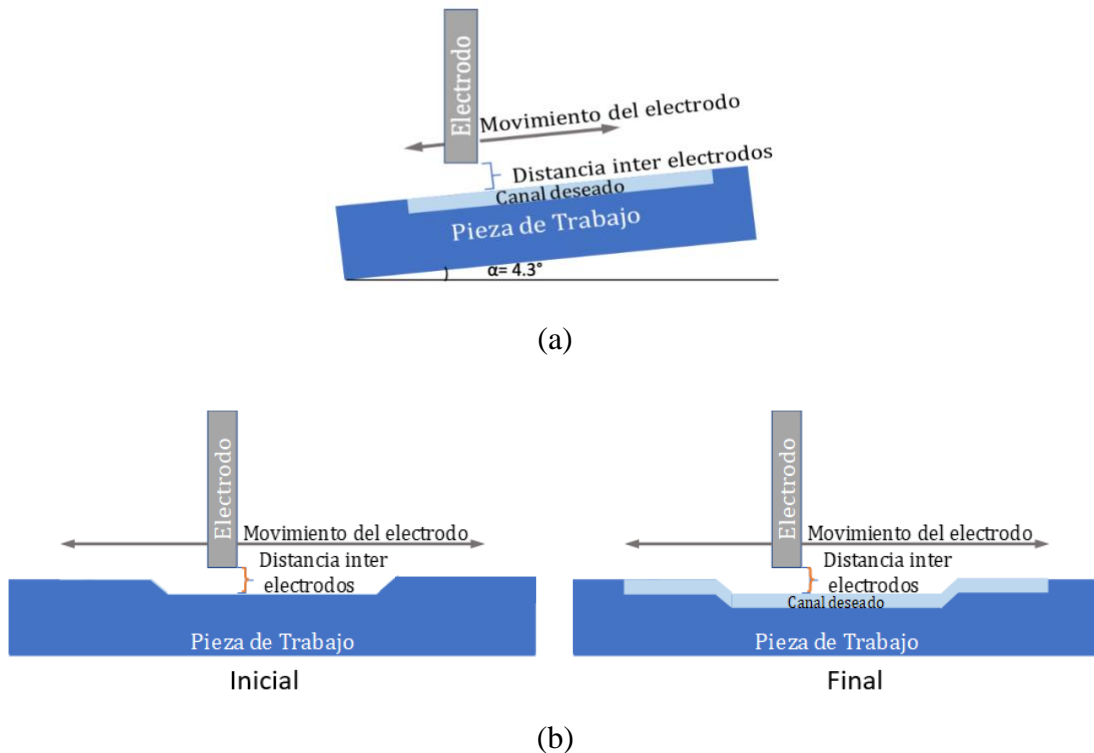


Figura 6.2.1 Pruebas para validar el sistema de control, (a) con la superficie de maquinado inclinada y (b) con un canal previamente maquinado.

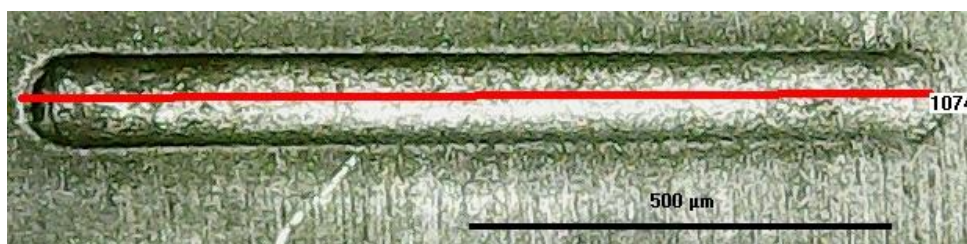
En la Tabla 19, se muestra a manera de resumen la configuración inicial y la profundidad alcanzada al término cada prueba.

Tabla 19 Configuración inicial y mediciones de longitud y profundidad.

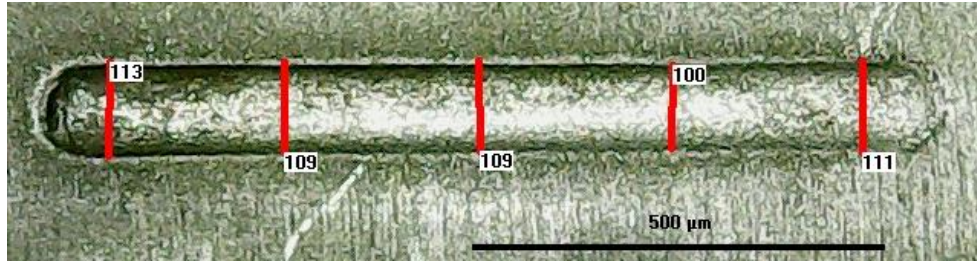
Prueba	Duración del proceso PECMM [min.]	Longitud preestablecida en el sistema [mm]	Longitud resultante del proceso PECMM [mm]	Profundidad del canal resultante [μm]
1	16	1000	1078	240
2	33	1000	1089	500
3	25	1500	1667	240
4	25	1500	1697	240

En la Figura 6.2.2 (a), se muestran los resultados de la prueba 1, al someter el proceso de PECMM a una perturbación que consiste en una inclinación de 4.3° , cuya finalidad fue aumentar la complejidad de la perturbación a una profundidad de $240\mu\text{m}$, mientras que la Figura 6.2.2 (b) muestra el comportamiento de la corriente de maquinado.

En la Figura 6.2.3 (a), se muestran los resultados de la prueba 1, con una perturbación que consiste en una inclinación de 4.3° , la profundidad deseada de $500\mu\text{m}$, mientras que la Figura 6.2.3 (b) muestra el comportamiento de la corriente de maquinado, donde la acción de control obliga al proceso a reajustar la posición del electrodo para mantener constante la distancia inter-electrodos dentro de la ventana permitida por la resolución del sistema mecánico, buscando la estabilidad del proceso.

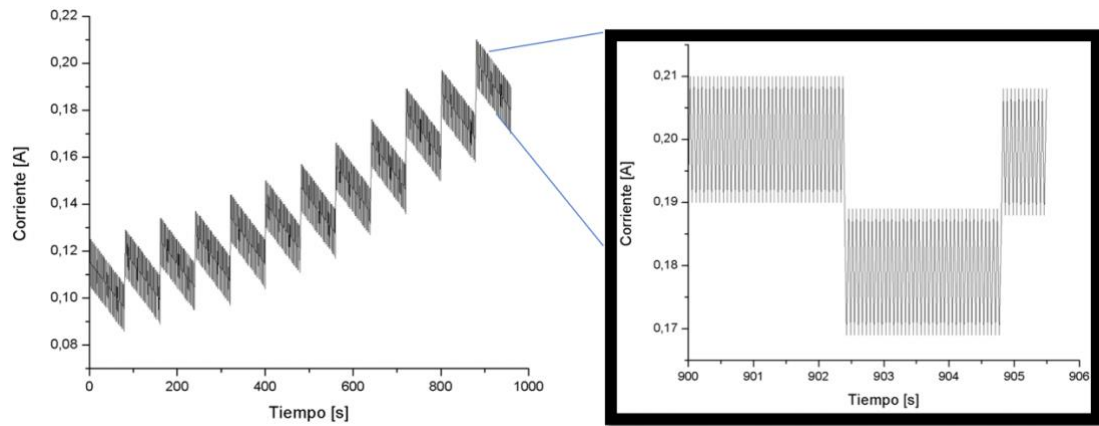


(a)



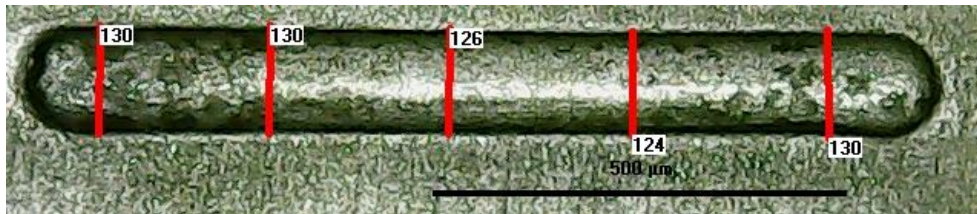
(b)

(a) Mediciones ancho y (b) largo del canal resultante a una profundidad de $240\mu\text{m}$.

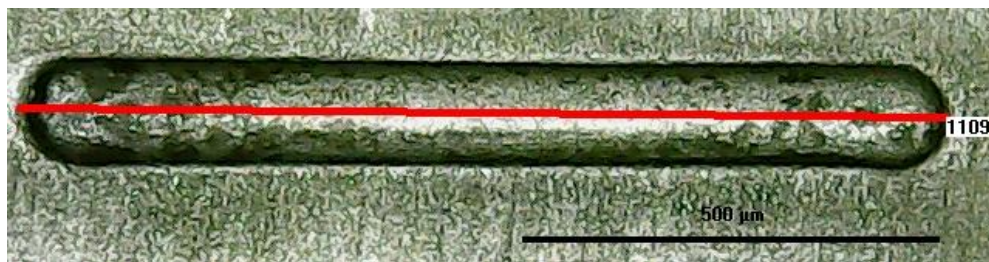


(b) Comportamiento de la corriente de maquinado del canal resultante a una profundidad de $240\mu\text{m}$.

