



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO



“SISTEMA ASISTIDO POR COMPUTADORA PARA LA REMOCIÓN
CONTROLADA DE MATERIAL EN UN PROCESO DE MAQUINADO
ELECTROQUÍMICO”

T E S I S

Que para obtener el Grado Académico de:

Maestro en Ciencias de la Computación

Presenta:

OCTAVIO CATARINO AGUILAR

Director de Tesis:

DR. JOSÉ ARTURO PÉREZ MARTÍNEZ

Agosto de 2017



Atlacomulco, Estado de México a 1 de Agosto de 2017.

DR. EN C.I.E. JOSÉ ARTURO PÉREZ MARTÍNEZ
DR. EN C.I.E. EVERARDO EFRÉN GRANDA GUTIÉRREZ
M. EN C. JUAN FERNÁNDO GARCÍA MEJÍA
P R E S E N T E

Por este medio comunicamos a ustedes que la Comisión Revisora de Proyectos de Tesis acordó nombrarlos REVISORES del trabajo de TESIS titulado:

“SISTEMA ASISTIDO POR COMPUTADORA PARA LA REMOCIÓN CONTROLADA DE MATERIAL EN UN PROCESO DE MAQUINADO ELECTROQUÍMICO”

Que presenta el **C. OCTAVIO CATARINO AGUILAR**, egresado del Programa de la Maestría en Ciencias de la Computación, al mismo tiempo que solicito a ustedes de la manera más atenta, que al concluir su revisión sean tan amables de comunicar por escrito su VOTO APROBATORIO es esta Coordinación.

ATENTAMENTE

PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

“2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

DR. EN C.I.E. ALLAN ANTONIO FLORES FUENTES
COORDINADOR DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO

Recibi original.

Everardo E. Granda Gt.

01/AGO/17

Recibi
JOSÉ ARTURO PÉREZ

01/AGO/2017

Km. 60 Carretera Toluca – Atlacomulco
C.P. 50450
Atlacomulco, Estado de México
Tels. (712) 122 04 36, 122 04 46, 122 0535
e-mail: cuatla@uaemex.mx
Centro Universitario UAEM Atlacomulco





Universidad Autónoma del Estado de México
Centro Universitario UAEM Atlacomulco

Atlacomulco, Estado de México a 17 de Agosto de 2017.

Dr. en C.I.E. Allan Antonio Flores Fuentes
Coordinador del Programa de Maestría en Ciencias de la Computación
Centro Universitario UAEM Atlacomulco

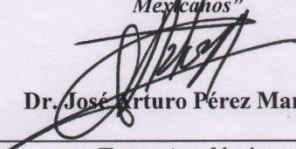
PRESENTE

Por este medio comunicamos a usted que la Comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada “*SISTEMA ASISTIDO POR COMPUTADORA PARA LA REMOCIÓN CONTROLADA DE MATERIAL EN UN PROCESO DE MAQUINADO ELECTROQUÍMICO*”, que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Maestría en Ciencias de la Computación presenta el **C. Octavio Catarino Aguilar** con el número de cuenta **920006** para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y de calidad necesarios para proceder la impresión del mismo.

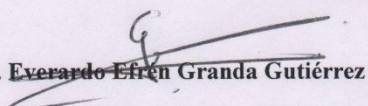
ATENTAMENTE

PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

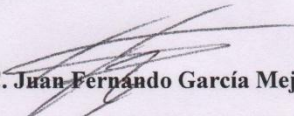
“2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”


Dr. José Arturo Pérez Martínez

Tutor Académico


Dr. Everardo Efrén Granda Gutiérrez

Tutor Adjunto


M. en C. Juan Fernando García Mejía

Tutor Adjunto

Km. 60 Carretera Toluca – Atlacomulco
C.P. 50450
Atlacomulco, Estado de México
Tels. (712) 122 04 36, 122 04 46, 122 0535
e-mail: cuatla@uaemex.mx
Centro Universitario UAEM Atlacomulco





DICTAMEN PARA LA AUTORIZACIÓN DE GRADO DE MAESTRÍA

Atlacomulco, Estado de México a 17 de Agosto de 2017.

TÍTULO DEL PROYECTO: "SISTEMA ASISTIDO POR COMPUTADORA PARA LA REMOCIÓN CONTROLADA DE MATERIAL EN UN PROCESO DE MAQUINADO ELECTROQUÍMICO"

TESISTA: Octavio Catarino Aguilar

DICTAMEN:

NO. DE REVISIÓN: 1

- RECHAZADO
 SUJETO A MODIFICACIONES
 ACEPTADO, CONDICIONADO
 ACEPTADO

OBSERVACIONES GENERALES: Aceptado para su Impresión.
Aceptado para su defensa de grado.

Tutor Académico <u>Dr. José Arturo Pérez Martínez</u> 	Tutor Adjunto <u>Dr. Everardo Efrén Granda Gutiérrez</u> 	Tutor Adjunto <u>M. en C. Juan Fernando García Mejía</u>
--	---	---



DEDICATORIAS

Dedico este proyecto y mi formación profesional a mi madre por su constante apoyo y palabras de aliento, y por enseñarme a nunca rendirme sin importar que tan duro nos golpee la vida. *“Este logro no es mío, si no tuyo mamá”*.

A mis compañeros y al día de hoy AMIGOS de posgrado, por compartir alegrías, rizas y tristezas, por hacer más amena mi estadía durante estos dos años, espero que, como yo, ustedes se lleven más de con lo que llegamos, sin duda alguna tres de las más grandiosas personas que he conocido.

Ing. Aracely, Ing. Laura, Ing. Juan.

A mis compañeros de laboratorio y hoy COLEGAS, por permitirme convivir con ustedes, por apoyarme en todo lo que les fue posible, por darme la oportunidad de compartir los pocos conocimientos que poseo, y por su gran honestidad, les recuerdo que tienen en mí una amistad sincera y un apoyo desinteresado.

Tania, Gustavo, Brayan, Iván, David, Israel.

Al Sr. Cirilo González Hernández, por hoy permitirme poder llamarlo AMIGO, por demostrarme que, si existen personas únicas y libres de dobles intenciones, y porque con cada platica que tengo con usted se refuerza esa idea que usted mismo me inculco *“nosotros debemos ser el cambio que queremos ver en este mundo”*.

AGRADECIMIENTOS

Al consejo nacional de ciencia y tecnología por el apoyo económico brindado durante el posgrado, mismo que fue de vital importancia para poder desarrollar el proyecto.

A la Universidad Autónoma del Estado de México por haberme dado la oportunidad de tener una formación profesional, así como por las infraestructura y equipo necesario para la realización de este proyecto.

A mi asesor de tesis el DR. JOSÉ ARTURO PÉREZ MARTÍNEZ por permitirme trabajar a su lado durante este largo periodo, por los consejos y enseñanzas que me brindo durante el posgrado, pero más que nada, por la confianza que deposito en mí y por no dejar de alentarme en seguir adelante. “muchas gracias!!”

A mis asesores adjuntos el Dr. Everardo Efrén Granda Gutiérrez y al M. en C. Juan Fernando García Mejía, porque sin su constante apoyo la culminación de este proyecto hubiera sido imposible.

Un Maestro debe de INSPIRAR y eso en mi lo lograron, gracias a ustedes Dr. José Arturo, Dr. Everardo Efrén, Dr. Carlos Eduardo, Dr., Allan Antonio, Dr. Roberto Alejo, M. en C Juan Fernando y M. en C. Héctor Caballero, por brindarme todos los conocimientos que les fue posible dentro y fuera del aula de clases, sin importar el grado que alcance ustedes serán merecedores de mi respeto y admiración, *“siempre serán mis MAESTROS”*.

RESUMEN

En el presente trabajo se expone el desarrollo de un sistema cuya finalidad es obtener una remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico (ECM, por sus siglas en inglés), mediante la estimación de la distancia Inter electrodos al monitorear las variables eléctricas de voltaje de polarización y la corriente de maquinado.

El sistema permite monitorear y visualizar la magnitud de las variables involucradas en el proceso de maquinado (Voltaje de polarización, Corriente de maquinado, Distancia Inter electrodos, profundidad del maquinado) durante la ejecución del proceso. Se presentan las diferentes etapas de desarrollo, una descripción de los conceptos, términos y herramientas usadas, posteriormente se presenta la metodología, la etapa de diseño mediante la cual fue posible modelar el sistema haciendo uso del modelo por prototipos que se emplea en Ingeniería del software ya que permite cubrir los requerimientos hasta alcanzar una versión final, le sigue la etapa de pruebas y resultados, donde se evaluó el funcionamiento del sistema mediante pruebas de maquinado y así comprobar la hipótesis del trabajo de investigación. Por ultimo las conclusiones, así como las propuestas para trabajos a futuro.

La construcción del prototipo fue realizada con el uso de un sistema mecánico de 3 ejes coordenados, mismos que son desplazados por motores paso a paso NEMA 23, y que generar un movimiento lineal de 8mm en los ejes coordenados por cada revolución del motor, el software 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 10-18 el cual es un acero comercial y como electrolito se usó una solución acuosa de $H_2O + NaCl$, en una concentración del 20% Kg/L.

ABSTRACT

In the present work the development of a system whose purpose is to obtain a controlled removal of material in an electrochemical machining process (ECM) by means of the estimation of the distance Inter electrodes when monitoring the electrical variables of Polarization voltage and the machining current.

The system allows monitoring and visualizing the magnitude of the variables involved in the machining process (Bias Voltage, Machining Current, Inter-electrode Distance, Machining Depth) during the execution of the process. The different stages of development are presented, a description of the concepts, terms and tools used, later the methodology is presented, the stage of design through which it was possible to model the system using the prototype model that is used in Software Engineering Since it allows to cover the requirements until reaching a final version, is followed by the stage of tests and results, where the operation of the system is evaluated by means of tests of machining and thus check the hypothesis of the research work. Finally, the conclusions, as well as the proposals for future work.

The construction of the prototype was done using a mechanical system of 3 coordinate axes, which are displaced by NEMA 23 stepping motors, and that generate a linear movement of 8 mm in the axes coordinated by each engine revolution, the software Was developed under the Python programming language using the 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 H₂O + NaCl was used in a concentration of 20% Kg / L.

ÍNDICE

DEDICATORIAS	ii
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
2.1 Objetivos de investigación	4
2.1.1 Objetivo General	4
2.1.2 Objetivos específicos	4
2.2 Preguntas de investigación.....	5
2.3 Justificación.....	5
2.4 Impactos	6
3 HIPÓTESIS	7
4 ESTADO DEL ARTE	8
4.1 Manufactura avanzada.....	8
4.2 Método de Maquinado Electroquímico (ECM).....	8
4.3 En Sistema computacional	15
4.4 Ingeniería de software	17
4.5 SysML	19
5 METODOLOGÍA.....	21
5.1 Diseño del sistema computacional	21

5.2	Diagrama de requisitos.....	21
5.3	Diagrama de flujo del sistema computacional.....	23
5.4	Diagrama de caso de usos.	23
5.5	Diagrama de distribución.	25
5.6	Diagrama de secuencia.	27
5.7	Construcción del prototipo.	30
5.8	Fabricación del circuito de mando para sistema mecánico.	30
5.9	Sistema de recirculación de electrolito.....	32
1.1.1	Etapa de Adquisición de Datos.	34
5.10	Codificación del sistema computacional.....	36
5.11	Versión 1 del sistema computacional.....	39
5.12	Versión 2 del sistema computacional.....	40
5.13	Versión 3 del sistema computacional.....	43
5.14	Versión 4 del sistema computacional.....	46
5.15	Versión 5 del sistema computacional.....	50
5.15.1	Establecer distancia inter electrodos inicial.	53
5.15.2	Maquinado lineal.....	56
5.15.3	Maquinado poligonal	58
5.15.4	Desplazamiento mecánico manual.....	61
5.15.5	Posición de Inicio.....	63
5.15.6	Estado de Maquinado.....	65
5.15.7	Atajos de Teclado.....	68
5.15.8	Ventana Acerca de	69
5.15.9	Proceso de maquinado.....	70
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	76

6.1	Maquinados.....	76
6.1.1	Prueba de maquinado lineal.....	80
6.1.2	Prueba de maquinado poligonal.....	83
6.1.3	Costo computacional.....	87
	CONCLUSIONES	88
	REFERENCIAS.....	91
	ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.2: Características de Raspberry Pi B+.	16
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1: Principio de ECM (A) antes de la remoción, (B) durante la remoción.	9
Figura 4.2: Reacciones químicas que ocurren en el proceso ECM.....	10
Figura 4.3: Componentes del Maquinado Electroquímico.	14
Figura 4.4 Estructura del modelo por prototipos	19
Figura 5.1: Diagrama de Requisitos para el sistema computacional del proceso ECM. .	22
Figura 5.2: Diagrama de Flujo del funcionamiento del sistema computacional.....	23
Figura 5.3: Diagrama de Caso de usos del sistema computacional.	25
Figura 5.4: Diagrama de Distribución de las partes físicas y lógicas del sistema computacional.	27
Figura 5.5: Diagrama de Secuencia del funcionamiento del sistema computacional.	29
Figura 5.6: Circuito de Mando para Motores Paso a Paso.....	32
Figura 5.7: Sistema de recirculación del electrolito.....	33
Figura 5.8: Diagrama a bloques de la conexión eléctrica de los sensores de voltaje y corriente.....	34
Figura 5.9: Diagrama de conexión del sensor de corriente ASC712.....	35
Figura 5.10: Divisor de voltaje para Adquisición de voltaje de polarización.	36
Figura 5.11: Conexión del convertidor A/D MCP3204 a la Raspberry Pi.....	36
Figura 5.12: Habilitación del puerto SPI.....	37
Figura 5.13: Diagrama de flujo del proceso de Adquisición del voltaje de polarización y la corriente de maquinado datos.....	38
Figura 5.14: Representación de los ejes coordenados dentro del Sistema Mecánico.	40
Figura 5.15: Interfaz gráfica para sistema mecánico.	40
Figura 5.16: Conexión eléctrica para establecer la distancia inicial inter electrodos.	41
Figura 5.17: Versión 2 de la interfaz gráfica del proceso de maquinado electroquímico.	42
Figura 5.18: Pruebas de ECM para Caracterización (a), (b), (c).....	43
Figura 5.19: Diagrama de Flujo de funcionamiento para la versión 3 del sistema computacional.	44
Figura 5.20: Interfaz gráfica de la versión 3 del sistema computacional.....	45

Figura 5.21: Prueba de maquinado electroquímico con la tercer versión del sistema computacional.	45
Figura 5.22: Maquinado lineal ideal de un canal de 4mm de longitud.	46
Figura 5.23: Diagrama de flujo para un maquinado vertical y horizontal basada en la ecuación para remoción controlada.	49
Figura 5.24: Diagrama a bloques del funcionamiento de la ventana principal.	50
Figura 5.25: Ventana Principal Sistema CAMECM.	51
Figura 5.26: Submenú Archivo.	51
Figura 5.27: Submenú Opciones.	52
Figura 5.28: Submenú Ayuda.	53
Figura 5.29: Diagrama a bloques del sistema CAMECM mostrando las secciones de las que está compuesto.	53
Figura 5.30: Detección de continuidad y envió de señal a software CAMECM.	54
Figura 5.31: Diagrama de flujo de funcionamiento de Ventana Distancia Inter electrodos.	55
Figura 5.32: Ventana para establecer Distancia Inter electrodos inicial.	56
Figura 5.33: Ventana Maquinado lineal.	57
Figura 5.34: Mensaje de aviso en caso de parámetros incompletos.	57
Figura 5.35: Diagrama de flujo de funcionamiento para Ventana Maquinado Lineal.	58
Figura 5.36: Ventana del proceso de Maquinado poligonal.	59
Figura 5.37: Mensaje avisando a usuario la falta de algún parámetro.	59
Figura 5.38: Diagrama de Flujo de Ventana Maquinado Poligonal.	60
Figura 5.39: Ventana Desplazamiento Manual de Software CAMECM.	61
Figura 5.40: Diagrama de flujo de ventana Desplazamiento Manual.	62
Figura 5.41: Aviso del sistema a detectar error en el parámetro DISTANCIA.	63
Figura 5.42: Ventana Posición de Inicio del software.	64
Figura 5.43: Diagrama de flujo ventana Posición de Inicio.	65
Figura 5.44: Ventana Estado de Maquinado.	66
Figura 5.45: Ventana de verificación para el paro del maquinado.	67
Figura 5.46: Mensaje informativo de cancelación de paro de maquinado.	67
Figura 5.47: Mensaje informativo de paro del maquinado.	67

Figura 5.48: Diagrama de flujo Ventana Estado Maquinado software CAMECM.	68
Figura 5.49: Ventana Atajos de Teclado.	69
Figura 5.50: Ventana Acerca de.	69
Figura 5.51: Diagrama de flujo del código maquinado (A)	72
Figura 5.52: Diagrama de flujo del código maquinado (B)	73
Figura 5.53: Imagen del Sistema computacional Completo.	75
Figura 6.1: Variación de la corriente de maquinado en proceso ECM.	77
Figura 6.2: Evolución de la distancia inter electrodos en función del tiempo, como una manifestación de la remoción de material (ensanchamiento del gap).....	79
Figura 6.3: Corriente de maquinado en prueba de maquinado lineal, donde se aprecia el comportamiento de la corriente, cada vez que la herramienta de trabajo desciende verticalmente.	81
Figura 6.4: Comportamiento de la distancia inter electrodos en proceso de maquinado lineal.	82
Figura 6.5: Voltaje de polarización en prueba de maquinado lineal.	82
Figura 6.6: Resultado de prueba de maquinado lineal.	83
Figura 6.7: Corriente de maquinado en prueba de maquinado poligonal, donde se aprecia el comportamiento de la corriente, cada vez que la herramienta de trabajo desciende verticalmente.	85
Figura 6.8: Comportamiento de la distancia inter electrodos en proceso de maquinado poligonal.	86
Figura 6.9: Resultado de Maquinado Poligonal.	87

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día la demanda de piezas de tamaño reducido en diferentes campos, tales como en la industria metalmecánica, médica, automotriz, aeronáutica, robótica van en aumento, dado que se requiere fabricar piezas de materiales altamente resistentes, es complicado y costoso fabricar con métodos de manufactura tradicional, como lo es el barrenado, fresado y torneado mecánico [1].

Los procesos de manufactura tradicionales son aquellos en los cuales la herramienta de trabajo tiene un contacto directo con la pieza, causando un desgaste de ambos componentes derivado de la fricción entre las mismas. Por otra parte, existen procesos de manufactura no convencional tales como el Maquinado Electroquímico (ECM por sus siglas en inglés, Electro Chemical Machining) o Maquinado por Descarga Eléctrica (EDM Electrical Discharge Machining); en estos procesos no existe contacto físico entre la herramienta y la pieza de trabajo y permiten fabricar piezas de tamaño reducido en materiales conductores de la electricidad [1]. Dentro del proceso de maquinado electroquímico existe una variable denominada gap (del inglés: espacio) que se refiere a la distancia entre el electrodo encargado del desbastado y la pieza de trabajo. En este documento esta variable se ha definido como “distancia inter electrodos”; esta distancia debe de ser constante ya que existe una relación inversa entre la velocidad de remoción de material y el gap, además, si la distancia se reduce, puede llegar al punto en que haya contacto entre la pieza de trabajo y el electrodo, ocasionando que la corriente aumente drásticamente hasta una condición de corto circuito, poniendo en riesgo la electrónica asociada a la polarización, o incluso dañando el electrodo o la pieza de trabajo . Actualmente, un reto con este tipo de tecnología es el de poder obtener una remoción controlada de material, donde la problemática principal es que no es posible medir con precisión la distancia inter electrodos durante el proceso de maquinado.

D. Mi y W. Natsu, en el trabajo “Proposal of ECM method for holes with complex internal features by controlling conductive area ratio along tool electrode”, abordan el problema de poder realizar barrenos uniformes en materiales de alta dureza por medio del maquinado electroquímico; proponen el uso de un electrodo conductor helicoidal cubierto de un material aislante que durante el proceso de maquinado se hace girar, con la finalidad

de tener perforaciones uniformes; D. Mi destaca la importancia de la distancia inter electrodos como una variable que afecta directamente la remoción de material en el proceso [2].

En el trabajo “Diseño y prueba de un Sistema de Control de Espaciamento y Potencia para Micro-EDM” [3], se presenta el desarrollo y evaluación de una máquina de Micro-EDM, la cual utiliza un circuito de control que realiza el desplazamiento vertical del eje coordenado que soporta el electrodo encargado de la remoción de material; su avance está determinado por la frecuencia a la que se generan las descargas del EDM y de la cantidad tentativa de material que se remueve en cada descarga. El objetivo de esta investigación es contar con un proceso de fabricación tridimensional de precisión con materiales conductores de alta dureza. El prototipo es capaz de maquinarse piezas en el orden de los milímetros. El alcance del proyecto se enfocó en obtener una remoción de material constante para generar barrenos con forma geométrica uniforme, con diámetro de 700 μm . El proceso EDM presenta un inconveniente significativo, ya que el electrodo encargado del desbastado sufre un desgaste en relación con el uso, lo que implica realizar el cálculo de la distancia entre la pieza de trabajo y el electrodo y en un lapso de tiempo la necesidad de reemplazar el electrodo, a diferencia del proceso de manufactura por ECM en donde el electrodo no sufre desgaste [4].

El maquinado electroquímico es un proceso de manufactura avanzada que involucra múltiples variables que pueden afectar el resultado del maquinado; estas variables pueden ser eléctricas (por el uso de fuentes de potencia, sensores y motores), mecánicas (debido a la tolerancia en el desplazamiento, la velocidad de avance) o químicas (concentración del electrolito), lo anterior hace necesario contar con un modelo del proceso donde se involucren tales variables.

K. Altena y A. Harmen, en su trabajo “Precision ECM by Process Characteristic Modelling”, 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 Electroquímico [5].

Villagómez y Espinoza, en el artículo “Diseño de una Plataforma para Micromaquinado por Electroerosión (EDM) y/o Electroquímico (ECM)”, explican la importancia de llevar a cabo el proceso mediante un sistema asistido por computadora, por lo que desarrollaron un sistema, compuesto por 3 ejes coordinados manipulados a través de motores a pasos, con una interfaz basada en Arduino y código G; la plataforma está orientada al uso del proceso ECM y EDM con la característica de poder adecuarse a cualquier de los dos procesos de manufactura. Las variables como voltaje, corriente eléctrica y distancia inter electrodos son establecidas por el usuario al inicio del proceso y se mantienen fijas durante el desarrollo del mismo [6]. Sin embargo, el considerar que las variables no sufrirán cambios durante el proceso pueden llevar al error durante el maquinado y a obtener resultados diferentes a los deseados; una manera de evitar este error es implementando una retroalimentación de la distancia inter electrodos, tal como la que se propone en el presente documento.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Del análisis de las investigaciones consultadas en la literatura se concluye que existe una problemática vigente para el cálculo de la distancia entre la herramienta y la pieza de trabajo (distancia inter electrodos), de la que depende fundamentalmente el control del proceso de maquinado electroquímico; esta distancia actualmente es medida de manera aproximada mediante sensores, o estimada mediante el cálculo de la cantidad tentativa de material removido en el proceso, usualmente mediante caracterizaciones experimentales, por lo que las condiciones óptimas de maquinado para determinado material y geometría, implican la realización de varias series de pruebas, antes de obtener un resultado satisfactorio.

Para contribuir a la solución del problema anterior, se propone el desarrollo de un sistema de maquinado electroquímico asistido por computadora, que permita el control del desplazamiento de los ejes coordenados dentro de un proceso de maquinado electroquímico, de tal manera que se realice una remoción controlada de material, mediante la integración de las variables de corriente de maquinado y voltaje de polarización, para mantener la distancia inter electrodos constante (cerca a los 360 μm), y de esta manera controlar la remoción de material durante el maquinado.

2.1 Objetivos de investigación

2.1.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema asistido por computadora para el control del desplazamiento del electrodo involucrado en el proceso de maquinado electroquímico, con el fin de lograr una remoción controlada de material, mediante la estimación de la distancia entre la herramienta de trabajo y el electrodo (gap), tomando como variables de entrada los parámetros de voltaje de polarización y la corriente de maquinado.

2.1.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar la instrumentación electrónica y la adquisición e interpretación de datos mediante la computadora para monitorear las variables eléctricas involucradas dentro del proceso de maquinado electroquímico (ECM).

2. Realizar pruebas de caracterización del proceso electroquímico para determinar la relación de avance con las variables eléctricas involucradas.
3. Desarrollar el sistema asistido por computadora que permita controlar el desplazamiento del eje coordinado para establecer un avance constante en el proceso de maquinado electroquímico, el cual estará basado en el Modelo de Prototipos usado en Ingeniería de Software y el lenguaje de modelado de sistemas SysML (del inglés System Modeling Lenguaje).
4. Realizar pruebas de funcionamiento y puesta a punto del sistema.

2.2 Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son las variables físicas del proceso de maquinado electroquímico que permitan realizar un cálculo de la remoción de material constante?
- Al conocer las características y condiciones del proceso electroquímico, ¿Cómo es posible manipular éstas condiciones mediante un sistema de cómputo para poder obtener una remoción de material controlada dentro de un proceso de maquinado electroquímico, mediante un sistema asistido por computadora?
- ¿Qué tipo de programación se debe de usar para poder desarrollar un sistema computacional que admita como entradas variables eléctricas y como salida se obtenga el control de motores a pasos?

2.3 Justificación

Actualmente existen sistemas asistidos por computadora orientados a los procesos de manufactura convencional, en los cuales el movimiento de sus ejes coordinados están basados en la posición de la herramienta y el desplazamiento de la misma; esto permite realizar el movimiento de la herramienta para la remoción de material de una manera precisa y uniforme, tomando en cuenta que siempre se conoce la posición de la herramienta, de la pieza y sus dimensiones; las cuales se da por hecho que son constantes.

En un proceso de maquinado no convencional, como el Maquinado Electroquímico, la asistencia de tales sistemas no se rige bajo los mismos conceptos, ya que el avance de la herramienta de trabajo está directamente afectado por la distancia inter electrodos, la cual

se puede estimar al conocer el voltaje de polarización, la corriente de maquinado, la concentración del electrolito y la composición de la pieza de trabajo; para lo cual se requiere monitorear las variables eléctricas involucradas.

El sistema propuesto en este trabajo pretende proporcionar una herramienta computacional que permita monitorear las variables eléctricas para mantener dentro de un intervalo permitido la distancia inter electrodos y, de ésta manera, controlar el avance de remoción de material mediante el movimiento de motores a pasos los cuales desplazan los ejes coordenados de un sistema de posicionamiento mecánico. El desarrollo del sistema se basa en los parámetros establecidos en el modelo de Prototipos que se usa en Ingeniería de Software, integrando una interfaz de usuario donde se puedan establecer los parámetros iniciales de maquinado y el monitoreo de las variables.

2.4 Impactos

- Científico: El desarrollo de un sistema asistido por computadora basado en una codificación que permita la interacción entre variables eléctricas (voltaje y corriente) de un proceso de maquinado electroquímico y como salida se obtenga el control de desplazamiento de los ejes coordenados permitirá obtener una remoción de material controlada.
- Tecnológico. El sistema será una herramienta computacional que permitirá controlar la distancia existente entre el electrodo y la pieza de trabajo en un proceso de maquinado electroquímico para lograr una remoción de material controlada con aplicaciones en manufactura avanzada de componentes metálicos, en particular en el proceso de maquinado electroquímico.

3 HIPÓTESIS

Mediante la adquisición de las variables de voltaje de polarización y corriente de maquinado en un proceso de manufactura electroquímica, con el uso de un sistema asistido por computadora, se podrá estimar la distancia inter electrodos y se producirá un movimiento de la herramienta de trabajo en los ejes coordenados para mantener constante dicha distancia en un valor de aproximadamente 360 μm , para proveer una remoción controlada del material.

4 ESTADO DEL ARTE

4.1 Manufactura avanzada

La manufactura es el proceso de fabricación de un producto que se realiza con las manos o con ayuda de máquinas [7]; el término deriva del latín manu factus, que significa “hecho a mano”, y apareció por primera vez en 1567 [8]. Dentro de los procesos de manufactura existen diferentes métodos para realizarlos, generando dos grupos: a) Métodos de Manufactura Convencional, en los que la pieza de trabajo y la herramienta tienen contacto directo y existe fricción entre ambos, lo cual permite la fabricación de la pieza deseada, tal como lo son el fresado y torneado mecánico, y b) Métodos de Manufactura no Convencional o Avanzada, que son aquellos donde entre la pieza y la herramienta de trabajo no existe contacto, ejemplo de ello es la manufactura por corte laser, Maquinado por descarga Eléctrica y el Maquinado Electroquímico.

4.2 Método de Maquinado Electroquímico (ECM)

El método de Maquinado Electroquímico es un proceso por medio del cual se retira metal de una pieza de trabajo conductora de electricidad por medio de un proceso de disolución anódica, en la cual se obtiene la forma de la pieza de trabajo a través de una herramienta que constituye un electrodo polarizado, muy próximo a la pieza de trabajo, pero al mismo tiempo separada mediante un electrolito que fluye con rapidez [9]. El electrodo encargado de la remoción del material usualmente es de un metal conductor, como el cobre o bronce, el cual generalmente es hueco para permitir que el electrolito fluya a través de él.

En la Figura 4.1, se muestra el principio básico del maquinado electroquímico, el cual está conformado por una fuente de corriente directa; la herramienta de trabajo se conecta al 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.

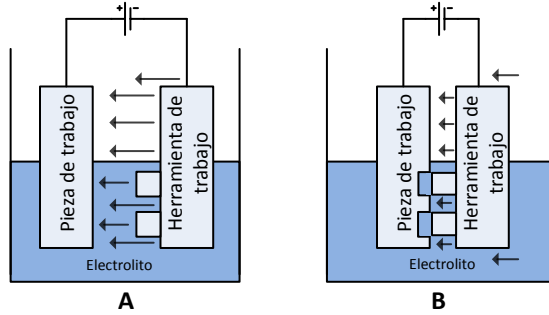


Figura 4.1: Principio de ECM (A) antes de la remoción, (B) durante la remoción.

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 [10]:



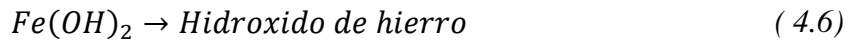
Favorecido por la diferencia de potencial entre la herramienta y la pieza de trabajo, se lleva a cabo un intercambio de iones: los iones positivos se mueven hacia la herramienta de trabajo y los negativos hacia la pieza de trabajo, lo que permite que una de las reacciones se presente con los iones de 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. En la Figura 4.2 se muestran, de manera representativa, las reacciones químicas antes descritas.

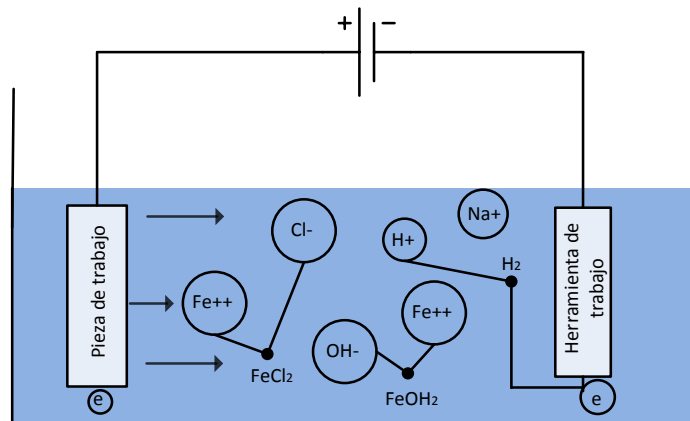


Figura 4.2: Reacciones químicas que ocurren en el proceso ECM

Para poder desarrollar sistemas computacionales que permitan el control de remoción en un proceso de maquinado electroquímico, actualmente algunos investigadores, entre ellos Villagómez et al, hacen uso de una ecuación que permite el cálculo aproximado de la velocidad de remoción de material para poder determinar la velocidad de desplazamiento de la herramienta de trabajo; esta ecuación está basada en la primera ley de Faraday, la cual establece que “la cantidad de cambio químico que produce una corriente eléctrica

(cantidad de metal disuelto) es proporcional a la cantidad de electricidad transmitida (corriente * tiempo)” [1]

$$V = CIt \quad (4.7)$$

Donde:

V = volumen de metal removido, [mm³]

C = una constante definida como velocidad de remocion especifica, $\left[\frac{\text{mm}^3}{\text{A/min}} \right]$

I = corriente, [A]

t = tiempo, [min]

Es importante mencionar que el factor C es obtenido de manera experimental, y es considerado un factor de ajuste que depende del material del ánodo y de la composición del electrolito.

Ahora bien, con base en la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} \quad (4.8)$$

Donde:

V = Voltaje

R = Resistencia

La resistencia del espacio inter electrodos está dada por:

$$R = \frac{gr}{A} \quad (4.9)$$

Donde:

g =

separacion entre la herramienta y la pieza de trabajo(distancia inter electrodos),

[mm]

r = resistividad del electrolito ($\Omega \cdot \text{mm}$)

A = Area de superficie frontal de la herramienta de trabajo [mm^2]

Al sustituir esta expresión para R en (4.8), se obtiene:

$$I = \frac{VA}{gr} \quad (4.10)$$

Para obtener velocidad de avance, se convierte la ecuación a una expresión de velocidad de avance: primero se divide por At (area * tiempo) para convertir el volumen de metal removido a una velocidad de desplazamiento lineal:

$$\frac{V}{At} = f_r = \frac{CV}{gr} \quad (4.11)$$

f_r = velocidad de avance $\left(\frac{\text{in}}{\text{min}}\right)$

Se sustituye $\frac{I}{A}$ en lugar de $\frac{V}{gr}$ en (4.11) por lo tanto, la velocidad de avance en el ECM es:

$$f_r = \frac{CI}{A} \quad (4.12)$$

Considerando la ecuación (4.10) despejando para g se obtiene la ecuación (4.13), con la cual se puede calcular la distancia inter electrodos, mediante el monitoreo de la corriente de maquinado (I) y el voltaje de polarización (V), para que de esta manera se obtenga una remoción de material controlada en el proceso de maquinado electroquímico

$$g = \frac{VA}{Ir} \quad (4.13)$$

Donde:

$V = \text{Voltaje de polarización [Volt]}$.

$A = \text{Area frontal de la herramienta de trabajo } \text{mm}^2$.

$I = \text{Corriente de maquinado [Amper]}$

$r = \text{resistividad del electrolito } [\Omega * \text{mm}]$

De esta manera sustituyendo estas variables con los parámetros de maquinado que se obtengan con el sistema computacional se podrá determinar la distancia inter electrodos teniendo la posibilidad de realizar una remoción de material controlada sobre uno o más ejes coordenados.

2.1.2 Componentes del proceso de maquinado electroquímico.

En la Figura 4.3 se puede observar los componentes de los cuales está compuesto el Proceso de maquinado electroquímico los cuales son:

- Fuente CD (Corriente Directa): encargada de proporcionar la energía para realizar el proceso de maquinado electroquímico. El voltaje puede estar en el rango de 1-100 V la variación de este da como resultado un cambio en la velocidad de remoción pues entre más voltaje y corriente, mayor es la velocidad de remoción de material.
- Electrolito: Es el encargado de la conducción entre la herramienta de trabajo y la pieza de trabajo, puede ser cualquier disolución de ácidos, bases, o sales.
- Herramienta de trabajo: pieza de metal hueca fabricada en (cobre, bronce, plata), cuya función es la de realizar el proceso de maquinado y por la cual en su interior fluye el electrolito comúnmente se conecta al cátodo de la fuente DC.
- Pieza de trabajo: Sección de metal forzosamente conductora que se desea maquinar, el cual se conecta al ánodo de la fuente DC.
- Bomba del Electrolito: Dispositivo encargado de mantener constante el fluido del electrolito durante el proceso de maquinado.

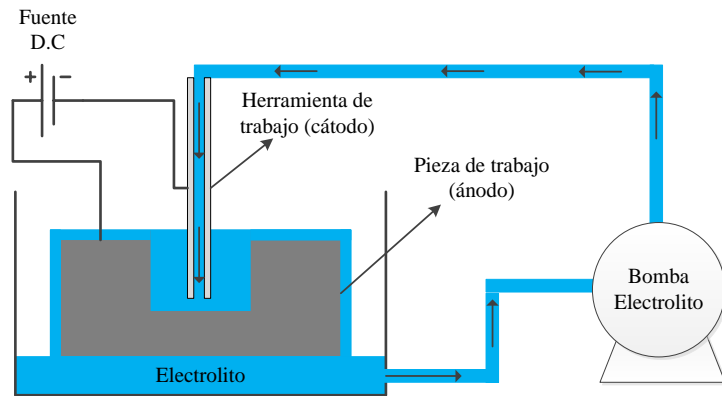


Figura 4.3: Componentes del Maquinado Electroquímico.

Dentro del proceso de maquinado electroquímico existe un parámetro conocido como distancia inter electrodos; este parámetro debe de estar en el intervalo 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 más aún conocer de manera precisa la variación que está teniendo esta distancia con respecto a la evolución del proceso ECM, es por ello que diferentes investigadores del área han desarrollado técnicas para conocer de manera tentativa la distancia inter electrodos y de esta manera realizar una remoción de material constante.