Figura 6.2.2 (a) Resultados de maquinado con 4.3° de inclinación con profundidad de $240\mu\text{m}$, (b) forma de onda de la corriente de maquinado, con una inclinación de 4.3° con una profundidad de $240\mu\text{m}$.

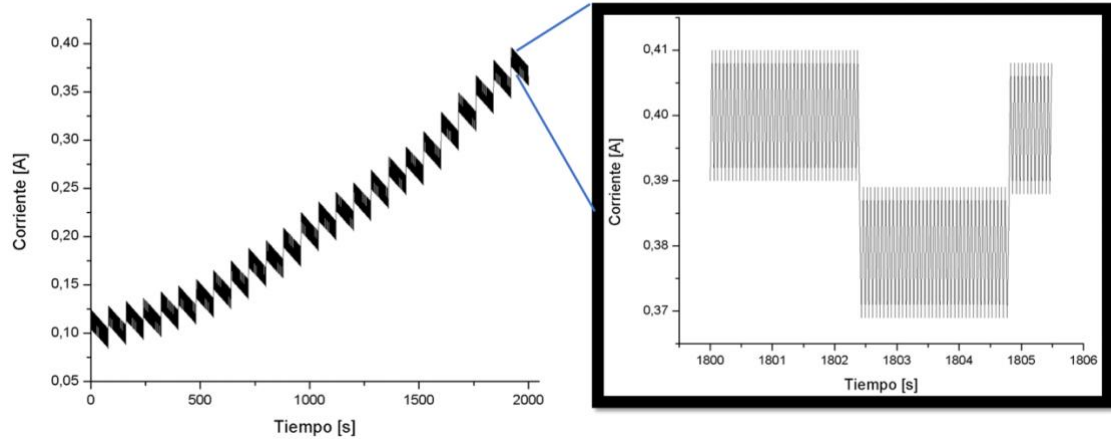


(a)



(b)

(a) Mediciones ancho y (b) largo del canal resultante a una profundidad de $500\mu\text{m}$.



(b) Comportamiento de la corriente de maquinado del canal resultante a una profundidad de $240\mu\text{m}$.

Figura 6.2.3 (a) Resultados de maquinado con 4.3° de inclinación con profundidad de $500\mu\text{m}$ y (b) forma de onda de la corriente de maquinado, con una inclinación de 4.3° con una profundidad de $500\mu\text{m}$.

En la Figura 6.2.4(a), se muestran los resultados del proceso con el sistema de control al ser sometido a una perturbación que consiste en un canal lineal vertical de profundidad creciente. En la Figura 6.2.4(b), se muestra la representación de los puntos en donde se realizaron las mediciones de profundidad de cada uno de los canales resultantes y en la Tabla 20 se muestran los resultados de las mediciones de profundidad.

La profundidad de la perturbación con la intersección del canal 3 fue de $40\mu\text{m}$, mientras que con la intersección del canal 4 fue de $240\mu\text{m}$.

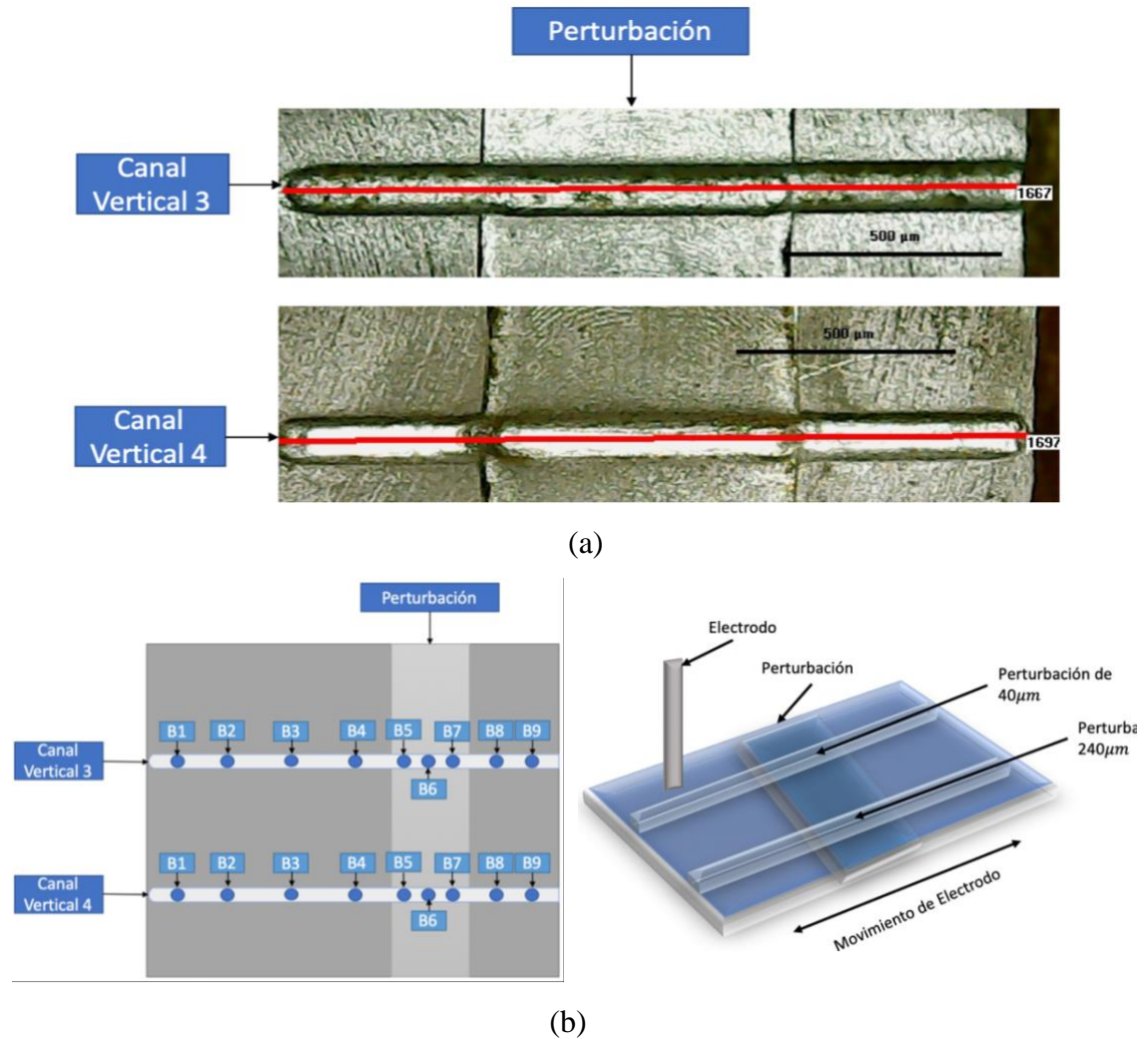


Figura 6.2.4 (a) Resultados del control del proceso PECMM con perturbación de un canal con profundidad incremental y(b) ubicación de los puntos en donde se realizaron las mediciones.

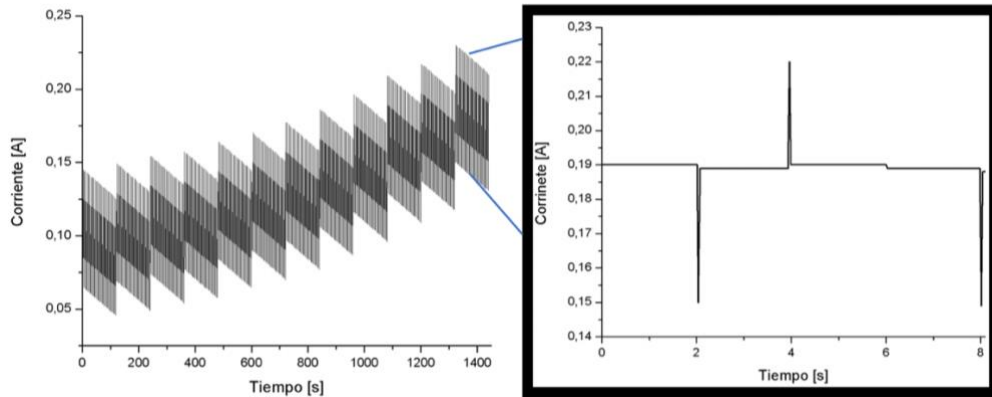
Tabla 20 Medición de la profundidad resultante en los canales 3 y 4.