D. Clifton [10] en el trabajo “*Ultrasonic measurement of the inter-electrode gap in electrochemical machining*”, 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, ya que el más mínimo cambio en estas condiciones 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*” [11] 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 XY 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 realiza una acción de control compleja al implementar una sola condición, la cual es; que si se detecta cortocircuito es elevada la herramienta de trabajo una distancia preestablecida de 10 μm , se generan los pulsos para fuente y se vuelve a bajar la herramienta de trabajo para continuar en un ciclo.

4.3 En Sistema computacional

Un sistema computacional se puede definir como un conjunto de partes interrelacionadas: recursos humanos, recursos físicos (hardware), y recursos lógicos (software) que trabajan en conjunto para el procesamiento de una información y/o proceso [12]. El hardware incluye computadoras o cualquier tipo de dispositivo periférico de entrada/salida, que consisten en procesadores, memoria, sistemas de almacenamiento externo [13]. El software incluye al sistema operativo, códigos fuente de función específica y aplicaciones. Por último, el soporte humano incluye al personal técnico que crean y mantienen el sistema (analistas, programadores, operarios, etc.) y a los usuarios que lo utilizan.

Como unidad de procesamiento central del sistema computacional se usa una Raspberry Pi la cual, es una computadora de tamaño compacto, [13] Las principales características de la Raspberry Pi B+ se enlistan en la Tabla 4.1 [14]. :

Tabla 4.1: Características de Raspberry Pi B+.

Chip integrado	Broadcom BCM2835
CPU	ARM1176JZF-S de 700 MHz
Procesador grafico	Broadcom Video Core IV GPU
Memoria RAM disponible	512 MB
Puertos USB	4 x USB 2.0
Salida de video	HDMI
Salida de audio	Jack de 3.5mm
Almacenamiento	SD mínimo 8 GB
Conexión a red	Ethernet 10/100 (RJ45).
Pines I/O	8 x GPIO – UART
Voltaje útil desde pines GPIO	+3.3 VDC / + 5 VDC / Tierra
Alimentación	5V a 700 mA vía Micro USB o GPIO
Sistema Operativo	Distribuciones basadas en GNU/Linux

Uno de los atractivos que tiene la Raspberry Pi es el bus de expansión GPIO (General Purpose Input/Output), 40 pines en el modelo B+. El puerto GPIO permite a la Raspberry Pi comunicarse con el exterior tanto para activar elementos como para leer el estado de los mismos. La tensión de trabajo del puerto es de 3,3V para un 1 lógico y 0V para un 0 lógico, la corriente máxima que puede suministrar es de 16 mA [15].

Algunos componentes externos como un ADC (Convertidor Analógico Digital) que se deseen conectar a la Raspberry Pi para la adquisición de variables analógicas, usan protocolos de comunicación como la SPI (del inglés Serial Peripheral Interface), que es un estándar de comunicaciones, usado principalmente para la transferencia de información entre circuitos integrados en equipos electrónicos. El bus de interfaz de periféricos serie o bus SPI es un estándar para controlar casi cualquier dispositivo electrónico digital que acepte un flujo de bits en serie regulado por un reloj (comunicación síncrona) [16].

Esta interfaz utiliza las terminales denominadas CSN, MISO, MOSI; estas terminales son las encargadas de realizar la transmisión y recepción. La función de los pines que usa el bus SPI se define a continuación [16]:

- CSN: Pin encargado de la habilitación del bus SPI.
- SCK: Encargado de sincronizar la velocidad del reloj entre maestro y esclavo.
- MOSI: Significa “Maestro fuera, esclavo dentro” pin por el cual el maestro envía datos al esclavo.
- MISO: tiene la función inversa del Pin MOSI en donde el esclavo mandara los datos al maestro.

La necesidad de tener un registro detallado de los procesos de maquinado, así como el de conocer el valor de la magnitud de las variables involucradas durante el proceso lleva al uso de MySQL que es un gestor de base de datos de código abierto más popular del mundo, misma que se ha convertido en una completa herramienta de almacenamiento [17].

Como sistema operativo, la Raspberry Pi usualmente usa el sistema operativo Raspbian es una distribución del sistema operativo Linux y software libre basado en Debian Wheezy (Debian 7.0) [18], usa LXDE como escritorio y Midori como navegador web. Contiene herramientas de desarrollo como el lenguaje de programación Python.

El sistema se descarga de la página oficial de Raspberry Pi se carga en una memoria SD, dicha memoria se inserta en la Raspberry Pi y se enciende, con lo que se puede configurar el sistema operativo [20].

Una de las ventajas de usar Raspbian como sistema operativo es la posibilidad de implementar un entorno grafico como lo es LXDE (Lightweight X11 Desktop Environment) que es un entorno de escritorio ágil y ahorrador de energía [19].

Para poder desarrollar la programación encargada del control de hardware del sistema, así como la interfaz gráfica de la aplicación se emplea Python; es un lenguaje interpretado, usa tipado dinámico (una misma variable puede tomar valores de distinto tipo en distintos momentos) y es multiplataforma [20].

4.4 Ingeniería de software

Son el conjunto de métodos (prácticas) y herramientas que permiten a los profesionales en la materia, elaborar software de computo de calidad, es importante porque nos permite

construir sistemas complejos en un tiempo razonable y con calidad, con estas técnicas el software se construye del mismo modo que cualquier otro producto exitoso, con la aplicación de un proceso ágil y adaptable para obtener un resultado de calidad que satisfaga las necesidades de las personas que usarán el producto [21].

Dentro de la Ingeniería de Software, el Modelo de Prototipos permite el desarrollo de un sistema complejo, generando sucesivas iteraciones que son llamadas prototipos; basadas en las peticiones que el cliente le solicita al desarrollador, este modelado se emplea en la mayoría de los casos en las que no se tiene definido en su totalidad el funcionamiento y apariencia final que tendrá el producto, así mismo permite generar diferentes versiones del mismo pudiendo mejorar el funcionamiento y eficiencia con cada versión fabricada. Esta es la técnica más empleada en la Ingeniería de Software por el poco tiempo que lleva desarrollar una versión preliminar de un producto, y por la ventaja de poder analizar el funcionamiento, errores y deficiencias al finalizar cada versión, así mismo por la ventaja al cliente de poder incorporar o eliminar características y procesos que no se tenían contemplados en una versión anterior o que se deseen quitar en una versión posterior [22].

En la Figura 4.4 se visualiza las etapas de las que está conformado el modelo por prototipos y la secuencia que llevan las etapas donde:

- **Análisis:** Etapa donde se identifican las necesidades y requerimientos que debe cubrir el producto final, esto mediante una entrevista directa con el cliente, donde este mediante el uso de términos y definiciones propias describe la función y posible forma que debe tener el producto final.
- **Diseño:** Etapa donde se realiza un modelado en forma de boceto cubriendo las necesidades que el cliente otorgó en la etapa de análisis, este modelado servirá para poder fabricar la parte física del prototipo y la codificación necesaria para la parte lógica del mismo.
- **Codificación:** Se usa el resultado de la etapa de diseño para poder desarrollar una primera versión del producto, cubriendo todos los rubros que se establecieron en la etapa de diseño.
- **Pruebas:** Se pone a prueba el prototipo, se evalúa el funcionamiento y en base a esto, se determina: si el prototipo satisface al cliente y su funcionamiento es el

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

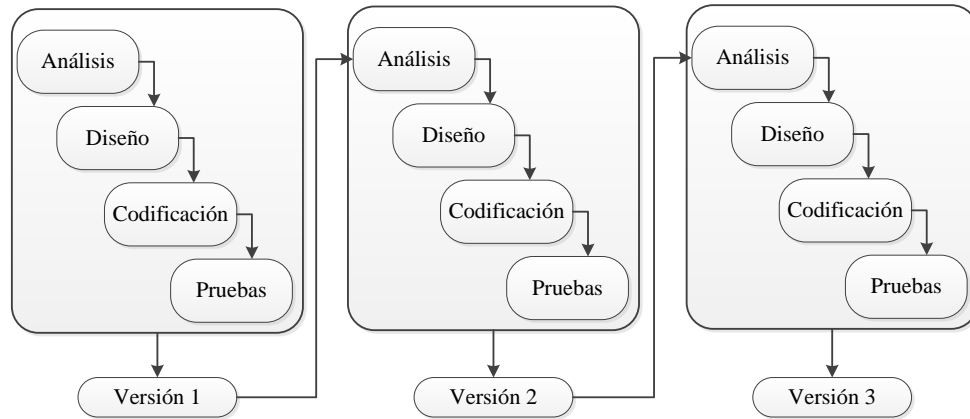


Figura 4.4 Estructura del modelo por prototipos

4.5 SysML

SysML (Systems Modeling Language) es un lenguaje de modelado de sistemas, que se emplea en Ingeniera Del Software como est andar para el desarrollo de cualquier sistema, ya sea de baja, mediana o alta complejidad. Esto con la finalidad de la fabricación de un sistema computacional, o una aplicación de software pueda ser desarrollada por diferentes entidades sin que se pierda la estructura y así obtener el producto final deseado [23]. El uso de SysML permite que se desarrolle un diseño completo y entendible para cualquier conocedor del campo y a su vez dada la complejidad de los sistemas estos puedan ser desarrollados por diferentes integrantes de un equipo y por diferentes etapas y que cada una de ellas concuerde con la anterior y la siguiente.

Para poder realizar el diseño de un sistema usando el modelado por prototipos SysML cuenta con múltiples diagramas los cuales tiene la función de dar un parámetro más amplio de lo que se quiere desarrollar, así como identificar los factores, actores y requerimientos físicos e informáticos que se requieren para completar el desarrollo del prototipo, a continuación, se listan los diagramas más relevantes:

- **Casos de usos:** incluyen las características de los casos de uso UML y además tienen un elemento de relación de asignación; con el objetivo de representar los actores internos y externos que se interrelacionan en el sistema, así como los privilegios y función.
- **De flujo:** su función principal es la de ejemplificar cual será la secuencia de funcionamiento del sistema incluyendo a los actores involucrados en el mismo, se pueden representar condiciones, ciclos, entradas y salidas.
- **De requisitos:** su objetivo es describir los requisitos funcionales, de rendimiento y de interfaz, es decir, propiedades o limitaciones físicas que no se reflejan en diagramas de casos de uso UML tradicionales.
- **De secuencia:** permiten realizar asignaciones entre las interacciones de los componentes del sistema.
- **De distribución:** es donde representamos la estructura de hardware donde estará nuestro sistema o software, para ello cada componente lo podemos representar como nodos, el nodo es cualquier elemento que sea un recurso de hardware, es decir, es nuestra denominación genérica para nuestros equipos.

5 METODOLOGÍA

5.1 Diseño del sistema computacional

Para el desarrollo de este proyecto, se empleó el desarrollo del modelo por prototipos. . El primer paso para usar el modelo por prototipos, es conocer las necesidades del cliente para generar un análisis de requerimientos y poder obtener una primera versión que posteriormente será evaluada; una vez teniendo los requisitos generales se procede al diseño del sistema, empleando diferentes diagramas de la ingeniería del software que ayudan al desarrollo del sistema.

5.2 Diagrama de requisitos.

El diagrama de requisitos se genera a partir de las necesidades del cliente; sirve de apoyo para identificar las 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 [22].

El diagrama de requisitos se caracteriza por el uso de rectángulos seccionados, donde en la cabecera se coloca el requisito con una numeración continua y en el cuerpo se describe el requisito, que puede ser una sección de programación, almacenamiento, presentación de información, parte física o un proceso. Cada requisito se enlaza con una línea que parte de un rectángulo principal hacia todos los requisitos [22].

El diagrama de requisitos del sistema computacional se presenta en la Figura 5.1 , donde los requisitos principales son: el sistema mecánico, el proceso ECM, la interfaz de usuario, el circuito de mando para el sistema mecánico, la adquisición de variables, la tarjeta programable, el almacenamiento de datos y la seguridad que tendrá el sistema mecánico referente a la informática.

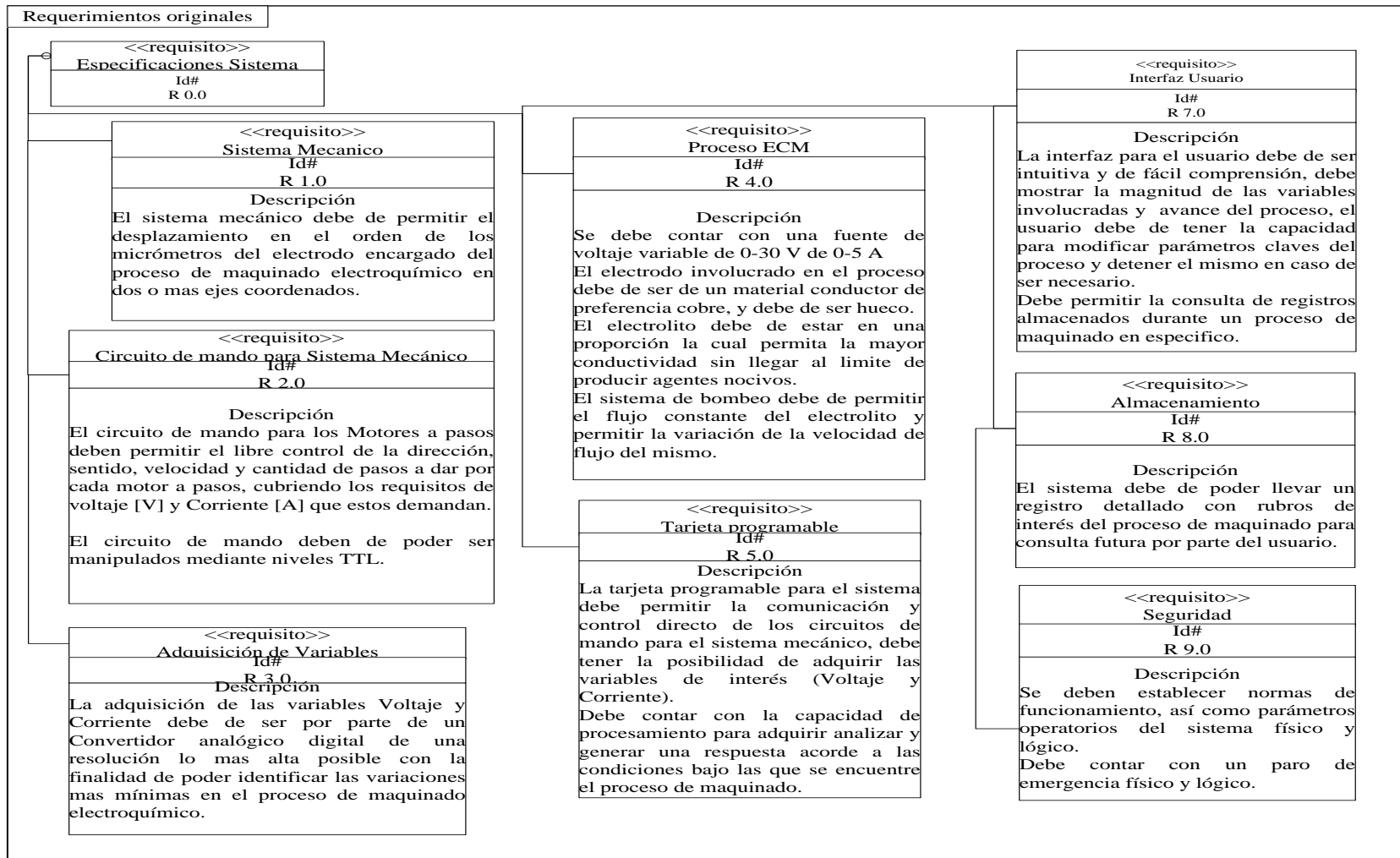


Figura 5.1: Diagrama de Requisitos para el sistema computacional del proceso ECM.

5.3 Diagrama de flujo del sistema computacional

Una vez establecido el diagrama de requisitos, se genera el diagrama de flujo, el cual es mostrado en la Figura 5.2 donde se aprecia el funcionamiento secuencial general del sistema.

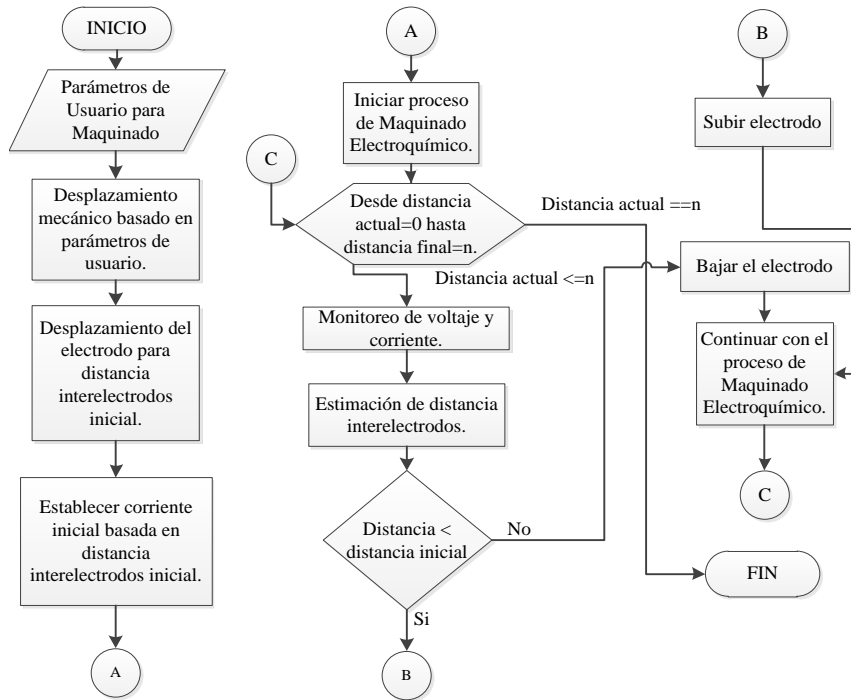


Figura 5.2: Diagrama de Flujo del funcionamiento del sistema computacional.

5.4 Diagrama de caso de usos.

Este diagrama permite identificar los actores que interactuaran entre sí para que el sistema computacional funcione adecuadamente, identificando de manera gráfica las tareas que cada actor puede y debe realizar y la interacción que existe de una tarea con otra.

Este diagrama es un apoyo para el programador: permite identificar la relación de un elemento con otro y la forma en que interactúan, conocer el número de actores y la influencia sobre los elementos, brinda la posibilidad de programar cada módulo y cada etapa de una manera clara y sin redundancia, lo cual se ve reflejado en la cantidad de líneas de código.

Los actores se representan mediante formas humanas, mientras que las tareas o roles están definidas en óvalos, se usan flechas para determinar que tarea le corresponde a cada actor y si esta depende o influye sobre otra, las tareas están contenidas en un rectángulo el cual se define como la frontera del sistema; ninguna tarea debe estar fuera si pertenece al funcionamiento interno, es decir al software.

En la Figura 5.3 se muestra el diagrama de caso de usos del sistema, se puede apreciar que se cuenta con dos actores principales, el usuario que operara el sistema y el hardware la frontera de la aplicación encierra a las tareas o roles que desempeña cada uno de los actores se determinó que la parte física del sistema computacional está definida por el usuario que lleva el nombre de “Física” entre los roles que desempeña está el del movimiento mecánico que está relacionado directamente con los parámetros que son ingresados por el usuario y que en este diagrama lleva el nombre de “Usuario”, otro de los roles que desempeña la parte física es el de la adquisición de las variables voltaje y corriente que a su vez son consultadas por el usuario. Por su parte el usuario puede realizar un paro de emergencia, consultar los datos almacenados por el sistema, conocer la distancia inter electrodos mientras que la parte física se encarga del proceso de maquinado electroquímico la interpretación del voltaje y corriente que obtiene por medio de un conversor analógico a digital y del procesamiento de los parámetros que el usuario ingresa al sistema.

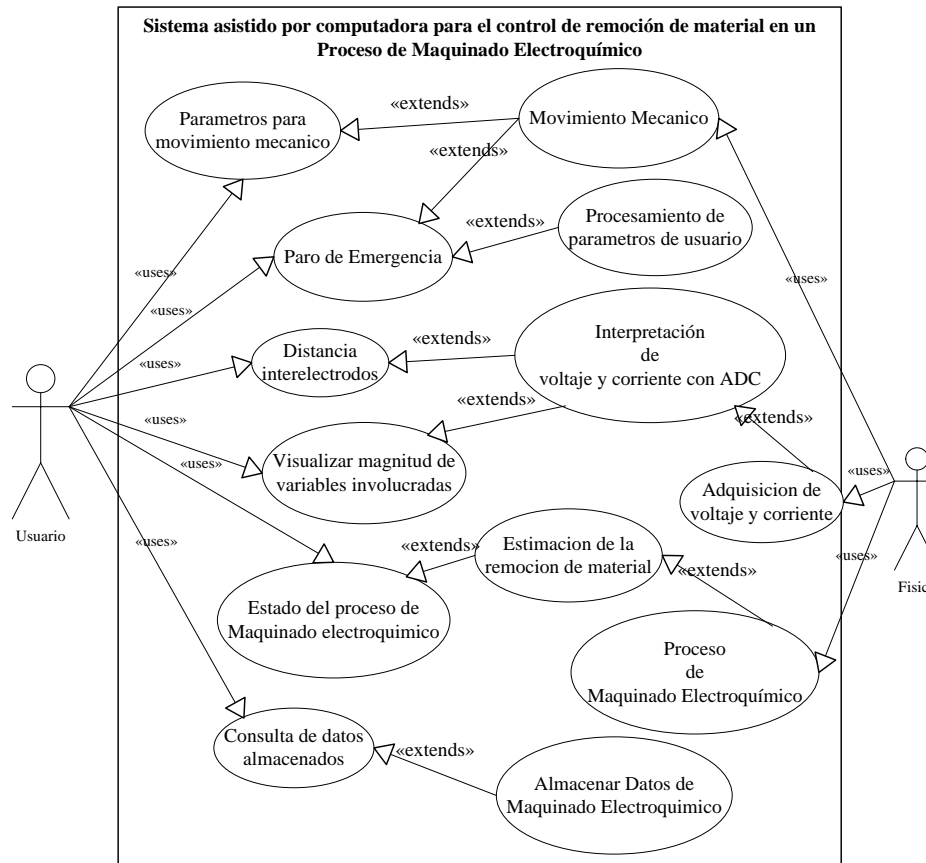


Figura 5.3: Diagrama de Caso de usos del sistema computacional.

5.5 Diagrama de distribución.

El diagrama de distribución permite conocer el dimensionamiento del sistema, las partes de las que estará compuesto e integrando de manera modular cada sección y se muestra la forma en que se integra cada módulo, en caso ser formado por otros [24].

Al separar el sistema en secciones se puede conocer las partes físicas que comprenderán el hardware del prototipo y diferenciarlas de las partes que comprenderán al software, muestra si existe una relación directa con otra parte del sistema e identifica que parte debe desarrollarse primero, lo que permite un desarrollo secuencial respetando la modularidad para integrarlos de acuerdo a un funcionamiento previo y a uno subsecuente, lo que evita desarrollar secciones anticipadamente cuyo funcionamiento depende de una sección aun no desarrollada generando un retraso.

El diagrama emplea cubos para representar las secciones que componen al sistema computacional, mismos que son conectados por una flecha punteada a las secciones con

los cuales tienen una interacción o dependencia, esta última es determinada por el sentido al que apunta la flecha, las secciones que son intangibles se representan con un folder.

En la Figura 5.4 se muestra el diagrama de distribución para el sistema computacional donde de manera clara se pueden apreciar las partes físicas y el software con que estará compuesto el sistema, así como la relación de las secciones y en este caso las subsecciones que componen a algunas de estas.

Para representar las partes lógicas del sistema computacional se emplea la simbología de un folder, para las partes físicas se emplean bloques de forma rectangular que a su vez pueden estar compuestos de sub-partes, como lo es en el caso de sistema mecánico el cual es descrito por un ente conformado por los ejes coordenados y los motores a pasos, la adquisición de datos está compuesta por los sensores capaces de adquirir la magnitud de las variables involucradas y el conversor analógico digital que interpreta dichas variables y las integra al sistema digital; el proceso ECM está compuesto por la fuente de voltaje, el electrodo y el sistema de bombeo, en el caso de la base de datos se considera como los sistemas de almacenamiento tangibles como lo son los discos duros o medios de almacenamiento que contienen la información de importancia.

Cada sección del sistema computacional está relacionado mediante flechas las cuales dependiendo de la dirección de la flecha, determinan si hacen el envío y recepción de información con la implementación de etiquetas <<call>> para hacer una petición de información de manera bidireccional como lo es en el almacenamiento de los datos pues se pueden almacenar o consultar los mismos, <<send>> para hacer el envío de datos de

manera automática e `<<import>>` donde la petición de la importación es necesaria solicitársela al bloque correspondiente.

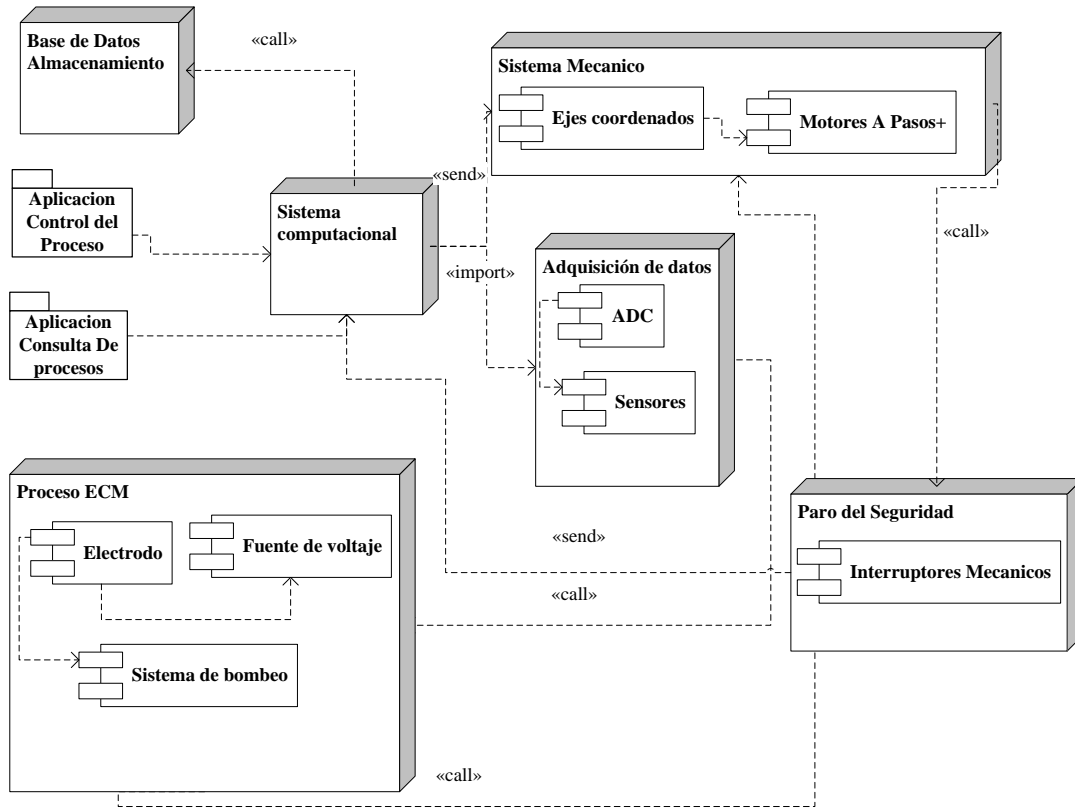


Figura 5.4: Diagrama de Distribución de las partes físicas y lógicas del sistema computacional.

5.6 Diagrama de secuencia.

El diagrama de secuencia es el resultado de todos los diagramas antes descritos, se usan los actores del diagrama de caso de usos, las secciones del diagrama de distribución, la secuencia del diagrama de flujo, permite ver cómo será el flujo de la información y los procesos.

El diagrama de secuencia permite al programador identificar de forma gráfica qué relación tienen una sección de código con otro, además permite programar las secciones como funciones que retornen un valor específico, evitar la redundancia en la declaración de variables, generar una programación sin duplicidad de datos u operaciones eficiente, dado que identifica el tiempo de vida que tiene cada proceso, permite medir el tiempo de ejecución y el consumo de recursos computacionales [24].

El inicio y fin están ejemplificados por círculos de color negro, los rectángulos de color gris denotan el tiempo de vida de cada actor, las flechas que salen de cada rectángulo cumplen con funciones diferentes, aquellas cuya fecha final no está rellena de color negro simbolizan la instrucción de una orden que no retorna valor de retroalimentación, las flechas cuyo final esta relleno simbolizan que se tiene una respuesta del bloque de vida al cual se le realizó una orden. Las flechas con línea continua son instrucciones u órdenes que se ejecutan en un mismo tiempo de vida y que retornar un valor a ese mismo ciclo de vida, el bucle que simboliza el tiempo de ejecución del sistema computacional esta denotado por un rectángulo que contiene todos los ciclos de vida que se estarán ejecutando una y otra vez hasta que el usuario así lo decida, tal como con los parámetros de final de ejecución.

En la Figura 5.5 se presenta el diagrama de secuencia del sistema computacional integra al usuario, la sección lógica del sistema computacional, el sistema mecánico, el proceso ECM, la adquisición de las variables y el almacenamiento, al inicio el usuario ingresa los parámetros necesarios para realizar un proceso de maquinado como lo son la longitud y la profundidad, estos parámetros son interpretados y procesados por la sección lógica del sistema para que de esta manera el sistema mecánico posicione la herramienta de trabajo en una posición inicial, el proceso de maquinado electroquímico se pone en funcionamiento y se obtiene la corriente inicial, de igual manera estos parámetros son almacenados, una vez realizada esta secuencia el sistema computacional inicia un ciclo durante el cual se estará generando un desplazamiento de la herramienta de trabajo así mismo un monitoreo constante del voltaje de polarización y la corriente de maquinado para estimar la distancia inter electrodos y tener el control del desplazamiento vertical de la herramienta de trabajo para genera una remoción de material controlada, durante todo este proceso se almacenan datos temporales como los son el promedio de las magnitudes de las variables, la duración del proceso, y la hora y fecha exacta en la que se toma cada medición, el ciclo termina cuando se ha alcanzado la profundidad deseada por el usuario o se ha detenido de manera manual o automática el proceso.

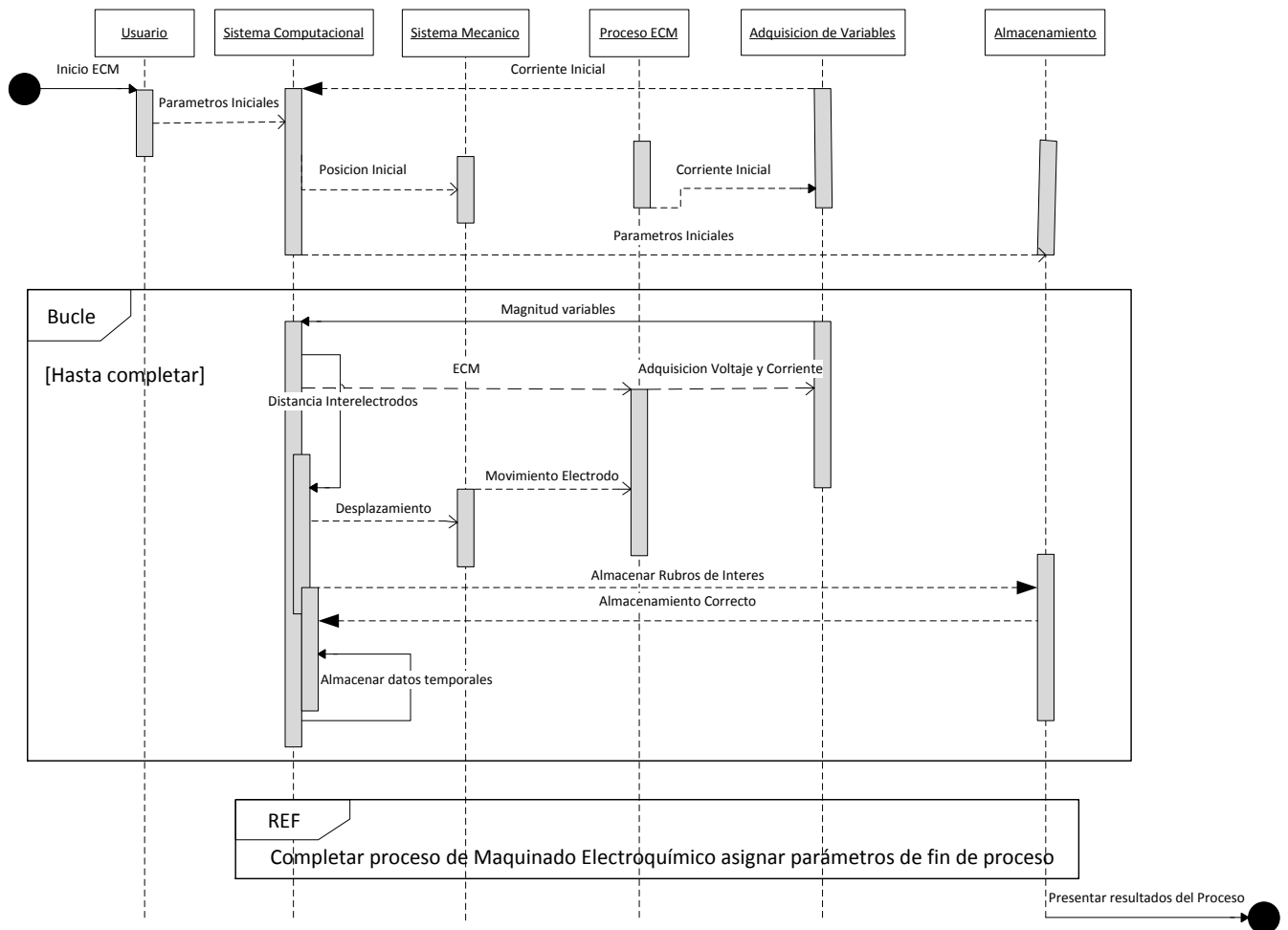


Figura 5.5: Diagrama de Secuencia del funcionamiento del sistema computacional.

Los rubros de interés, como lo son:

- Identificador único del proyecto a maquinar.
- Nombre de proyecto a maquinar.
- Tipo de maquinado.
- Fecha y hora de inicio de maquinado.
- Fecha y hora de fin de maquinado.

Son almacenados en una base de datos que lleva por nombre camecm, la cual cuenta con una tabla compuesta por 5 campos:

- id_proyecto.

- nombre_proyecto.
- tipo_maquinado.
- fecha_hora_inicio.
- fecha_hora_fin.

Estos campos corresponden a los rubros de interés que se desean almacenar y brinda la posibilidad de registrar los proyectos a realizar para una futura consulta por el usuario.

5.7 Construcción del prototipo.

Con base en el diagrama de requisitos y de distribución que se realizó como parte del diseño, se establecieron las partes físicas importantes y por ello las primeras que se debían de tener para que el desarrollo de sistema computacional se hiciera acorde al cronograma propuesto.

Al contar con un sistema mecánico de 3 ejes compuesto por motores paso a paso y cuerdas con un desplazamiento lineal de 8 mm por revolución del motor se presentó la necesidad de desarrollar un circuito de control capaz de realizar el desplazamiento lineal en el orden de los micrómetros y a su vez poder manejarlo mediante niveles TTL.

5.8 Fabricación del circuito de mando para sistema mecánico.

Se desarrolló un circuito de mando con la capacidad de poder gestionar el movimiento de los motores a pasos en el orden de los micrómetros, para su fabricación se usaron los circuitos integrados L298 y L297, el primero se caracteriza por tener internamente 2 puentes H que le permiten controlar dos motores de corriente continua, motores a pasos bipolares y unipolares, su límite de corriente es de 4 A y su voltaje de funcionamiento es de hasta 36 V [25].

El L297 es un controlador de motores paso a paso, el cual genera 4 señales que puede recibir el L298 para controlar el giro de un motor unipolar o bipolar, este circuito integrado tiene un voltaje de funcionamiento de 5 V y puede ser considerado como la parte lógica que controla la velocidad, el sentido y habilitación del circuito de mando desarrollado para el proyecto, mientras que el L298 es el encargado de recibir las señales de control del L297

y proporcional la corriente suficiente para lograr el funcionamiento de los motores paso a paso, este circuito integrado permite la habilitación del circuito de mando, controlar la velocidad y sentido, cambiar la resolución de los pasos de 1 a ½ paso y la posibilidad de sincronizar dos o más circuitos de mando para mover múltiples motores al mismo tiempo [26], el circuito de mando para los motores a pasos que se desarrollo tiene las siguientes características:

- Control de habilitación del circuito de control.
- Control digital para el cambio de velocidad y sentido del giro del motor.
- El control de la resolución de los pasos, siendo esta de 1 paso o ½ paso.
- Corriente máxima de trabajo de 4 A.
- Voltaje de operación entre 7.5 V y 24 V.