Canal	Medición [μm]									Media [μm]
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	
3	250	240	240	240	270	270	270	240	250	238.2 \pm 1.8
4	250	240	240	240	470	460	460	240	250	236.2 \pm 3.8

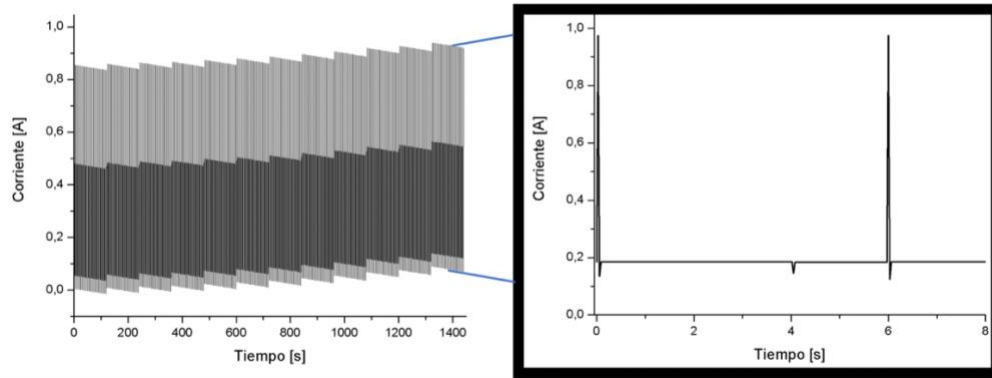
La forma de onda de la corriente de maquinado es similar a las pruebas realizadas en la prueba 3 y 4, es decir, al recorrer el electrodo la longitud del canal que se desea maquinar, en el trayecto encuentra perturbaciones de diferente magnitud. Dichas perturbaciones se

ven reflejadas en la forma de corriente y el distanciamiento entre cada pico de corriente coincide con la distancia recorrida por el electrodo. La acción de control se ve reflejada cuando el electrodo cae dentro del canal de perturbación, el gap aumenta drásticamente y la corriente disminuye, el controlador ajusta la distancia hasta que la corriente regresa a la condición de estabilidad (magnitud de corriente de maquinado). En caso opuesto, si el electrodo sale del canal de perturbación, el gap disminuye abruptamente y corriente aumenta; el controlador ajusta la distancia alejándose de la pieza de trabajo hasta que la corriente regresa a la condición de estabilidad.

En la Fig. 6.2.5, se muestra el comportamiento de la corriente de maquinado de los canales 3 y 4. La diferencia entre las figuras es la magnitud de los picos de corriente, y es debido a las diferentes profundidades que se presentan en las perturbaciones. Para el canal 3, el pico de corriente máximo de 225mA y para el canal 4 es de 950mA. Donde se puede observar que a medida que aumenta la profundidad de la perturbación, la acción de control tiende a efectuar los ajustes de forma rápida hasta regresar al valor de referencia.



(a)



(b)

Figura 6.2.5 Comportamiento de la corriente de maquinado; (a) del canal 3 y (b) del canal 4.

6.3 Prueba de maquinado poligonal

Como parte de los alcances propuestos fue el generar maquinados con formas cuadradas y rectangulares, siendo necesario que el usuario ingrese un nombre al proyecto, largo, ancho y la profundidad deseada. Se realizó una prueba la cual consistió en generar un maquinado poligonal de forma cuadrada con los siguientes parámetros:

- Largo: 1cm.
- Ancho: 1cm.
- Profundidad: 240 μ m.

La prueba tuvo una duración de 1 hora con 4 minutos, la cual consistió en generar 4 canales lineales, cuya duración de cada uno es de 16 minutos. Esta prueba requiere la secuencia de instrucciones para generar el movimiento de 2 ejes del sistema mecánico de forma secuencial para poder generar el maquinado poligonal.

En la Figura 6.3.1, se muestra la representación de los puntos en donde se realizaron las mediciones de profundidad de cada uno de los canales resultantes. Los resultados de las mediciones de profundidad se muestran en la Tabla 21, teniendo una media de 241.1 \pm 1.1 μ m.

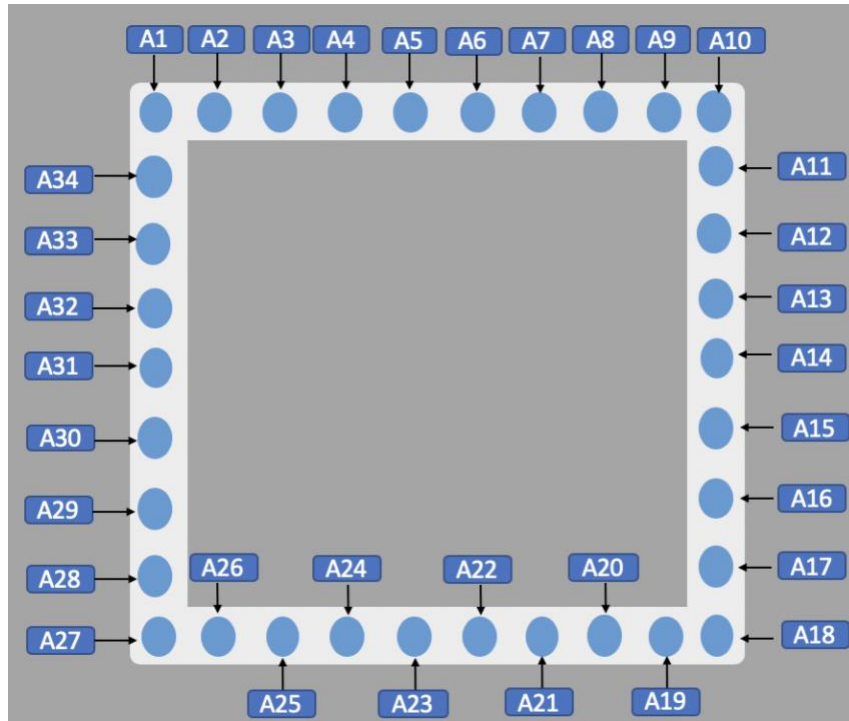
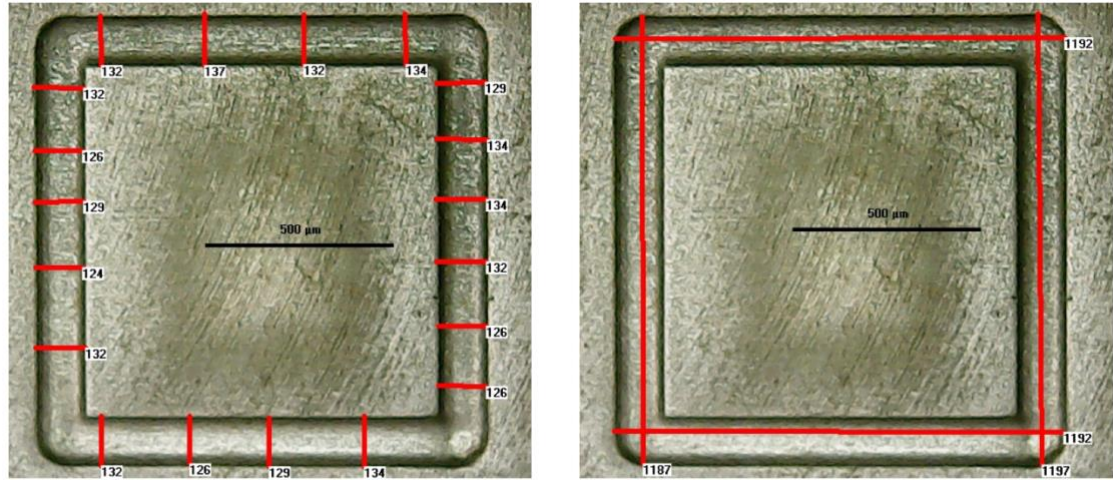


Figura 6.3.1 Ubicación de los puntos en donde se realizaron las mediciones.

Tabla 21 Mediciones de la profundidad del maquinado poligonal resultante.

Ubicación	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Medición[μm]	250	240	240	240	240	240	240	240	240	250
Ubicación	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20
Medición[μm]	240	240	240	240	240	240	240	250	240	240
Ubicación	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28	A29	A30
Medición[μm]	240	240	240	240	240	240	250	240	240	240
Ubicación	A31	A32	A33	A34						
Medición[μm]	240	240	240	240						

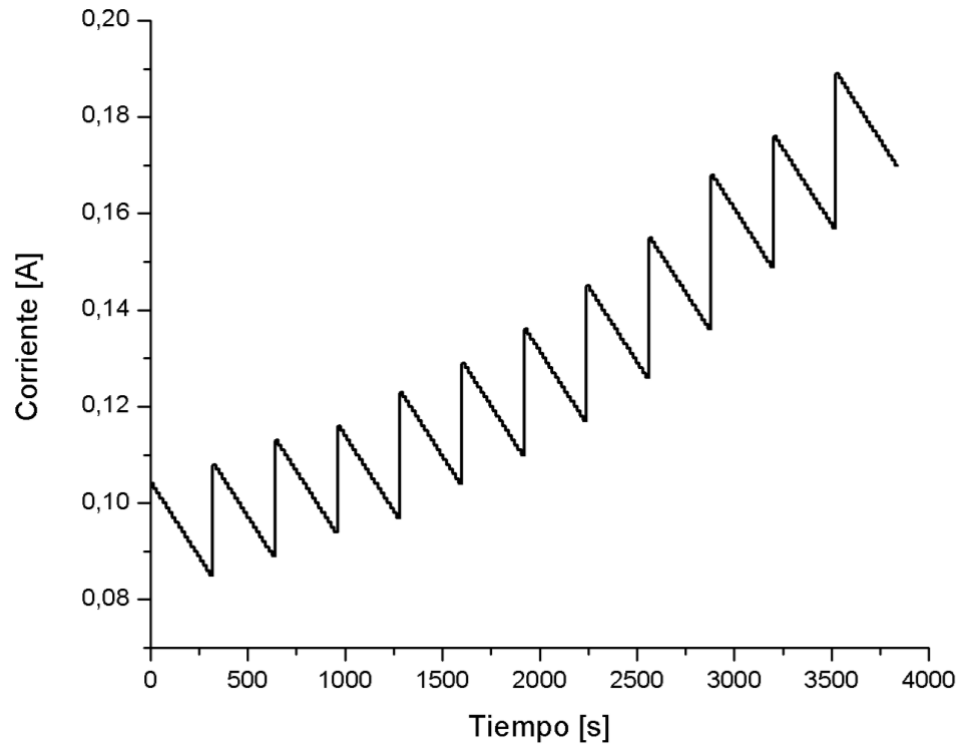
En la Figura 6.3.2(a), se muestra el resultado del maquinado poligonal con las mediciones del largo y ancho, donde es posible observar acabado y uniformidad con respecto a los lados de la pieza, mientras que en la Figura 6.3.2(b) el comportamiento de la corriente de maquinado.