El circuito de mando de los motores es gestionado desde una Raspberry Pi, la cual manipula el movimiento de los 3 ejes coordinados de forma sincronizada. En la Figura 5.6 se puede observar el diagrama esquemático del circuito de mando, mismo que cuenta con 4 bornes de conexión identificados como se indica enseguida:

- RES; terminal encargada de determinar si el motor a pasos avanzara en secuencia de paso completo o ½ paso,
- PASOS; a través de este pin se introduce la secuencia de señal encargada de que el motor de un paso,
- SENTIDO: usando este pin se puede determinar el sentido en el que el motor realiza las revoluciones, el pin
- HABILITACION, permite la habilitación o inhabilitación del circuito de mando,
- 5VCC y GND son los pines por medio de los cuales se suministra la energía para el funcionamiento de esa sección del circuito de mando.

Se usan motores unipolares de 6 cables integrados de manera interna por 2 bobinas de las cuales una se conecta en los pines con etiqueta X4-5 y X4-4, mientras que la otra se conecta a los pines X4-3 y X4-2 los dos cables restantes del motor se conectan a GND mediante los pines X4-6 y X4-1.

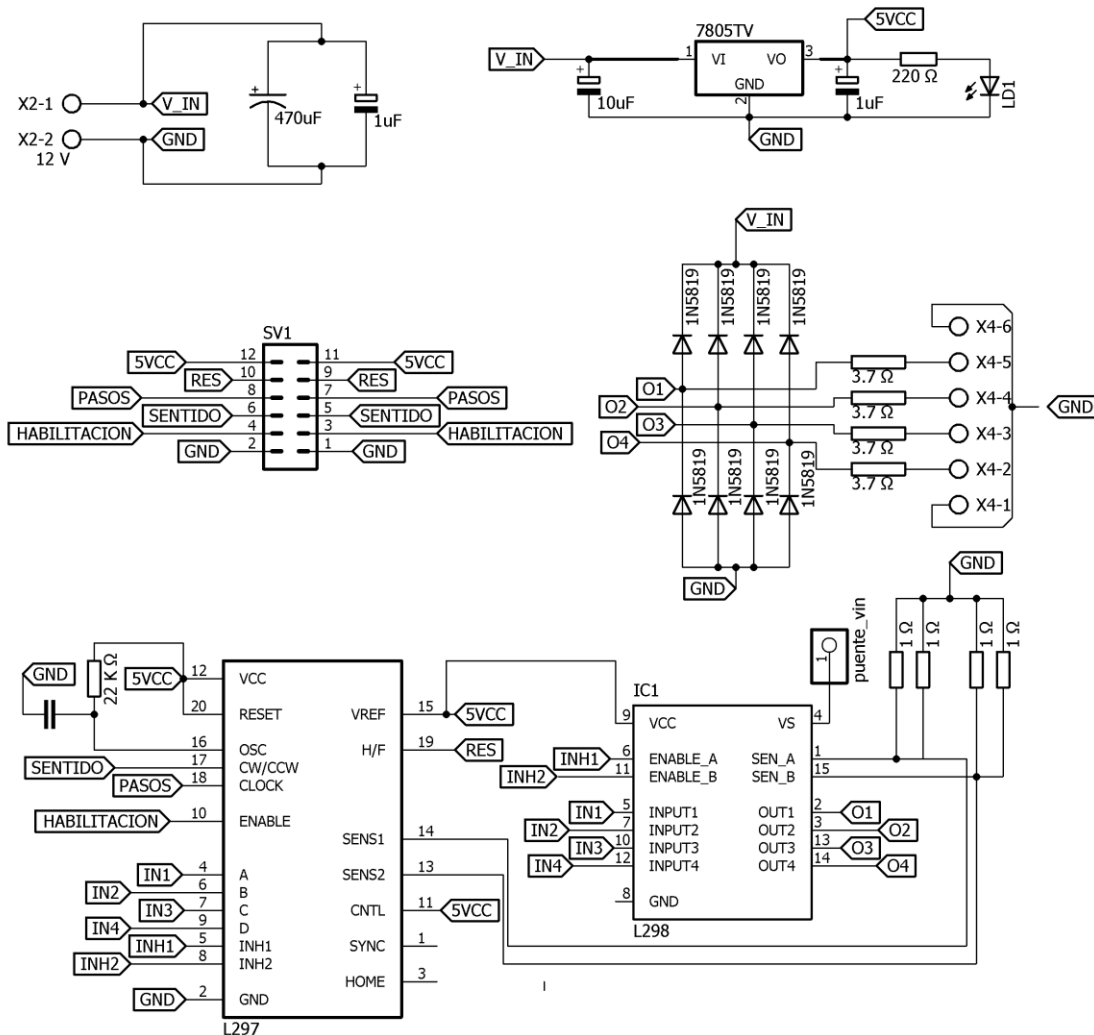


Figura 5.6: Circuito de Mando para Motores Paso a Paso.

5.9 Sistema de recirculación de electrolito

El proceso de maquinado electroquímico produce compuestos derivados de la remoción de material, tal como se describe en la sección 4.2, los cuales obstruyen la circulación del electrolito a través del electrodo y en la punta de este, lo que a su vez, si el residuo se acumula genera una condición de corto circuito lo que impide continuar con el maquinado.

Durante pruebas preliminares de maquinado electroquímico se empleó una bomba de agua que hace circular una solución acuosa de $H_2O + NaCl$ en una solución con concentración de cloruro de sodio del 20%, maquinando acero AISI 1018 con un electrodo hueco de cobre. La prueba permitió conocer la cantidad de material removido de la pieza de trabajo por un tiempo aproximado de 25 minutos, en el cual se observó una acumulación de

residuos, por lo que se requirió diseñar un sistema de recirculación de electrolito. El sistema propuesto hace uso de un sistema de recirculación a través de filtros que contienen los residuos lodosos.

En la Figura 5.7 se observa el sistema de recirculación el cual cuenta con la bomba 1 a una velocidad aproximada de 10 l/min, encargada de trasladar el agua con residuos al estanque 1 el cual tiene una capacidad de 2 L en donde se sumergen las bombas 2 y 3 las cuales tienen integrados filtros fibra porosa, el electrolito filtrado es llevado a un estanque 2 el cual tiene una capacidad de 2 L, es el que contiene el electrolito listo para ser utilizado en el proceso ECM mediante la acción de la bomba 4.

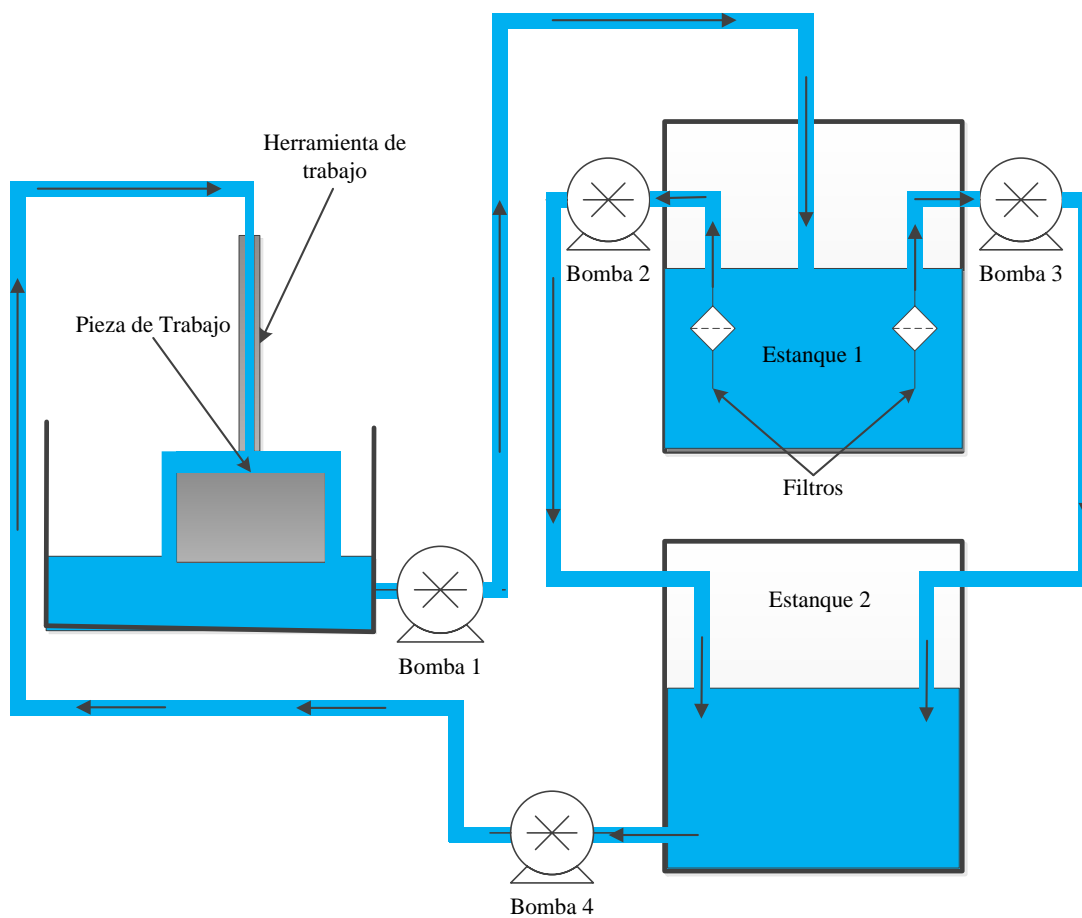


Figura 5.7: Sistema de recirculación del electrolito.

1.1.1 Etapa de Adquisición de Datos.

La corriente de maquinado se considera en este trabajo como la variable de mayor importancia, pues es la que permite estimar la distancia inter electrodos y mantenerla dentro de un intervalo que permita realizar de manera adecuada el proceso de maquinado electroquímico. Si la corriente de maquinado aumenta, se debe a que el electrodo se está acercando a la pieza de trabajo; caso opuesto, si la corriente de maquinado disminuye, la distancia inter electros entre la herramienta y pieza de trabajo se está alejando. Por esta razón se requiere monitorear la corriente de maquinado para que el sistema computacional pueda realizar la estimación de la misma y a partir de ello tomar la acción de control requerida mediante el uso de la ecuación (4.13) descrita en la sección 2.

Para realizar la medición de la corriente de maquinado, el sensor ASC712 se conecta en serie en el circuito que integra la herramienta de trabajo y la pieza de trabajo en conjunto con la fuente de voltaje. La salida del sensor es conectada a un convertidor analógico - digital, el cual realiza la conversión de la magnitud física a un equivalente digital, que es interpretado por el sistema computacional. El diagrama electrónico de la conexión del sensor ASC712 y del divisor de voltaje se presenta en la Figura 5.8

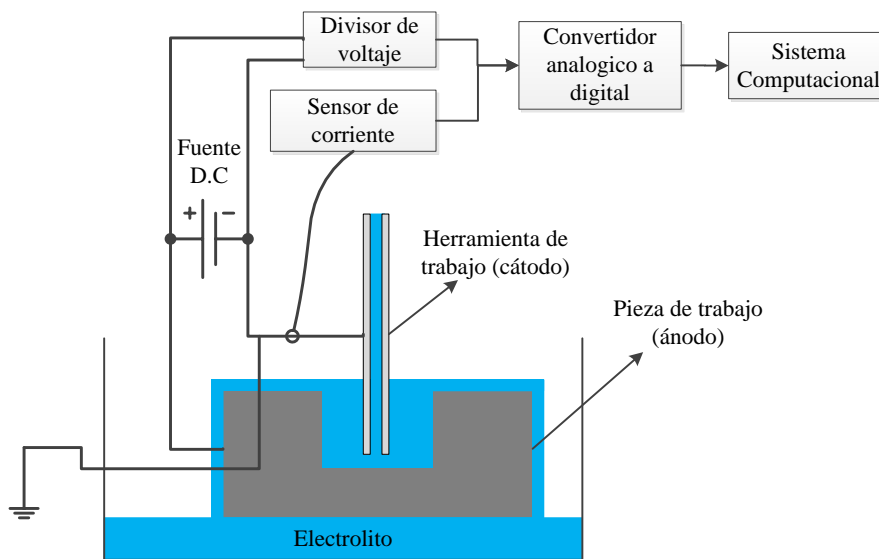


Figura 5.8: Diagrama a bloques de la conexión eléctrica de los sensores de voltaje y corriente.

Para monitorear la corriente de maquinado se hace uso del sensor ASC712 (basado en el efecto Hall), el cual se ha integrado de fábrica en una placa y puede medir magnitudes de

intensidad de corriente de CD y CA, de hasta 30 A, con una sensibilidad de 66 mV/A. En la Figura 5.9, se presenta el diagrama esquemático de conexión del ACS712, donde el pin I+ se conecta al electrodo (herramienta de trabajo), mientras que I- se conecta al cátodo de la fuente encargada de suministrar la energía para el proceso de maquinado electroquímico, VCC se conecta al ánodo de una fuente de 5 V, GND al cátodo de esa misma fuente de voltaje, y VOUT se conecta al canal número 1 del convertidor analógico - digital MCP3204.

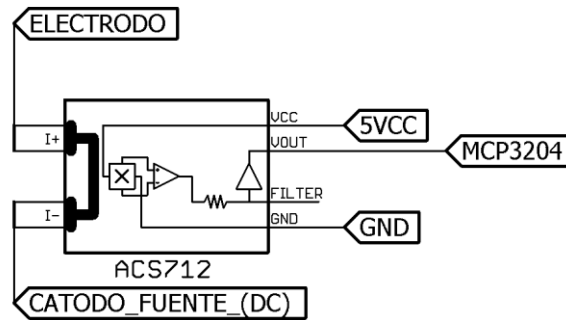


Figura 5.9: Diagrama de conexión del sensor de corriente ACS712.

La adquisición de datos del voltaje de polarización se realiza mediante un divisor de voltaje, el cual puede realizar mediciones de hasta 25 V, la conexión se realiza en paralelo a la herramienta y pieza de trabajo la salida del divisor es enviada al MCP3204 el cual es un convertidor analógico-digital con una resolución de 12 bits, cuenta con 4 canales y emplea el protocolo de comunicación SPI. El diagrama esquemático del divisor se puede observar en la Figura 5.10, la proporción de voltaje de salida con respecto al voltaje de entrada puede ser descrito mediante la ecuación (5.1)

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{in} \quad (5.1)$$

Donde:

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

V_{in} = Voltaje de entrada [V]

R_1, R_2 = Resistencias que integran al divisor de voltaje [Ω .]

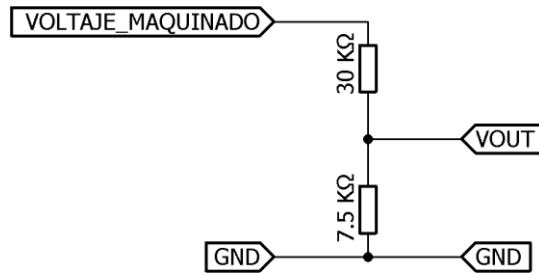


Figura 5.10: Divisor de voltaje para Adquisición de voltaje de polarización.

En la Figura 5.11 se muestra el diagrama electrónico de la etapa de adquisición de datos en la que la corriente de maquinado es recibida por el canal 2 del convertidor analógico digital, mientras que el voltaje de polarización es recibido por el canal número 1,

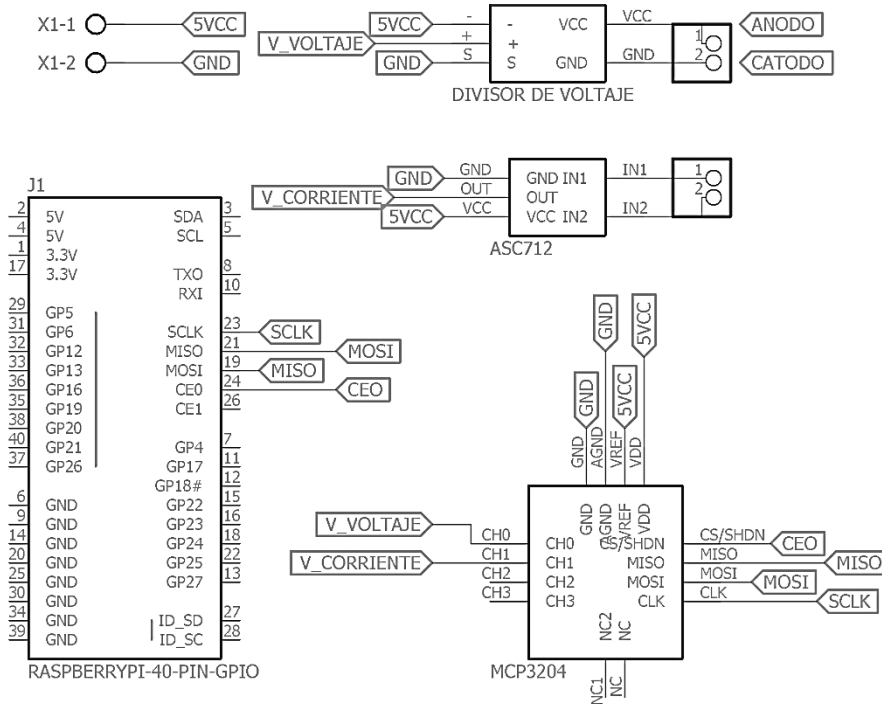


Figura 5.11: Conexión del convertidor A/D MCP3204 a la Raspberry Pi.

5.10 Codificación del sistema computacional

El software está integrado en una Raspberry Pi modelo B+, la cual está definida en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** como parte del sistema computacional; al ser una computadora de tamaño compacto, se instaló el sistema

operativo Raspbian, basado en la distribución Debían de Linux y diseñado especialmente para ser usado en la Raspberry Pi.

El puerto SPI se activa en la Raspberry Pi para poder adquirir los datos provenientes del ADC a través del puerto del mismo nombre: el comando es el siguiente:

```
>#raspi-config.
```

Se despliega un menú de configuración, entre las cuales se encuentra la habilitación del puerto SPI tal y como se aprecia en la Figura 5.12, procedimiento necesario para que se pueda realizar la identificación de cualquier dispositivo que haga uso del puerto y protocolo SPI, en este caso del MCP3204.

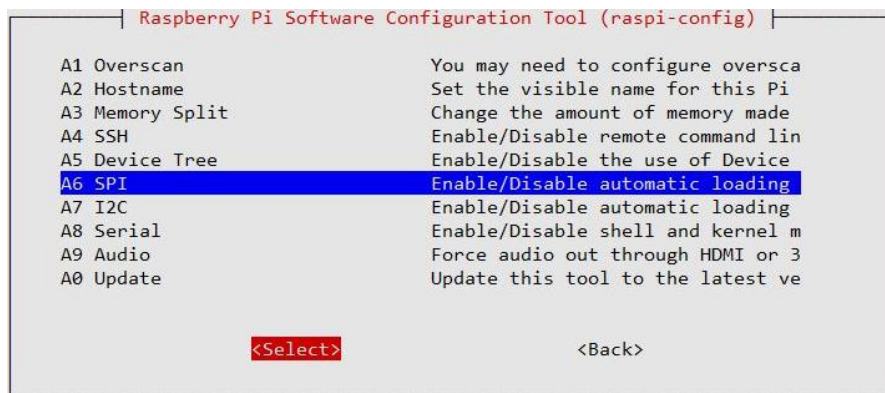


Figura 5.12: Habilidad del puerto SPI.