Mediciones Ancho

Mediciones Largo

(a)



(b)

Figura 6.3.2 (a)Maquinado poligonal resultante y (b) comportamiento de la corriente de maquinado para la generación del maquinado poligonal.

El controlar el proceso PECMM a través de sistemas clásicos requiere de conocer el modelo matemático de la planta, lo cual resulta complejo de obtener del proceso PECMM. Una alternativa es la utilización de la técnica de inteligencia artificial por lógica difusa. El controlar la distancia inter electrodos mediante lógica difusa mediante el monitoreo de la corriente maquinando permitió mantener constante la tasa de remoción de material y realizar micro canales lineales, los cuales mantienen una profundidad uniforme, aun cuando es sometido a perturbaciones; demostrando la eficiencia del controlador a distintas condiciones.

6.4 Resultados de interfaz gráfica

6.4.1 Ventana Principal.

En la Figura 6.4.1 se presenta la ventana principal del sistema de computo misma que se despliega al acceder a través del acceso directo que aparece tras la instalación del sistema, en esta ventana se puede observar el sistema operativo y la versión del kernel bajo el cual está siendo ejecutado el sistema de software, esta ventana cuenta con 3 submenús mediante los cuales se puede acceder a las diferentes secciones del sistema.



Figura 6.4.1 Interfaz ventana principal.

En el submenú **Archivo** se encuentra la opción de **Salir** la cual deshabilita los circuitos de mando del sistema mecánico, así como el sistema de maquinado electroquímico y el sistema de recirculación del electrolito, esta opción también cuenta con un atajo de teclado

y se accede a ella pulsando el conjunto de teclas “CTRL + q” en la Figura 6.4.2 se muestra las opciones que se despliegan al acceder al submenú **Archivo**.

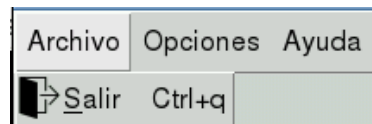


Figura 6.4.2: Submenú Archivo.

El submenú **Opciones** está integrado por **Establecer Distancia inter-electrodos** al ingresar a esta opción para desplegar una venta mediante la cual se puede establecer la distancia inter-electrodos de manera automática. La opción que permite al usuario ver la inclinación o perturbación con la que se encuentra la pieza de trabajo se encuentra en la opción **Inclinación Inter electrodos** o de igual forma es posible entrar mediante comandos, pulsando “CTRL+z”. Para comenzar a maquinar es necesario entrar a la opción **Maquinar**, o también poder ingresar desde el atajo pulsando “CTRL+g”.

Así mismo se puede generar maquinados cuya forma es lineal pulsando el conjunto de teclas “CTRL+d”, **Maquinado Lineal**, es otra opción de este menú, la cual al ingresar a ella se despliega una ventana cuya función permite realizar maquinados lineales, el usuario solo debe ingresar la distancia, profundidad, eje y sentido, a esta opción es posible ingresar de igual manera mediante la combinación de teclas “CTRL+l”, **Maquinado Poligonal**, opción mediante la cual se ingresa a una ventana la cual brinda la posibilidad al usuario de generar maquinado de forma poligonal (cuadrados, rectángulos), a esta opción también se puede ingresar mediante la combinación de las teclas “CTRL+p”, **Desplazamiento Manual**, opción que permite al usuario desplazar el electrodo libremente por la zona de trabajo, a esta opción se puede ingresar con la combinación de teclas “CTRL+m”, la última opción es **Posición de Fabrica**, y a la cual también se puede ingresar mediante la combinación de teclas “CTRL+f” y la ultima opción con la que cuenta el proceso de maquinado es la **Configuración de la Fuente**, la cual se puede ingresar con el atajo “CTRL+w”, todo es desplegando en una ventana mediante la cual al pulsar un botón el sistema mecánico se posiciona de manera automática a su posición de fábrica en la Figura 6.4.3 se muestra el submenú que se despliega al ingresar a la sección de **Opciones**.

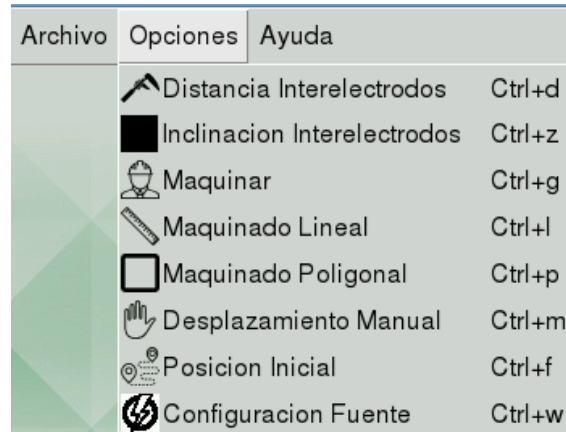


Figura 6.4.3: Submenú Opciones.

En el submenú **Ayuda**, se encuentran las opciones **Atajos Teclado** y **Acerca de**, al ingresar a la primera se despliega una ventana donde se presenta en forma de lista los atajos de teclado y las secciones del sistema que ejecutan, al ingresar a la segunda se despliega una ventana donde se presenta la información general en cuanto a versión, autor y datos de interés, cuenta con un atajo de teclado el cual esta combinación de teclas “CTRL+a”, en la Figura 6.4.4 se muestra las opciones que se despliegan al ingresar al submenú **Ayuda**.

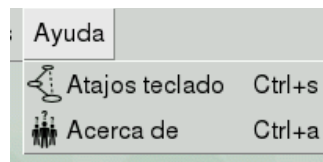


Figura 6.4.4: Submenú Ayuda.

6.4.2 Establecer distancia Inter-electrodos

Para poder establecer la distancia interelectros inicial para el maquinado electroquímico se desarrolló esta sección del software, implementa el uso de interrupciones externas conectadas a los interruptores de fin de carrera del sistema mecánico, basado en la experimentación previa al desarrollo del software, se estableció que la distancia interelectrodos inicial fuera de $240 \mu m$, esta sección de software también implementa la opción de reestablecer la posición de fábrica del sistema mecánico, en caso de que por alguna razón externa al usuario el sistema se encuentre en una posición no adecuada para el proceso de maquinado electroquímico, al seleccionar la opción **Establecer Distancia**

Interelectrodos se despliega la venta mostrada en la Figura 6.4.5, la cual consta de dos botones , el primero de color azul al ser presionado invoca a una función del código la cual está encargada de establecer la distancia interelectrodos, esto mediante la medición de la continuidad entre la pieza y la herramienta de trabajo, una vez que se ha detectado la continuidad entre ambas la herramienta de trabajo es elevada $240\mu m$, y se activa el sistema de maquinado electroquímico, el botón de color verde con simbología de una casa, al ser presionado invoca a un código python independiente el cual se encarga de posicionar el sistema mecánico a una posición de fábrica, (esta sección será descrita posteriormente), el botón rojo cierra la ventana automáticamente y retorna a la ventana principal.



Figura 6.4.5 Ventana para establecer la distancia inter-electrodos inicial.

Con la implementación de un circuito el cual permite detectar la continuidad entre la pieza y herramienta de trabajo es posible establecer la distancia inter-electrodos, esto con el uso de una interrupción la cual usa la variable **estado_continuidad**, la cual al tener un valor entero de "1" indica al sistema mecánico que se ha detectado la continuidad entre la pieza y herramienta de trabajo, de no ser así el sistema mecánico sigue desplazando la herramienta de trabajo hacia la pieza de trabajo. El diagrama esquemático representando este proceso se puede apreciar en la Figura 6.4.6.

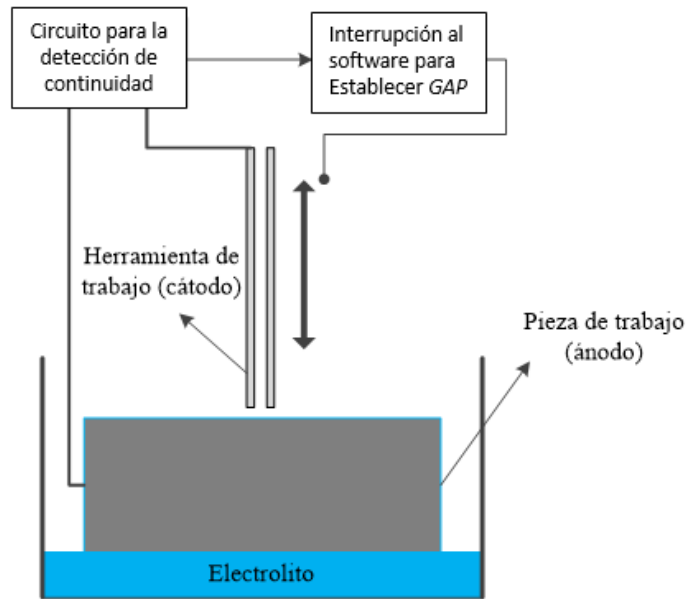


Figura 6.4.6: Detección de continuidad y envío de señal a software.

6.4.3 Inclinación Inter electrodos

Al elegir la opción **Inclinación inter electrodos**, en el menú **Opciones** se despliega una ventana mostrada en la Figura 6.4.7, la cual permite al usuario la posibilidad de saber los grados de inclinación de la pieza de trabajo, esta ventana interactúa con el usuario, solicitando el largo del canal a maquinarse, el sentido en que se requiere realizar el maquinado, así mismo la ventana cuenta con cuatro botones en la parte inferior, el primero de color verde tiene la función de generar la secuencia de pasos para conocer la inclinación de la pieza de trabajo, el segundo botón de color azul y que cuenta con una simbología de un artículo de limpieza, tiene la finalidad al ser presionado de invocar a una función la cual se encarga de limpiar las cajas de texto en caso de que el usuario requiera reingresar los datos del proceso, el tercer botón y de color rojo al ser presionado ejecuta una instrucción la cual cierra la ventana y retorna al usuario a la ventana principal y el último que tiene la simbología para guardar los datos y se almacenan en la base de datos y al generar un reporte del maquinado el usuario conozca las condiciones iniciales del maquinado.

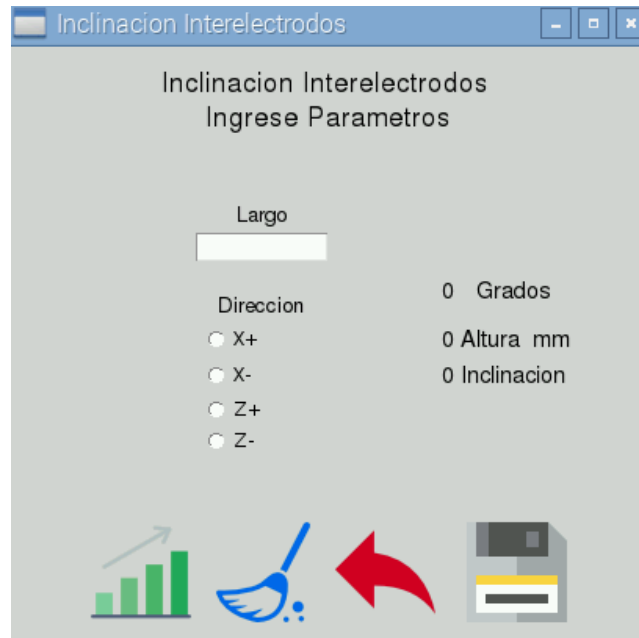


Figura 6.4.7 Ventana Inclinación inter electrodos.

6.4.4 Maquinado

Al elegir **Maquinado lineal**, del menú **Opciones** se despliega la ventana mostrada en la Figura 6.4.8, la cual le permite al usuario la posibilidad de generar maquinado en metales de forma lineal, esta ventana interactúa directamente con el usuario, solicitándole un nombre con el cual se identificara al proyecto también le solicita la profundidad que quiere alcanzar, así mismo cuenta con tres botones en la parte inferior, el primero y de color verde, invoca a una función la cual tiene como finalidad almacenar en una base de datos la información que el usuario ha ingresado con respecto al proyecto, así como ejecuta el código python que se encarga de realizar el maquinado con los parámetros que el usuario ha ingresado, el segundo botón de color azul y que cuenta con una simbología de un artículo de limpieza, tiene la finalidad al ser presionado de invocar a una función la cual se encarga de limpiar las cajas de texto en caso de que el usuario requiera reingresar los datos del proceso, el ultimo botón y de color rojo al ser presionado ejecuta una instrucción la cual cierra la ventana y retorna al usuario a la ventana principal.

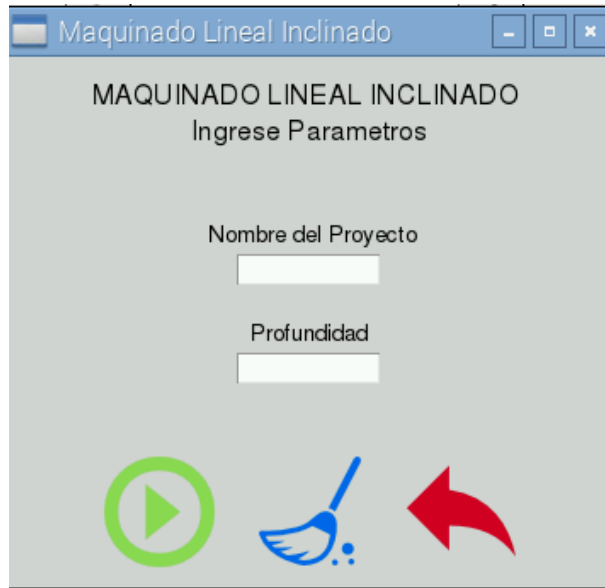


Figura 6.4.8 Ventana Maquinado.

6.4.5 Maquinado lineal

Al elegir **Maquinado lineal**, del menú **Opciones** se despliega la ventana mostrada en la Figura 6.4.9, la cual le permite al usuario la posibilidad de generar maquinado en metales de forma lineal, esta ventana interactúa directamente con el usuario, solicitándole un nombre con el cual se identificara al proyecto también le solicita la longitud lineal que desea se maquine así como la profundidad que quiere alcanzar, además de poder elegir el eje y el sentido en que se requiere hacer el maquinado, cuenta con tres botones en la parte inferior, el primero y de color verde, invoca a una función la cual tiene como finalidad almacenar en una base de datos la información que el usuario ha ingresado con respecto al proyecto, así como ejecuta el código python que se encarga de realizar el maquinado con los parámetros que el usuario ha ingresado, el segundo botón de color azul y que cuenta con una simbología de un artículo de limpieza, tiene la finalidad al ser presionado de invocar a una función la cual se encarga de limpiar las cajas de texto en caso de que el usuario requiera reingresar los datos del proceso, el ultimo botón y de color rojo al ser presionado ejecuta una instrucción la cual cierra la ventana y retorna al usuario a la ventana principal.

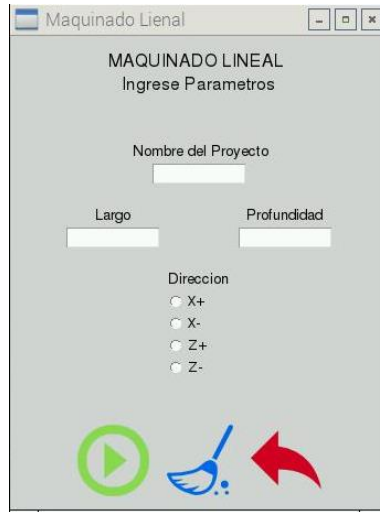


Figura 6.4.9 Ventana Maquinado lineal.

Existe una validación de parámetros la cual evita que el usuario inicie el proceso de maquinado electroquímico sin antes haber establecido todos los parámetros que la sección de maquinado lineal solicita, en caso de no hacerlo el sistema envía un mensaje de aviso mismo que se presenta en la Figura 6.4.10.

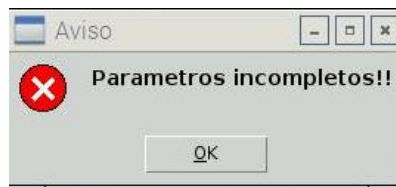


Figura 6.4.10 Mensaje de Aviso en caso de parámetros incompletos.

6.4.6 Maquinado poligonal

Al elegir **Maquinado poligonal** del menú **Opciones**, se despliega una ventana la cual se puede ver en la Figura 6.4.11, la cual permite al usuario poder generar maquinados con formas cuadrangulares o rectangulares, el usuario solo debe ingresar un nombre con el cual se identificara al proyecto de maquinado, el largo y ancho de la forma así como la profundidad, cuenta con 3 botones los cuales desencadenan una serie de eventos, al presionar el primero se inicia el proceso de maquinado bajo los parámetros que el usuario ingreso el segundo de color azul limpia los campos para que se introduzcan valores diferentes y el tercero cierra la ventana.