Para el desarrollo de la interfaz de usuario, se empleó el lenguaje de programación Python con la librería de desarrollo gráfico TKINTER, que permite el desarrollo de componentes gráficos como ventanas, botones y etiquetas que generan recursos visuales donde se presenten datos y permiten el control de la aplicación [27].

La codificación se basó en un diagrama de flujo que permite programar en Python la aplicación encargada de la adquisición de datos, el diagrama se expone en la Figura 5.13, donde se puede apreciar que se realiza un promedio de 30 muestras, donde cada muestra es tomada cada 2 ms.

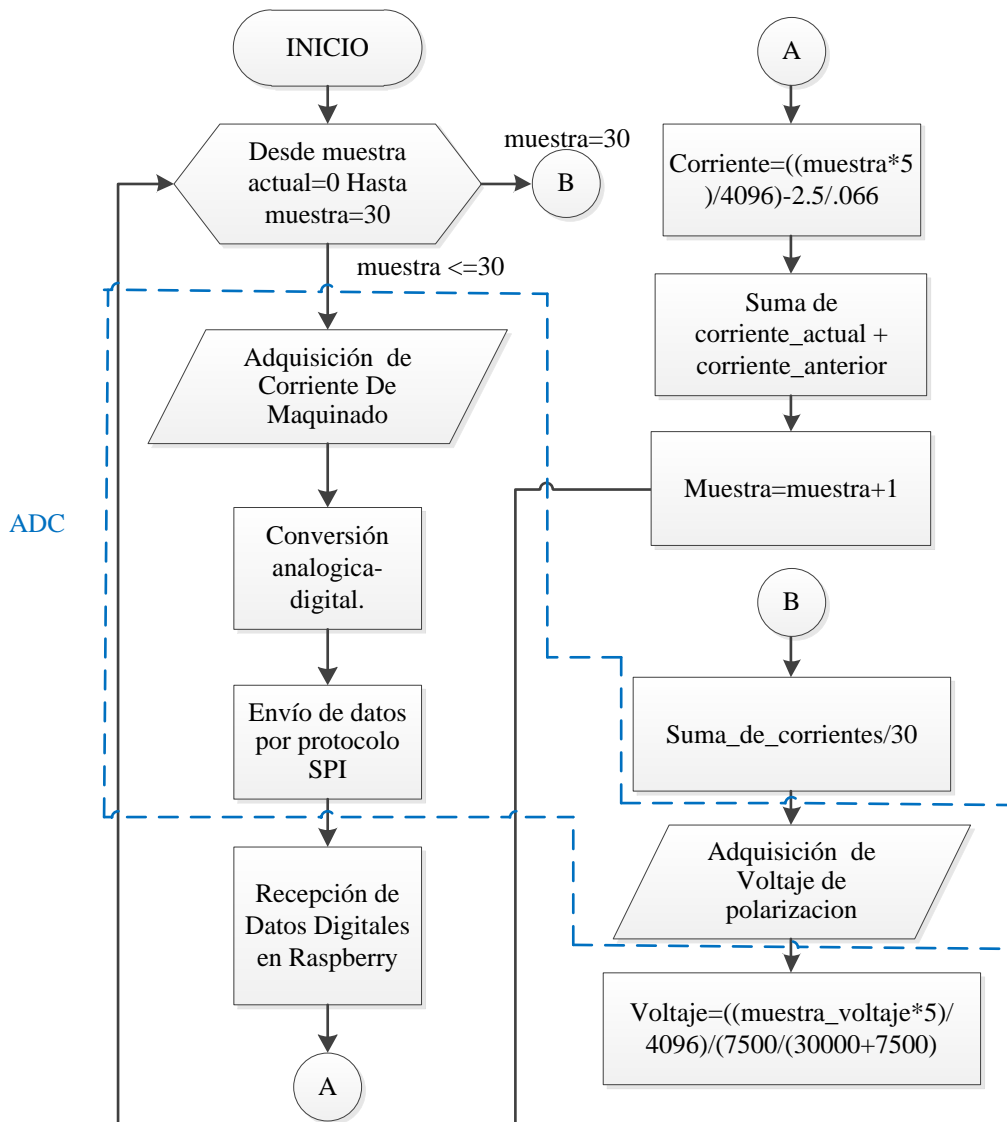


Figura 5.13: Diagrama de flujo del proceso de Adquisición del voltaje de polarización y la corriente de maquinado datos.

Usando las técnicas de la ingeniería de software se pudo realizar un diseño adecuado al modelo de prototipos para el desarrollo del sistema computacional el cual está integrado por una parte lógica y una física, al emplear esta técnica se desarrollaron versiones evolutivas del sistema para llegar a una versión final que cumpliera con todos los requerimientos que el cliente demanda, en total se generaron 5 versiones del prototipo en donde cada una superaba en funcionalidad a la anterior.

La versión 1 del prototipo consistió en cubrir el desplazamiento manual de la herramienta de trabajo, el usuario ingresa la cantidad de pasos a desplazar por el sistema mecánico y mediante el uso de botones indicar el eje y dirección.

La versión número 2 del prototipo integro una serie de etiquetas donde el usuario podía visualizar la cantidad de pasos desplazados por cada eje coordenado, así como su equivalente en mm, se integró la magnitud de la corriente de maquinado y el voltaje de polarización, la distancia ingresada por el usuario podía darse en milímetros.

En la versión 3 el sistema podía realizar desplazamiento horizontal de la herramienta de trabajo pudiendo generar trayectorias lineales por una longitud determinada por el usuario, la dirección y sentido son ingresadas por el usuario por medio de una casilla seleccionable, el desplazamiento vertical de la herramienta de trabajo seguía siendo manual.

La versión 4 del sistema computacional no tuvo cambios gráficos, las mejoras se dieron en el ámbito de software al integrar un control de remoción basado en la fórmula de remoción controlada descrita en la sección 2.

La versión 5 y final del sistema computación integra diferentes secciones de los prototipos anteriores, esto en un solo software al que se puede acesar por medio de una interfaz intuitiva, permite establecer la distancia inter electrodos, y un control de remoción que permite generar maquinado lineales y poligonales, donde el usuario ingresa los parámetros de longitud y profundidad, quedando al sistema la tarea de realizar estos maquinado de manera automática.

5.11 Versión 1 del sistema computacional

La primera versión de la interfaz gráfica se presenta en la Figura 5.15, donde el usuario ingresa la cantidad de pasos que desea que el sistema mecánico se desplace. Las flechas con dirección hacia la derecha e izquierda pertenecen al eje X, las dos flechas con dirección superior e inferior corresponden al eje Y finalmente las dos flechas con dirección vertical superior e inferior corresponden al eje Z, lo cual se representa en la Figura 5.14.

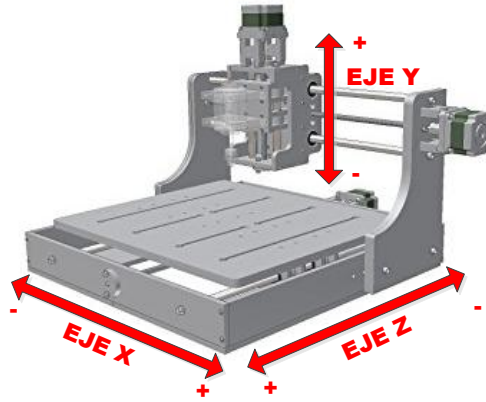


Figura 5.14: Representación de los ejes coordenados dentro del Sistema Mecánico.

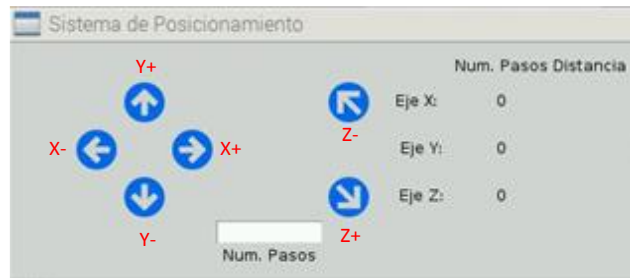


Figura 5.15: Interfaz gráfica para sistema mecánico.

La primera versión del software permite generar el movimiento de manera adecuada del sistema mecánico mediante la Raspberry Pi.

- Se identificaron los requerimientos para poder generar una segunda los cuales son:
- Monitoreo de la corriente de maquinado y el voltaje de polarización
- el usuario podrá ingresar la distancia que requiere que el electrodo sea desplazado a una velocidad fija de 13.3 mm/s.

5.12 Versión 2 del sistema computacional.

Con los requisitos identificados se procedió a implementarlos en una segunda versión del prototipo y poniéndola en funcionamiento para la caracterización del proceso de maquinado electroquímico.

Para el maquinado electroquímico se empleó una fuente de voltaje marca Matrix Modelo MPS-3003D a un voltaje de 5 V, como herramienta de trabajo se coloca un electrodo hueco de cobre con un diámetro exterior de 3.125 mm, con un recubrimiento de esmalte

aislante con la finalidad de que única zona que genere conductividad eléctrica sea la punta del electrodo. Como electrolito se usó una solución acuosa de $H_2O + NaCl$ en una concentración del 25%. Para que el proceso de maquinado electroquímico se realice de una manera adecuada la distancia entre la pieza y la herramienta se estima se mantenga a una separación de $350 \mu\text{m}$; para establecer esta magnitud, se acerca la pieza de trabajo a la herramienta de trabajo hasta medir continuidad eléctrica, después se alejan las dos piezas $350 \mu\text{m}$ estimando un avance de 8.5 pasos del motor del eje Z. En la Figura 5.16 se muestra el diagrama de la conexión eléctrica para establecer la distancia inicial inter electrodos.

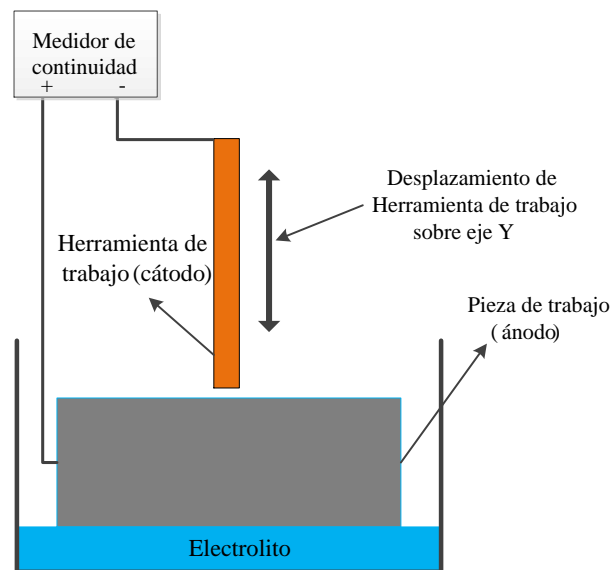


Figura 5.16: Conexión eléctrica para establecer la distancia inicial inter electrodos.

Se realizó una prueba mediante el ajuste del desplazamiento de la herramienta de trabajo de forma manual, el monitoreo de la corriente de maquinado se realizó de forma supervisada de forma que, al identificar una disminución en la corriente, se desplazaba el electrodo un determinado número de pasos. En caso de que la corriente de maquinado excediera la corriente inicial, se procedía a alejar la herramienta de trabajo, tratando de mantenerla en una distancia constante.

En la Figura 5.17 se muestra la interfaz de la segunda versión del software donde se agrega la visualización de la magnitud de la corriente de maquinado y el voltaje de polarización,

además del tiempo en que el sistema ha estado maquinando, para tener un registro del tiempo total en el que se realizó el proceso.



Figura 5.17: Versión 2 de la interfaz gráfica del proceso de maquinado electroquímico.

Con esta versión del software, se realizaron 4 pruebas del proceso; se utilizó como material de trabajo acero estructural AISI 1018, considerado como un acero de baja aleación; las pruebas tuvieron una duración de 25 minutos. Los resultados del maquinado se muestran en la Figura 5.18; la diferencia entre ellas es el tiempo de desplazamiento en el eje Y de la herramienta de trabajo, mientras que la corriente de maquinado se mantuvo en un intervalo de 250 a 300 mA.

En la Figura 5.18 (a) el desplazamiento vertical se realizó en intervalo 80 μm cada 5 minutos, lo que propició un ensanchamiento en el canal. En la Figura 5.18 (b) el desplazamiento vertical se realizó en intervalos de 160 μm cada 5 minutos, lo que originó que la distancia inter electrodos disminuyera debido a una velocidad de maquinado elevada, también provocó un aumento en la presión de salida de electrolito causando que el esmalte del electrodo se desprendiera en un costado provocando un maquinado irregular: en la figura se muestra en el costado derecho. En la Figura 5.18 (c) se realizó un maquinado monitoreando y manteniendo la corriente de maquinado fija (≈ 270 mA) lo cual fue controlado por el usuario, en la figura se aprecia un barreno con contorno bien definido y con el mínimo de irregularidades.

Los resultados de estas pruebas permiten establecer e identificar las modificaciones necesarias para el sistema computacional que son:

- Permitir la realización de un maquinado lineal en dirección X y Y, a una distancia predefinida.
- Agregar una opción para iniciar el proceso de maquinado.

- Agregar una opción para detener el proceso de maquinado en cualquier momento, es decir un paro de emergencia.
- Establecer la condición definida por el usuario sobre la distancia de maquinado en el eje Y (profundidad).
- Establecer la condición definida por el usuario sobre la distancia de maquinado en el eje X o Z (longitud).

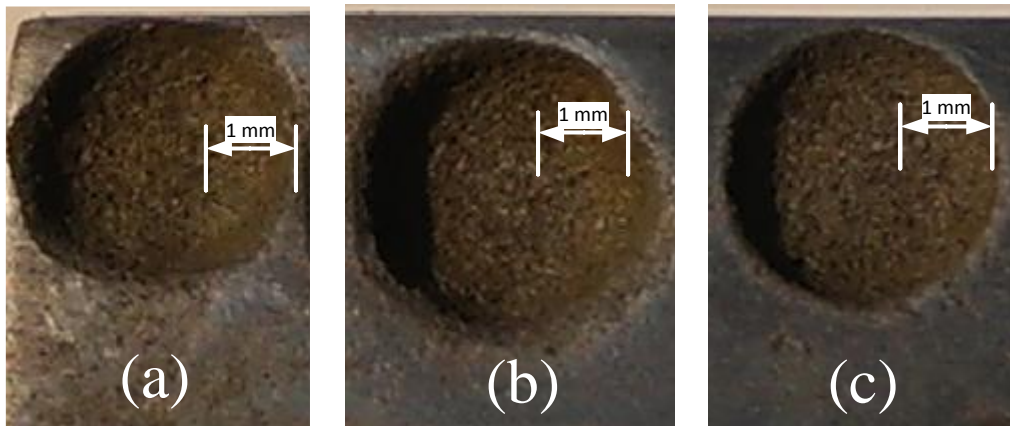


Figura 5.18: Pruebas de ECM para Caracterización (a), (b), (c).

5.13 Versión 3 del sistema computacional

En esta versión, es posible establecer una remoción de material en lazo abierto de forma que el usuario manipula directamente el movimiento de los ejes coordenados para generar una trayectoria lineal teniendo como ajuste el movimiento del desplazamiento de la herramienta de trabajo, así como el monitoreo de la corriente de maquinado y el voltaje de polarización.

En la Figura 5.19 se presenta el diagrama de flujo de la tercer versión, donde el inicio y duración del proceso se ajusta por parte del usuario, así mismo el control del desplazamiento vertical de la herramienta de trabajo. En la interfaz gráfica se determina el desplazamiento lineal dado en milímetros [mm] que se desea recorrer, así como el eje de avance a través de botones, que tienen la siguiente función:

- X += eje coordenado X, dirección positiva del plano cartesiano.
- X -= eje coordenado X, dirección negativa del plano cartesiano.
- Z += eje coordenado Z, dirección positiva del plano cartesiano.

- Z -= eje coordenado Z, dirección negativa del plano cartesiano.

El desplazamiento del eje Y está dado por las flechas de color azul con dirección superior e inferior. Cuenta con un botón que permite iniciar el movimiento horizontal del eje coordenado elegido y otro botón permite detener el movimiento del sistema mecánico.

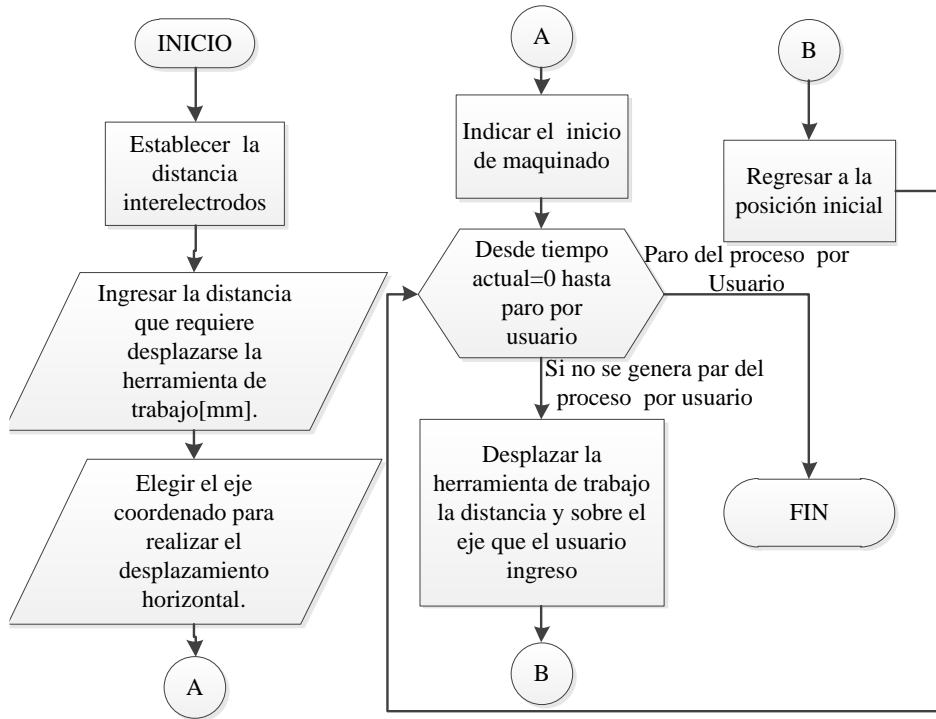


Figura 5.19: Diagrama de Flujo de funcionamiento para la versión 3 del sistema computacional.