Figura 6.4.11 Ventana Maquinado poligonal.

En caso de que el usuario omita un campo y este presioné el botón de inicio el sistema muestra un aviso, indicándole al usuario que hace falta algún parámetro, medida de validación para evitar errores lógicos en el proceso de maquinado electroquímico, una imagen mostrando el aviso al usuario se puede apreciar en la Figura 6.4.12.

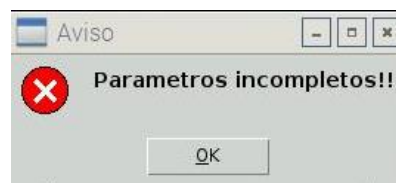


Figura 6.4.12 Mensaje avisando a usuario la falta de algún parámetro.

6.4.7 Desplazamiento mecánico manual

Al seleccionar esta opción del submenú **Opciones**, se despliega una ventana la cual permite al usuario desplazar manualmente el sistema mecánico en la escala de los micrómetros, para desplazar la herramienta de trabajo hasta una posición deseada, el usuario solo debe ingresar la distancia que desea desplazar algún eje, y a continuación presionar el botón correspondiente a dicho eje. La correspondencia de cada eje mecánico con respecto a los botones de la ventana de **Desplazamiento Manual** presentada en la Ilustración 1 se puede apreciar en la Figura &4.13, donde el botón con dirección hacia arriba corresponde al eje Y con sentido positivo, mientras que el boto azul con la flecha en dirección opuesta corresponde al eje Y con sentido negativo, la flecha con dirección a la derecha corresponde al eje X sentido positivo, y la que apunta a la izquierda,

corresponde al eje X con sentido negativo, finalmente la flecha con dirección superior izquierda corresponde al eje Z con sentido negativo, y la Flecha con dirección inferior Derecha corresponde al eje Z con sentido positivo.

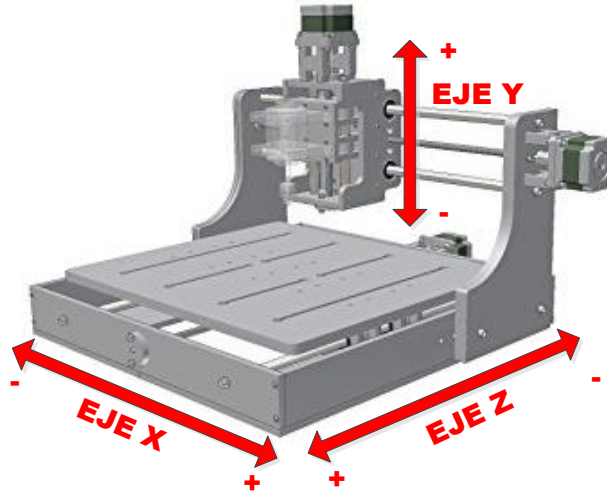


Ilustración 1: Representación de Sistema Mecánico con respecto a Plano Cartesiano Espacial.

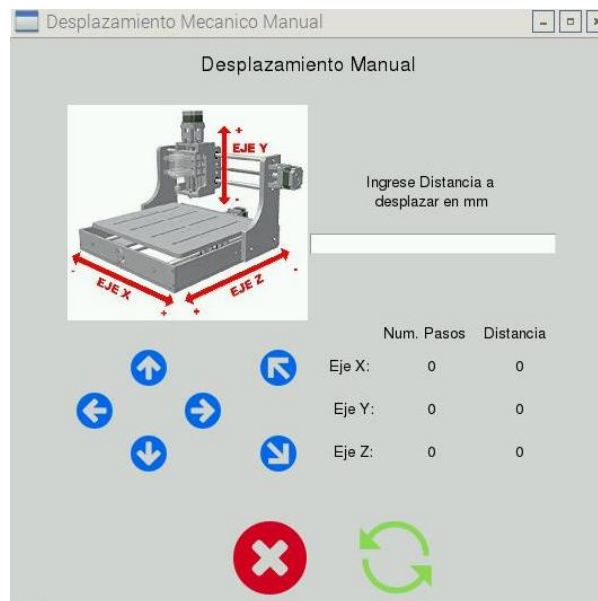


Figura 6.4.13 Ventana Desplazamiento Manual de Software.

El sistema implementa una validación para la variable **Distancia**, la cual compraba que el parámetro ingresado sea válido o en su defecto si el campo esta vacío, esto le permite al sistema evitar errores lógicos en la ejecución del código, lo cual terminaría con la

ejecución del sistema, al detectar que el campo correspondiente a la distancia, contiene un parámetro no valido o esta vacío se despliega un mensaje de aviso al usuario con lo cual se le informa al usuario que se detectó un error o y debe corregirlo, la ventana con el mensaje desplegado se muestra en la Figura 6.4.14.



Figura 6.4.14 Aviso del sistema a detectar error en el parámetro distancia.

6.4.8 Posición de Fabrica

El software implementa una la opción **Posición de Fabrica**, la cual se encuentra en el menú **OPCIONES**, con ella el usuario con solo presionar un botón el cual es de color verde puede posicionar el sistema mecánico en una posición de fábrica en caso de que este se encuentre en una posición no adecuada u óptima para un proceso de maquinado. Al presionar el botón con la simbología de una casa se invoca a una función la cual es la encargada de realizar el posicionamiento del sistema mecánico, con el uso de interrupciones externas las cuales están conectadas a los interruptores de final de carrera del sistema mecánico, es como se logra dicho posicionamiento, primero se mueve el eje X en sentido positivo hasta detectar la señal del interruptor de final de carrera de ese extremo en cuanto se detecta la señal el eje se desplazará en sentido contrario 10 cm, le sigue el eje Y en sentido negativo hasta detectar la señal del interruptor de ese extremo para posteriormente desplazar el eje en sentido opuesto por una longitud de 1 cm, el ultimo eje desplazado es el eje Z en sentido negativo hasta que se detecta la señal del interruptor de final de carrera que corresponde a ese extremo, para finalmente desplazar al eje z en sentido opuesto por una longitud de 7 cm. La ventana cuenta con un segundo botón de color rojo el cual desempeña la función de cerrar la ventana y retornar al usuario a la ventana principal en la Figura 6.4.15.



Figura 6.4.15 Ventana Posición de Fabrica del software.

6.4.9 Configuración de la Fuente

Al elegir **configuración Fuente** del menú **Opciones**, se despliega una ventana la cual se puede ver en la Figura 6.4.16, la cual permite al usuario poder configurar la frecuencia y el ciclo de trabajo a maquinar, así mismo cuenta con 3 botones los cuales desencadenan una serie de eventos, al presionar el primero se inicia el proceso de maquinado bajo los parámetros que el usuario ingreso el segundo de color azul limpia los campos para que se introduzcan valores diferentes y el tercero cierra la ventana.

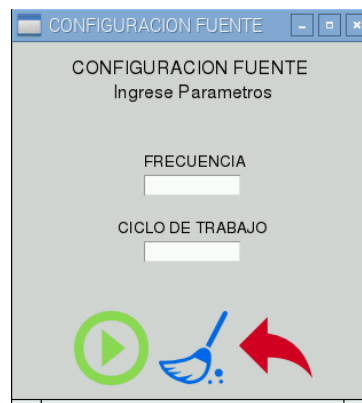


Figura 6.4.16 Ventana configuración de la Fuente.

6.4.10 Atajos Teclado

Al seleccionar esta opción del menú Ayuda se despliega una ventana la cual muestra al usuario una lista con las diferentes partes del software, y la combinación de teclas que debe presionar para ingresar a cada una de ellas, de igual manera que a las otras ventanas se integra un botón de color rojo el cual tiene la función de cerrar la ventana y retornar al

usuario a la ventana principal, en la Figura 6.4.17, se muestra la ventana Atajos de teclado.



Figura 6.4.17 Ventana Atajos de Teclado del software.

6.4.11 Acerca de

La opción **acerca de** del menú **Ayuda**, despliega una ventana en la cual se muestra información respecto al software, la versión y lugar de desarrollo, así como el autor, el botón de color rojo cierra la ventana y retorna al usuario a la ventana principal. En la Figura 6.4.18 se muestra la ventana **Acerca de**.



Figura 6.4.18 Ventana Acerca de del software.

6.4.12 Estado de Maquinado

Esta ventana se despliega cuando desde las opciones **maquinado lineal** y **maquinado poligonal** se inicia el proceso de maquinado, se ejecuta en sincronía con el programa python **maquinado_v2.py**, se muestra el nombre del proyecto que se está maquinado así como el tipo de maquinado (lineal o poligonal), fecha y hora en el que se inició el proyecto, así como la fecha y hora del término del mismo (esta se actualiza cuando se presiona el botón naranja para detener el proceso de maquinado o cuando se alcanzado la profundidad deseada), la magnitud de la corriente de maquinado así como el voltaje de polarización, la profundidad que el usuario desea obtener en el maquinado y la profundidad que se está obteniendo. Cuenta con dos botones, el primero de color naranja detiene el proceso de maquinado si así lo desea el usuario y el de color rojo cierra la ventana **estado de maquinado**, en la Figura 6.19, se puede observar dicha ventana.

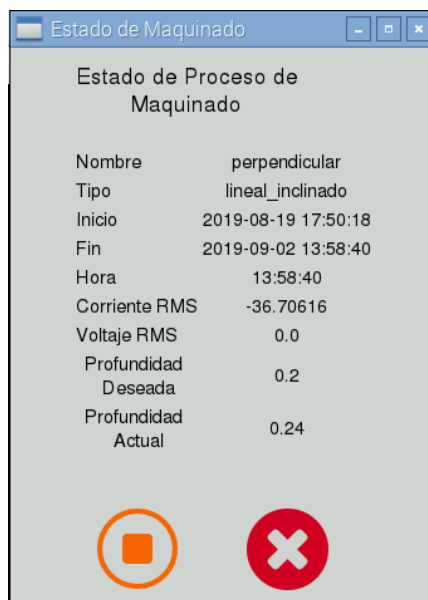


Figura 6.4.19 Ventana Estado de Maquinado software.

Cuando el usuario presiona el botón naranja para detener el proceso de maquinado se despliega una ventana con un mensaje, donde el sistema corrobora que el usuario quiera detener el proceso dicha ventana se muestra en la Figura 6.4.20.

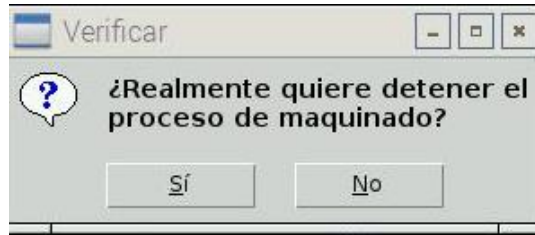


Figura 6.4.20 Ventana de verificación para paro de maquinado.

En el caso de que el usuario no dese realmente detener el proceso de maquinado se presiona el botón con la etiqueta **No**, lo cual despliega un mensaje haciendo referencia a esa opción, mismo que se puede observar en la Figura 6.4.21.

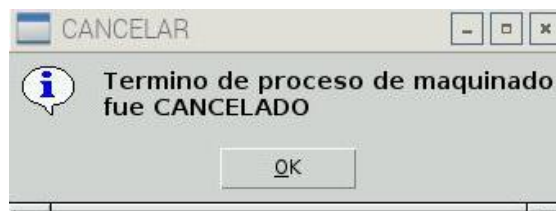


Figura 6.4.21 Mensaje informativo de cancelación de paro de maquinado.

Con lo cual el proceso de maquinado continua sin complicaciones, en el caso de que el usuario presione la opción **Si**, se despliega un mensaje en el cual se informa al usuario que el proceso de maquinado será detenido y al presionar el botón **OK**, se cierra la ventana del mensaje y se detiene de manera instantánea el proceso de maquinado.

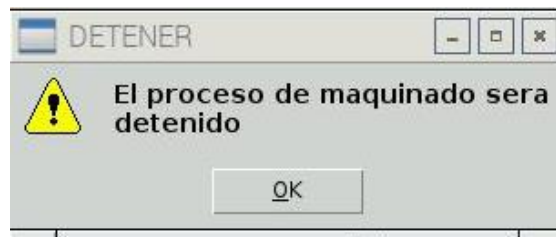


Figura 6.4.22 Mensaje informativo de paro del maquinado.

6.5 Sistema Físico

En la Figura 6.5.1 se presenta una imagen completa del sistema computacional en su versión 5 donde se puede apreciar:

1. El sistema mecánico de ejes coordenados.
2. El sistema de filtrado del electrolito.

3. La Raspberry Pi y el conjunto de circuitos de mando.
4. La herramienta y pieza de trabajo.
5. Recipiente del electrolito.
6. Fuentes de energía.
7. Interfaz gráfica.

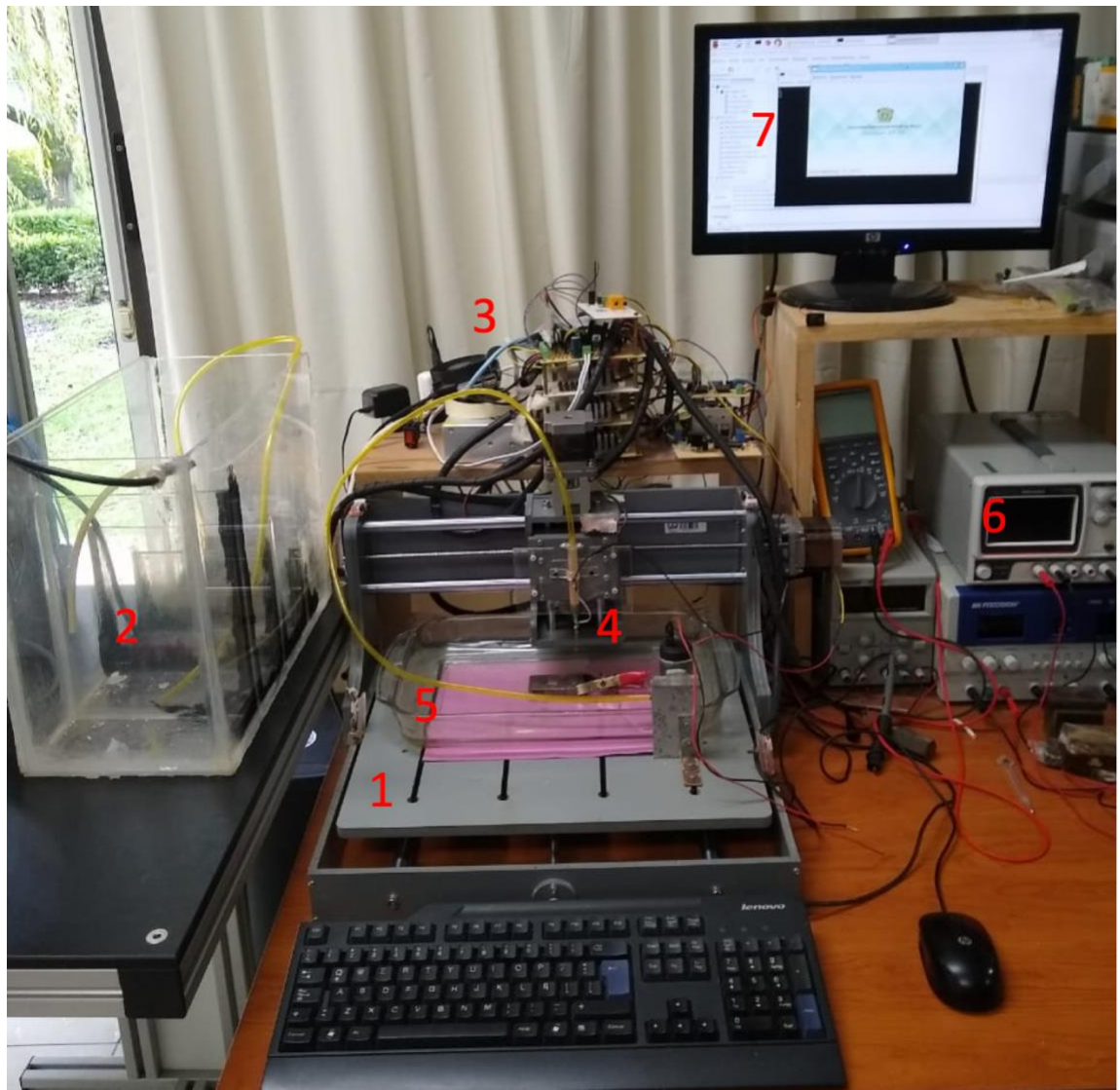


Figura 6.5.1 Sistema Físico del proceso PECMM

CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de cómputo, el cual permite mantener constante una remoción de material en un proceso de micro maquinado electroquímico por pulsos, esto de forma automática, basado en un algoritmo de control difuso, que permite mantener una distancia inter-electrodos constante, inclusive si la pieza de trabajo tiene deformaciones físicas o perturbaciones.

Al integrar una fuente pulsada al proceso de maquinado electroquímico permite reducir el sobre corte al termino de la prueba y en base a caracterización fue posible definir los parámetros idóneos para la configuración de los parámetros Ciclo de trabajo y Frecuencia de la fuente pulsada. Al configurar la Frecuencia de la fuente pulsada a 40 o 50 kHz a un ciclo de trabajo del 50 %, el efecto de sobre corte se reduce un 47%, esto en comparación con la polarización CD.

El controlar la distancia inter-electrodos mediante la técnica de lógica difusa monitoreando la corriente maquinando permitió mantener una distancia inter-electrodos constante y con ello realizar canales lineales los cuales mantienen constante la profundidad, aun cuando el sistema se somete a perturbaciones; demostrando la adecuada funcionalidad del controlador bajo distintas condiciones.