La Figura 5.20 muestra la interfaz gráfica de la tercera versión, la cual presenta la magnitud de la corriente de maquinado y el voltaje de polarización, así como el tiempo de duración del maquinado electroquímico. Además, muestra la cantidad de pasos que se han realizado y su equivalente en distancia de desplazamiento de la herramienta de trabajo, Se incorpora un botón de reinicio general, el cual al ser presionado finaliza los procesos en ejecución.



Figura 5.20: Interfaz gráfica de la versión 3 del sistema computacional.

Con la tercera versión, se desarrolló una prueba de maquinado con acero AISI 1018 con un electrolito de solución de $H_2O + NaCl$ en una concentración al 20%. La corriente de maquinado se mantuvo a 273 mA, la cual, al realizar el desplazamiento de la herramienta en el eje X se tenía una variación de ± 5 mA, esto debido a la variación micrométrica del sistema mecánico, la cual estaba siendo monitoreada por el usuario que a su vez determinaba el avance en los ejes coordenados. En la Figura 5.21 se puede visualizar el resultado de la prueba de maquinado donde se puede notar que los resultados no son uniformes debido al control en lazo abierto ejercido por el operador.

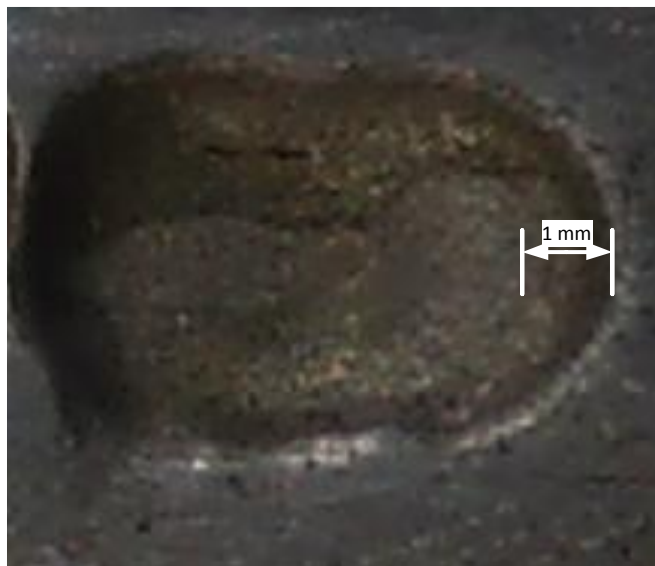


Figura 5.21: Prueba de maquinado electroquímico con la tercer versión del sistema computacional.

En la Figura 5.21 se puede apreciar que la remoción del material no fue uniforme, por lo que es requerido desarrollar en el sistema computacional lo necesario para generar una remoción controlada y uniforme.

Las necesidades a cubrir para la cuarta versión del sistema computacional son:

- Poder generar remoción de material con un control en lazo cerrado.
- Generar el maquinado en un eje, además del eje de profundidad.
- Poder reestablecer los valores que muestra la interfaz gráfica con respecto a distancia y cantidad de pasos que se desplaza el sistema mecánico.

5.14 Versión 4 del sistema computacional

En la sección 4.2 se aborda el proceso de maquinado electroquímico, donde se presenta la ecuación que permite establecer los parámetros que influyen en la remoción de material, donde es posible determinar la forma en que la remoción sea de forma constante, la cual está planteada por Villagómez *et al.* [6]; el uso de esta fórmula está restringida solo al desplazamiento vertical de la herramienta de trabajo y emplea la corriente de maquinado, el área frontal de la herramienta de trabajo y la constante de remoción del material a maquinar, como variables determinantes en el proceso. Se planteó la implementación de dicha fórmula para realizar maquinado vertical y horizontal al mismo tiempo.

Para poder agregar el desplazamiento horizontal, se toma como parámetro el total de área en mm^2 es decir tomando como referencia la Figura 5.22; para realizar una línea recta de 4 mm de longitud se considera como el área total la multiplicación del largo por el ancho esta expresado en mm .

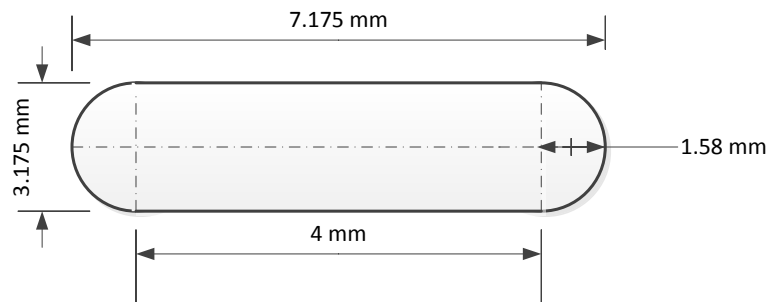


Figura 5.22: Maquinado lineal ideal de un canal de 4mm de longitud.

$$area_t = (3.175 \text{ mm} * 4 \text{ mm}) + (1.58^2 * \pi) = 20.61 \text{ mm}^2 \quad (5.2)$$

Se obtiene:

20.61 mm² Superficie total a maquinar.

Teniendo en consideración que:

0.03 $\frac{\text{mm}^3}{\text{A}}$ es la constante de remoción del acero 10-18 [1].

280 mA es la corriente inicial en el proceso de maquinado electroquímico.

Sustituyendo en 2.6:

$$f_r = \frac{\left(0.03 \frac{\text{mm}^3}{\text{A}}\right) (280 \text{ A})}{20.61 \text{ mm}^2} = .000407 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (5.3)$$

Para calcular el tiempo de maquinado total requerido para obtener 1 mm de profundidad se calcula con la ecuación (5.4):

$$T_m = \frac{\text{profundidad}}{\text{velocidad de remocion}} = \frac{1 \text{ mm}}{.000407 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} = 25.1 \text{ minutos} \quad (5.4)$$

Con el cálculo del tiempo de maquinado, se procedió al cálculo de los intervalos de tiempo para desplazar el electrodo de manera vertical, tomando como referencia que el sistema mecánico se desplaza 20μm por cada paso del motor en el eje Y por lo que se requiere un desplazamiento de 1 paso (20μm) cada 49.1 segundos.

$$\text{tiempo de espera entre cada paso} = \frac{200000 \text{ nm}}{407 \text{ nm/s}} = 49.1 \text{ s} \quad (5.4)$$

En la versión 4 del sistema computacional, el usuario puede establecer al principio la distancia inter electrodos de manera manual. Además, se agrega un botón cuya función es borrar el contenido de las etiquetas que muestran el valor de las variables que almacenan

las distancias de desplazamiento y el número de pasos recorridos por cada motor de cada eje coordinado, de esta manera no es necesario cerrar y volver a abrir la aplicación para borrar los datos que muestran las etiquetas de la interfaz gráfica.

En la Figura 5.23, se presenta el diagrama de flujo integrando las ecuaciones (5.2) a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** . En esta versión se debe ingresar: la distancia vertical a maquinarse, se establece la corriente de maquinado inicial la cual es sustituida en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el sistema calcula el tiempo de maquinado, la velocidad de remoción y el tiempo entre pasos.

Se genera un ciclo durante el cual se desplaza el electrodo en forma horizontal, hasta haber maquinado un canal completo en el sentido horizontal, después se hace un desplazamiento vertical de $20\mu\text{m}$ y se reinicia el ciclo anterior. Este proceso es repetido hasta que se completa la profundidad preestablecida (para esta prueba, la profundidad fue de 1mm).

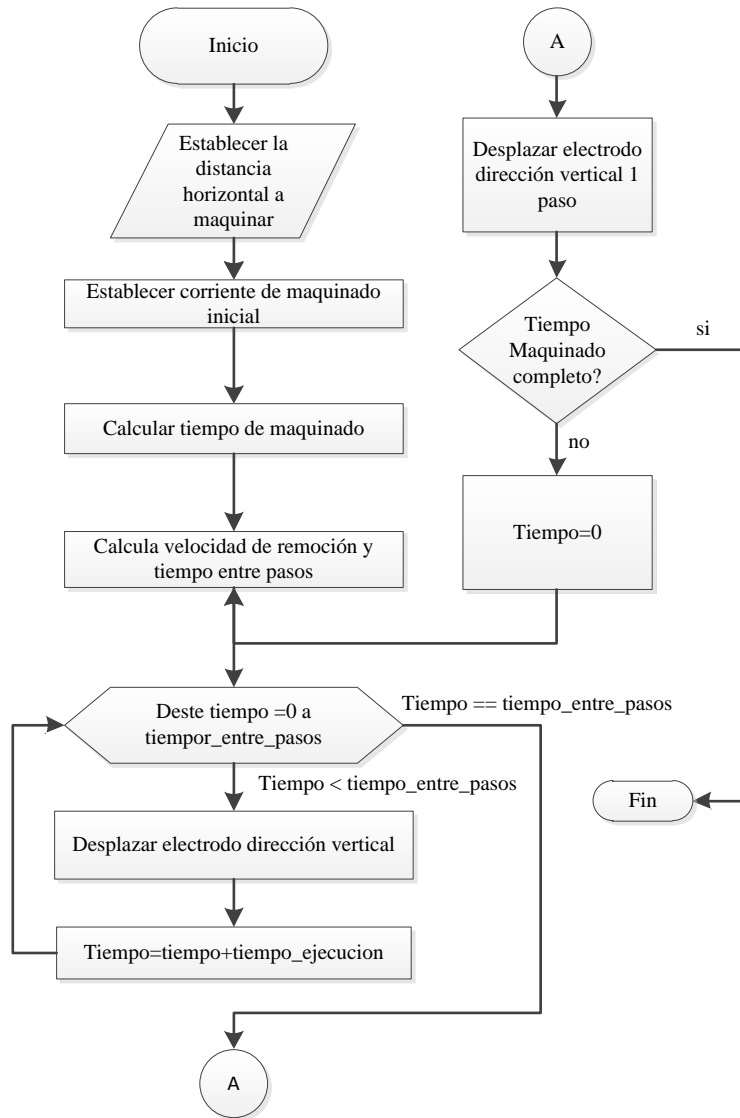


Figura 5.23: Diagrama de flujo para un maquinado vertical y horizontal basada en la ecuación para remoción controlada

Con los prototipos desarrollados y una vez evaluado su funcionamiento, se estableció el análisis de requerimientos para general un prototipo completo y funcional que integre todas las secciones desarrolladas, siguiendo el modelo por prototipos se inició con la fase de análisis donde se establecieron los requerimientos físicos y lógicos los cuales se enlistan enseguida:

- Interfaz gráfica que integre un acceso rápido a las secciones del software.
- Implementación de interruptores de fin de carrera.
- Establecer la distancia inter electrodos inicial de manera automática.
- Encendido y apagado del sistema de recirculación del electrolito.

- Establecer un punto fijo, como un punto inicial del sistema.
- Generar un maquinado de metal con geometrías cuadrangulares
- Visualizar el monitoreo del proceso de maquinado.
- Permitir al usuario desplazar el sistema mecánico manualmente.

5.15 Versión 5 del sistema computacional

Como primer paso, se genera la ventana principal del sistema computacional, bajo el nombre de CAMECM (Computer Assisted Manufactured Electro Chemical Machining), cuya función es dar una presentación al usuario y acceso a las diferentes secciones de las que está compuesto el sistema, en la

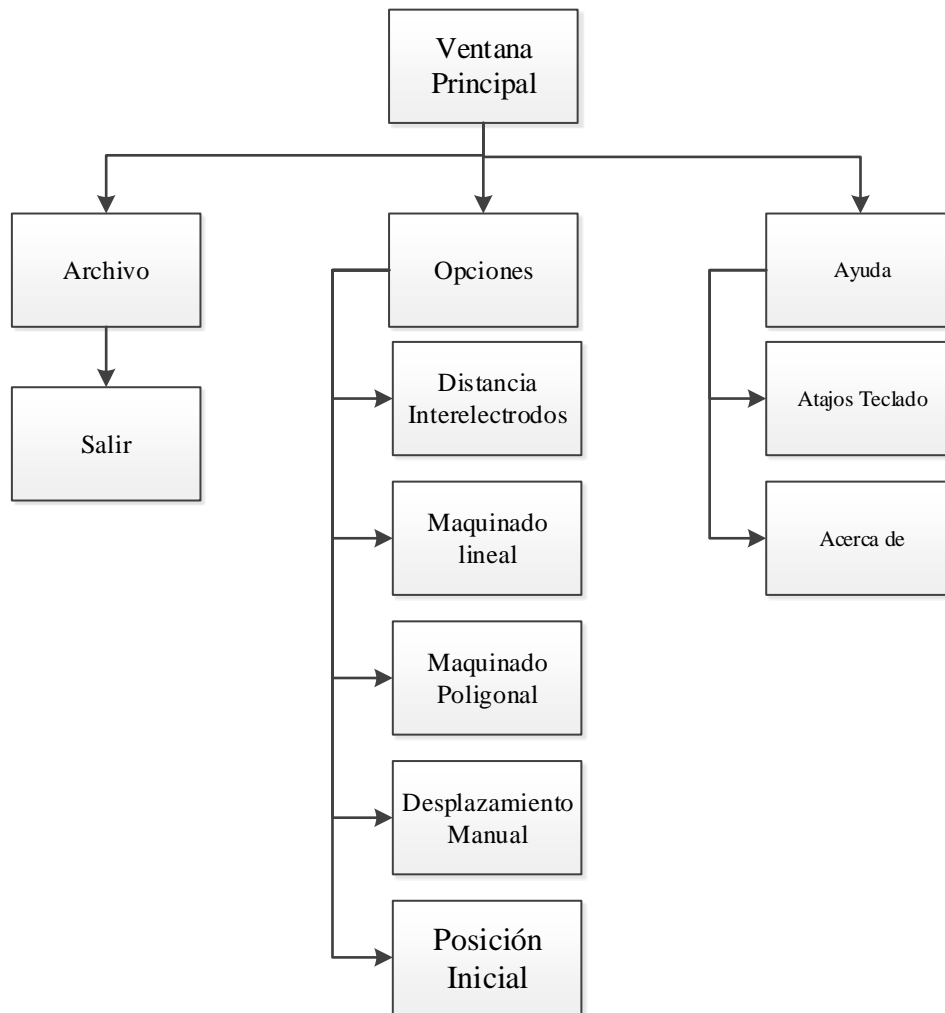


Figura 5.24 se presenta el diagrama de funcionamiento por bloques de la ventana principal. Cada submenú tiene la función de re direccionar al usuario a una sección específica del sistema acorde al nombre que tiene.

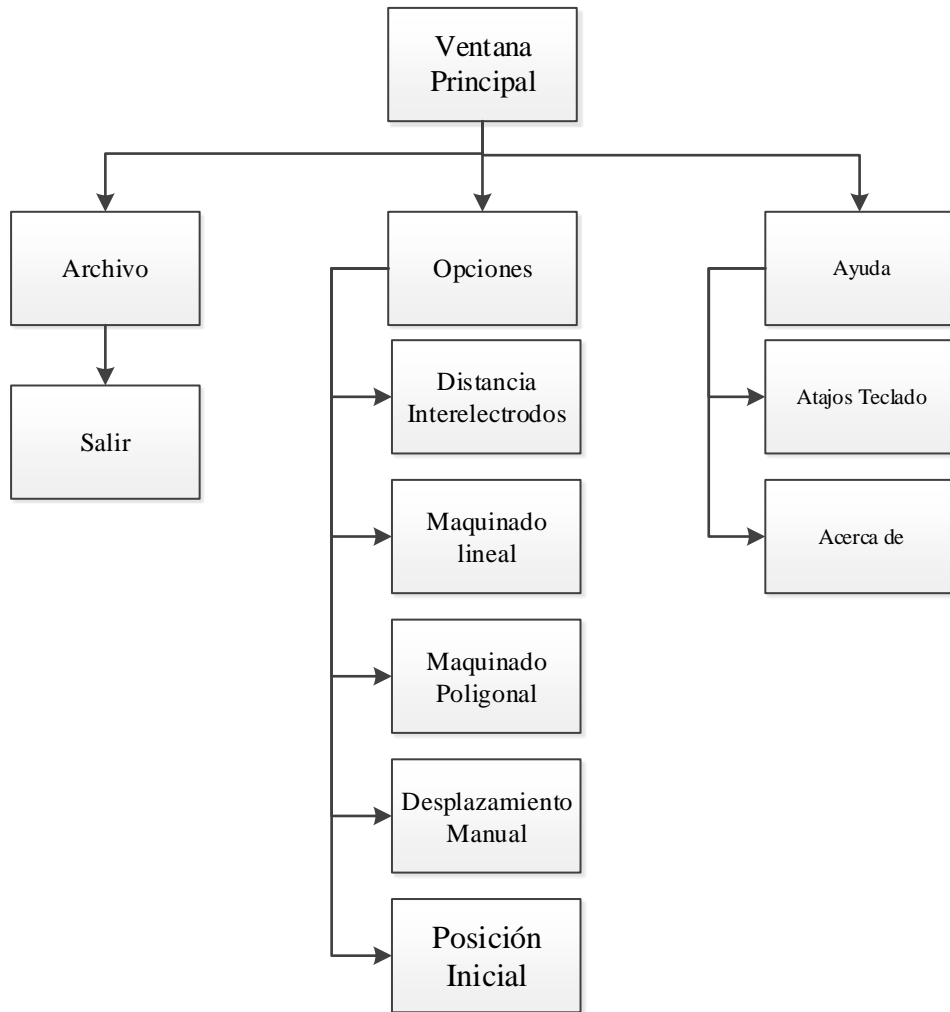


Figura 5.24: Diagrama a bloques del funcionamiento de la ventana principal.

En la Figura 5.25 se presenta la ventana principal del sistema CAMECM 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 CAMECM, cuenta con 3 submenús mediante los cuales se puede acceder a las diferentes secciones del sistema.



Figura 5.25: Ventana Principal Sistema CAMECM.

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 5.26 se muestra las opciones que se despliegan al acceder al submenú **Archivo**.

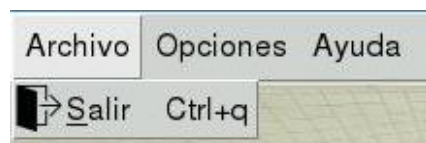


Figura 5.26: Submenú Archivo.

El submenú **Opciones** está integrado por:

- **Distancia inter electrodos:** opción que despliega una venta mediante la cual se puede establecer la distancia inter electrodos de manera automática, así como reubicar a la posición por defecto al sistema mecánico en caso de desearlo, a esta opción se puede ingresar de igual manera pulsando el conjunto de teclas “CTRL+d”.
- **Maquinado Lineal:** 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:** 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”.
- **Posición Inicial:** opción a la cual se puede ingresar mediante la combinación de teclas “CTRL+f”, despliega una ventana mediante la cual al pulsar un botón el sistema mecánico se posiciona de manera automática a su posición inicial.