La respuesta a perturbaciones en el proceso de micro maquinado electroquímico permite definir el potencial de utilizar lógica difusa en procesos de manufactura no convencional. El error de la profundidad resultante en las pruebas iniciales del proceso PECMM era de 10 μ m, logrando disminuir el error a 7.9 μ m; esto se logró al momento de mantener una remoción de material de forma constante, reajustando el área de exposición del electrodo en ecuación de la estimación de la distancia inter-electrodos debido a que si el sistema de cómputo detecta que la remoción de material disminuye, de forma automática reajusta para mantener la estabilidad en la eliminación de material constante.

El sistema de cómputo desarrollado permite el movimiento manual, con la finalidad de posicionar la herramienta de trabajo en la posición que el usuario lo desee, además permite la calibración automática del sistema mecánico, de igual forma se cuenta con interruptores

de final de carrera como protección, a fin de evitar daños físicos a causa de fallas lógicas de operatividad.

El software se desarrolló bajo el lenguaje Python, el cual es un lenguaje de programación de código abierto, de igual forma el software se vuelve portable desde secciones operativas hasta la parte gráfica, teniendo como ventaja el poder duplicar el sistema solo siendo necesario la instalación de los paquetes y configuraciones básicas.

La interfaz gráfica se desarrolló utilizando la librería TKINTER de Python, haciendo la ejecución del sistema a medida, debido a que debe de ser capaz de ejecutarse en la SBC, la cual es una computadora de un tamaño reducido cuyas capacidades de procesamiento son menores a las de una computadora convencional de hoy en día, teniendo como resultado una interfaz de usuario ágil y ligera en ejecución, por lo tanto, fue posible realizar el control y ejecución de todo el sistema de cómputo.

El sistema permite la generación de maquinados lineales y poligonales de forma automática, donde únicamente el usuario debe ingresar los parámetros básicos de operación y el sistema de control realiza de forma automática el proceso. Al término del proceso de maquinado se detiene el sistema mecánico y se genera un archivo con extensión “xls”, que almacena las magnitudes de interés para su posterior análisis.

7 Referencias

Clifton, D., Mount, A. & Alder, G., 2002. Ultrasonic measurement of the inter-electrode gap in electrochemical machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42(1), pp. 1259-1267.

Catarino Aguilar , O., 2017. *Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un procesos de Maquinado Electroquímico*. México: Universidad Autonoma del Estado de México, Atlacomulco.

Chazallet L., S., 2013. *Python 3: Los fundamentos del Lenguaje*. Segunda ed. Argentina: Ediciones ENI.

León Hernández, O. A., 2013. Diseño de un generador de pulsos para un sistema de Micromanufactura por Electroerosión. En: *Tesis de Maestría en Ingeniería*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 10-23.

Lilong, Baoji, M., Cheng, P. & Yun, K., 2018. Effect of Power Signal Waveform on Shape Accuracy in Electrochemical Drilling. *Materials Science and Engineering*, Volumen 392, pp. 1-8.

Lijo, P. & Somashekhar Shambulingayya , H., 2012. Parametric analysis and a soft computing approach on material removal rate in electrochemical discharge machining. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 24(1), pp. 23-29.

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.

Correa Espinoza , A., 2017. Desarrollo de sistema para manejo de 3 ejes implementado a una Máquina de Control Numérico. En: *Tesis* . México: Universidad Autonoma del Estado de México, pp. 19-24.

LXDE, O., 2005. *LXDE*. [En línea] Available at: <https://lxde.org/> [Último acceso: 10 Agosto 2018].

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

Andonian, M., Timperson, R. & Closkey, M., 2017. Sensing and control interface for precise gap control. *Mechatronics*, 2(1), pp. 45-51.

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

Bährea, D., Weberb, O. & Rebschlägerb, A., 2013. Investigation on pulse electrochemical machining characteristics of lamellar cast iron using a response surface methodology-based approach. *Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)*, 16(62), pp. 362-367.

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

Bravo, J. L., 2018. *Modelado del proceso de maquinado ECDM mediante lógica difusa*. 1ª Edición ed. Saltillo: COMIMSA.

Diciembre Sanahuja, S., 2017. Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK). *Grado en Matematica Computacional*, 2 Octubre, pp. 55-60.

Diver, C., Atkinson, J., Helml, H. & Li, L., 2012. Micro-EDM drilling of tapered holes for industrial applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(3), pp. 296-303.

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

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

Gilfillan, L., 2006. *La biblia de MySQL*. Segunda ed. Madrid: ANAYA MULTIMEDIA.

- González, L. W. H., Rodríguez, R. P., Dumitrescu, L. & Sarmiento, R. M., 2015. Study of influences of cutting variables on superficial integrity and deflections in milling of AISI 1018 steel. *Tecnología en Marcha*, 28(4), pp. 25-41.
- Granda Gutiérrez, E. E. y otros, 2015. Remoción de material en diversos electrolitos durante el Maquinado Electroquímico de aceros de Alta Resistencia. *Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica*, 37(1), pp. 25-30.
- Grover P., M., 2010. *Fundamentos de Manufactura Moderna*. 4° ed. México: Mc GrawHill.
- Grujic, G., Lozanov Crvenkovic, Z. & Štajner Papuga , I., 2017. General fuzzy integral as a base for estimation of fuzzy quantities. *Fuzzy Sets and Systems* , 1(1), pp. 3-12.
- Gutiérrez Pulido, H. & De la Vara Salazar, R., 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda ed. México: Mc-Graw-Hill.
- Hassan, A. & Gawad , E.-H., 2005. *Advanced Machining Processes*. 5° ed. Alexandria: McGraw-Hill.
- Hostetter, G. H., 2005. *Sistemas de Control*. Cuarta ed. Madrid: McGraw Hill.
- Hung Lea, V. & Khanh Tran, D., 2018. Extending fuzzy logics with many hedges. *Fuzzy Sets and Systems*, 1(1), pp. 45-52.
- Klocke, F. y otros, 2016. Results of Surface Integrity and Fatigue Study of PECM and PEO processed γ -TiAl for Turbine Applications. *Procedia CIRP*, 19(3), pp. 131-136.
- Kalpakjian , S. & R. Schmid, S., 2005. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología..* 2° ed. s.l.:Prentice Hall.
- Katz, Z. & Tibbles J., C., 2012. Analysis of micro-scale ECM Process. *The International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 35(154), 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.

Martín del Brío, B. & Sanz Molina, A., 2012. *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*. Tercera ed. México: Alfaomega Ra-Ma.

Martinez Alvarado , R., Granda Gutierrez , E. E., Zuñiga, L. M. & Guerrero , R., 2015. Pulsed Power Supply for Electrochemical Machining. *2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 3(15), pp. 1-6.

Martos Rubio , A., 2017. *Introducción a la Informática*. Barcelona: Anaya Multimedia.

Mohd , A., Sarkheyli , A., Mohd Zain , A. & Habibollah, H., 2013. Fuzzy logic for modeling machining process: a review. *Artificial Intelligence Review*, 43(3), pp. 345-349.

Ogata, K., 1996. *Sistemas de control en tiempo directo*. Madrid: Prentice-Hall.

Patt N., Y. & Patel J., S., 2004. *Introducción a los sistemas de Cómputo*. España: Mc Graw Hill.

Paulo Davim, J., 2012. Chapter 5. En: *Nontraditional Machining Processes*. New York: Springer, pp. 153-176.

Pulido, H. G. & Salazar, R. D. I. V., 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda ed. México: Mc Graw Hill.

Rodríguez, P. R., 2018. *Inteligencia Artificial*. 1ª edición ed. México: Deusto.

R. P. C., 2018. *Raspberry Pi*. [En línea] Available at: <https://www.raspberrypi.org> [Último acceso: 2018 Agosto 9].

S. Pressman, R., 2012. *Ingeniería de Software un enfoque Práctico*. 7 ed. México: Mc Graw Hill.

Sengottuvel, P., Satishkumar, S. & Dinakaran, D., 2013. Optimization of Multiple Characteristics of EDM Parameters Based on Desirability Approach and Fuzzy Modeling. *Procedia Engineering*, Volumen 64, pp. 1069-1078.

Shabgard, M., Badamchizadeh, M. & G. Ranjbar, K., 2013. Fuzzy approach to select machining parameters in electrical discharge machining (EDM) and ultrasonic-assisted EDM processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), pp. 32-39.

SUMITEC, 2018. *Hoja de datos Acero AISI 1018*. [En línea] Available at: <http://www.deinoxidable.mx/AISI%201018.pdf> [Último acceso: 5 Abril 2019].

Tanaka, K., 2012 . *An Introduction to Fuzzy Logic for Practical Applications*. New York, NY, United States: Prime.

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.

W. Nugroho, A., Sudarisman, B. Nurahman , . M. & Septiaji, P., 2016. Overcut and material removal rate on electrochemical machining of aluminum and stainless steel using isolated brass electrode. *2016 2nd International Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE)*, pp. 69-72.

Xu Yu, Z. y otros, 2016. Electrochemical Machining of High-temperature Titanium Alloy Ti60. *Procedia CIRP*, 42(1), pp. 125-130.

Yong, L., Yunfei, Z. & Guang, Y., 2003. Localized electrochemical micromachining with gap control. *Sensors and Actuators A: Physical*, 108(3), pp. 144-148.

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.