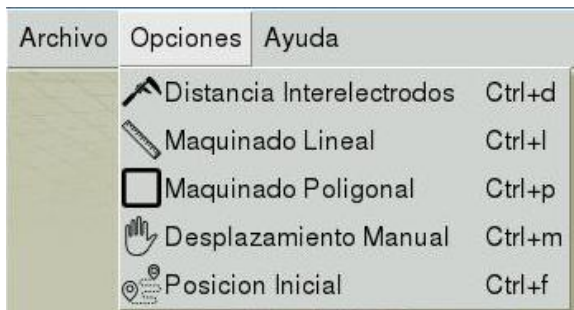


Figura 5.27 se muestra el submenú que se despliega al ingresar a la sección de **Opciones**.

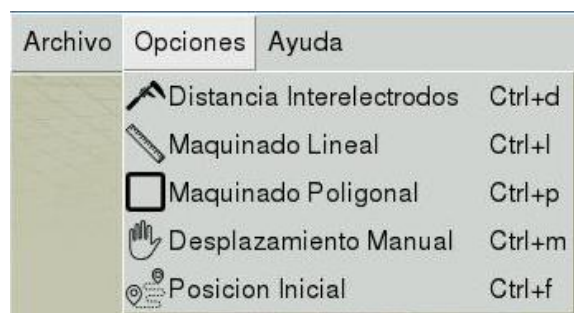


Figura 5.27: Submenú Opciones.

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 5.28 se muestra las opciones que se despliegan al ingresar al submenú **Ayuda**.

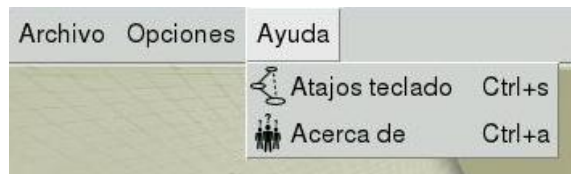


Figura 5.28: Submenú Ayuda.

Uno de los requisitos identificados fue la implementación de interruptores de final de carrera, aunado al control del sistema de recirculación del electrolito y el establecer la distancia inter electrodos inicial, razón por la cual se modificó la estructura física del sistema computacional, estas modificaciones pueden ser apreciadas en el diagrama a bloques de la Figura 5.29.

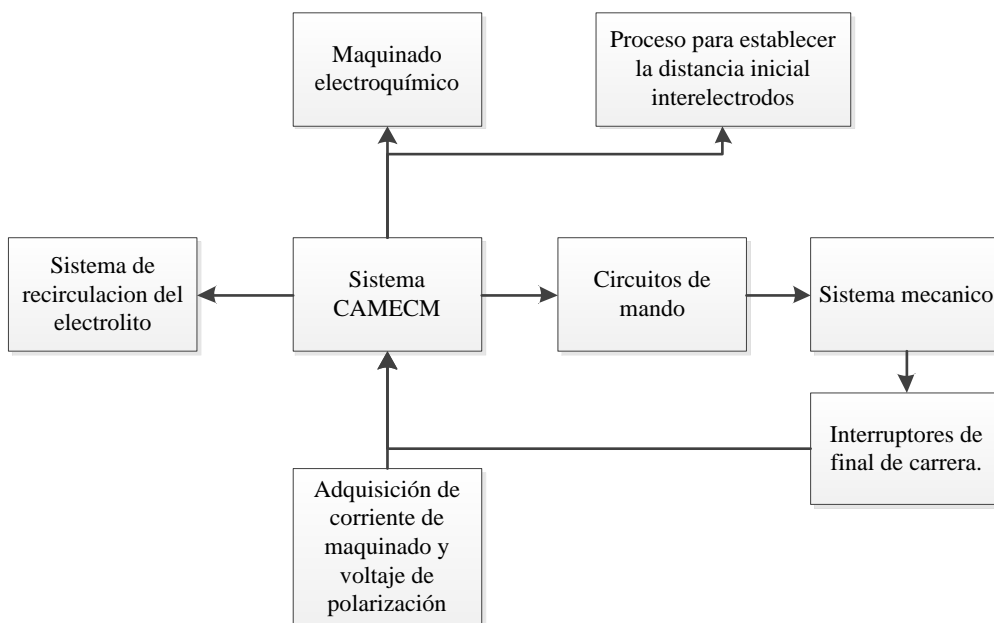


Figura 5.29: Diagrama a bloques del sistema CAMECM mostrando las secciones de las que está compuesto.

5.15.1 Establecer distancia inter electrodos inicial.

El proceso para establecer la distancia inicial inter electrodos se realiza mediante la implementación de un circuito, el cual permite detectar la continuidad eléctrica entre la pieza y la herramienta de trabajo; la cual activa una interrupción que tiene un valor de 1 lógico al detectar la continuidad, de lo contrario sigue acercando la pieza de trabajo hasta que sea detectada la continuidad. Una vez detectada la continuidad el sistema eleva la herramienta de trabajo $360\mu m$, distancia inter electrodos establecida en la investigación como parámetro fijo para iniciar el proceso de maquinado electroquímico. El diagrama esquemático representando este proceso se puede apreciar en la Figura 5.30.

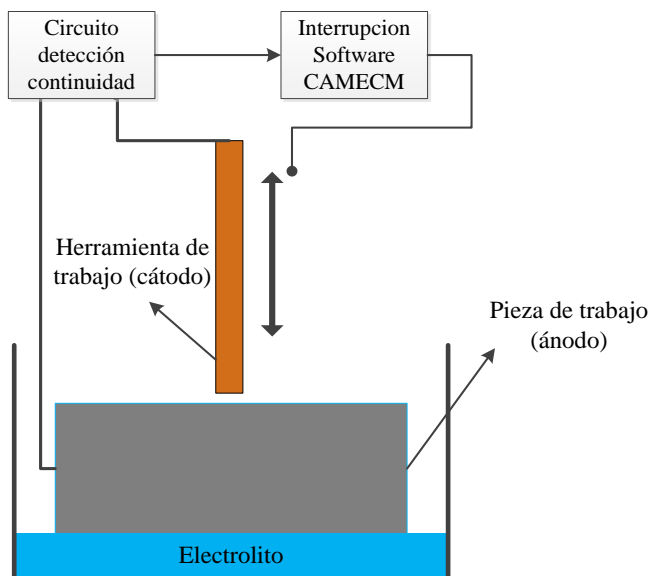


Figura 5.30: Detección de continuidad y envío de señal a software CAMECM.

Con la integración del circuito para detección de continuidad se procedió al diseño de diagrama de flujo el cual serviría como base para la codificación en Python, en donde se implementan 3 procesos principales, el primero para establecer la distancia inter electrodos, el segundo, es un proceso independiente el cual se encarga del posicionar el sistema mecánico a un posición inicial, el ultimo cierra la ventana, termina los procesos y retorna al usuario a la ventana principal.

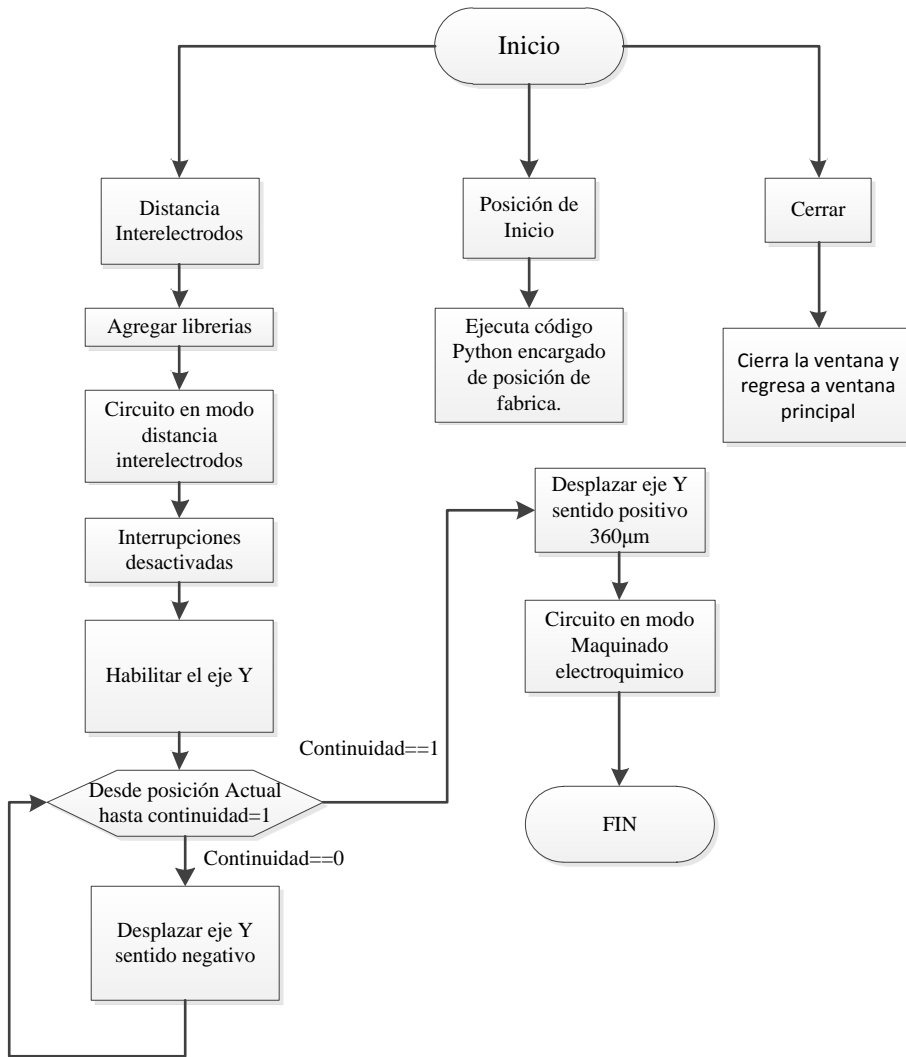


Figura 5.31: Diagrama de flujo de funcionamiento de Ventana Distancia Inter electrodos.

Una vez desarrollado el diagrama de flujo se implementó la codificación de esta sección del sistema que al seleccionar la opción **Distancia Inter electrodos** se despliega la venta mostrada en la Figura 5.32 la cual consta de dos botones, el primero de color azul (1) al ser presionado invoca a una función del código la cual está encargada de establecer la distancia inter electrodos, 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 $360\mu m$, y se activa el sistema de maquinado electroquímico, el icono de color verde (2), al ser presionado invoca un código Python el

cual se encarga de posicionar el sistema mecánico a una posición de inicio, (esta sección será descrita posteriormente), el botón rojo (3) cierra la ventana automáticamente y retorna a la ventana principal.



Figura 5.32: Ventana para establecer Distancia Inter electrodos inicial.

5.15.2 Maquinado lineal.

Una sección implementada y resultado de las versiones anteriores del software es la que permite genera maquinado lineal y a la cual se accede al elegir **Maquinado lineal**, del menú **Opciones** de manera inmediata se despliega la ventana mostrada en la Figura 5.33, la cual le permite al usuario la posibilidad de generar maquinado de forma lineal, esta ventana interactúa directamente con el usuario, solicitándole un nombre con el cual se identificará al proyecto (1) también le solicita la longitud lineal que desea maquinar (2) así como la profundidad que se requiere (3), además de poder elegir el eje y el sentido en que se quiere hacer el maquinado (4), cuenta con tres botones en la parte inferior, el primero y de color verde (5), 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 (6) tiene la finalidad 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 (7) al ser presionado ejecuta una instrucción la cual cierra la ventana y retorna al usuario a la ventana principal.

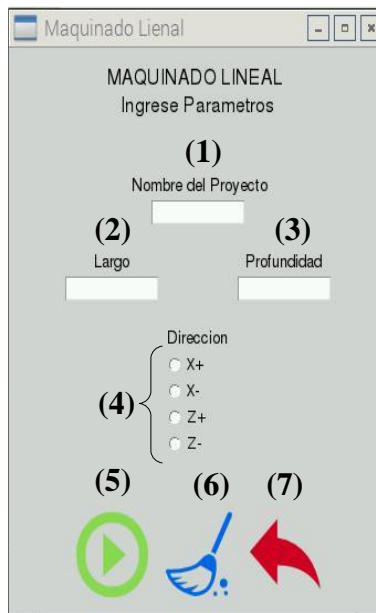


Figura 5.33: Ventana Maquinado lineal.

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 5.34

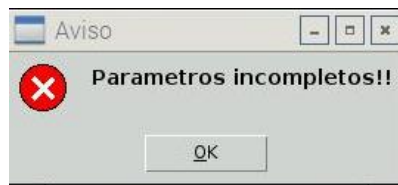


Figura 5.34: Mensaje de aviso en caso de parámetros incompletos.

En la Figura 5.35 se puede observar el diagrama de flujo de funcionamiento de la venta maquinado lineal

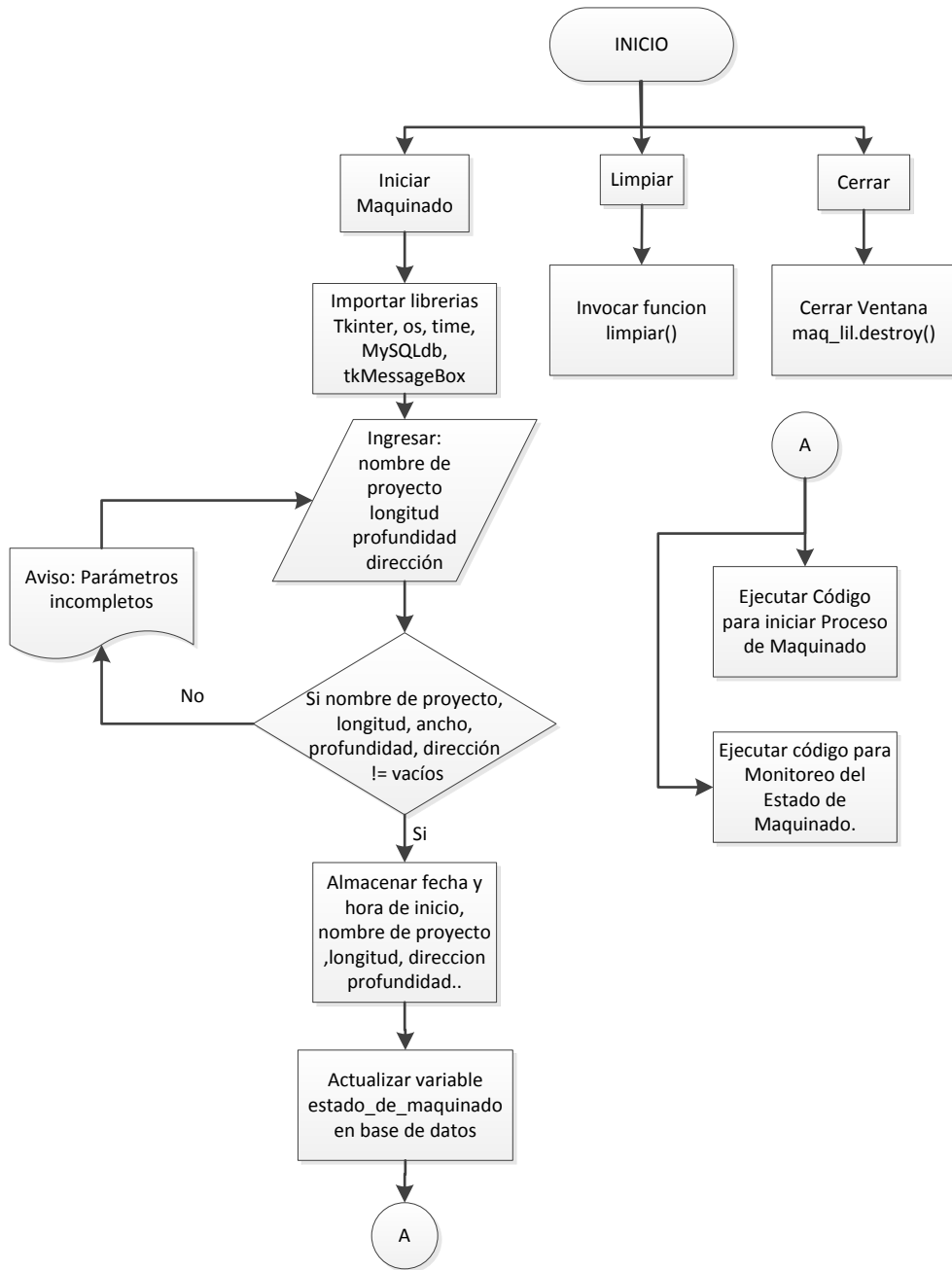


Figura 5.35: Diagrama de flujo de funcionamiento para Ventana Maquinado Lineal.

5.15.3 Maquinado poligonal

Dentro del análisis de requisitos se menciona la necesidad de poder generar maquinados de formas geométricas cuadrangulares con la profundidad que el usuario ingrese, así como la longitud que este indique. Al elegir **Maquinado poligonal** del menú **Opciones** de la ventana principal, se despliega una ventana la cual se puede ver en la Figura 5.36, la cual

permite al usuario poder generar maquinados con formas cuadrangulares o rectangulares, el usuario solo debe ingresar un nombre con el cual se identificará al proyecto de maquinado (1), el largo (2) y ancho (3) de la forma; así como la profundidad (4); cuenta con 3 botones los cuales desencadenan una serie de eventos, al presionar el primero y de color verde (5) se inicia el proceso de maquinado bajo los parámetros que el usuario ingreso. El segundo de color azul (6) limpia los campos para que se introduzcan valores diferentes y el tercero de color rojo (7) cierra la ventana.

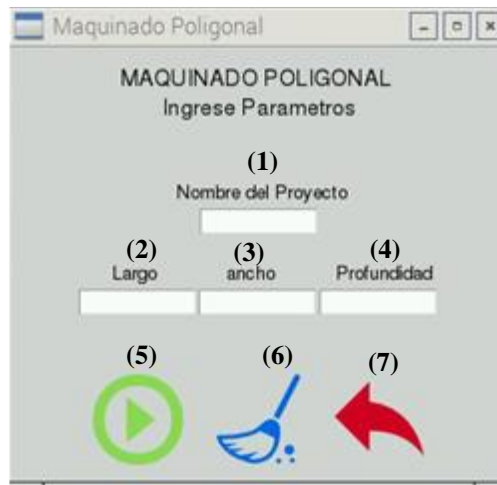


Figura 5.36: Ventana del proceso de Maquinado poligonal.

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

Figura 5.37.

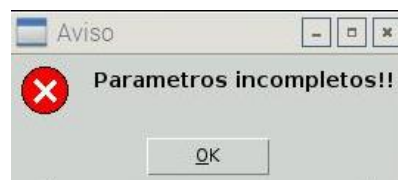


Figura 5.37: Mensaje avisando a usuario la falta de algún parámetro.

La codificación necesaria para desarrollar esta sección del sistema computacional se basó en el diagrama de flujo presentado en la Figura 5.38.

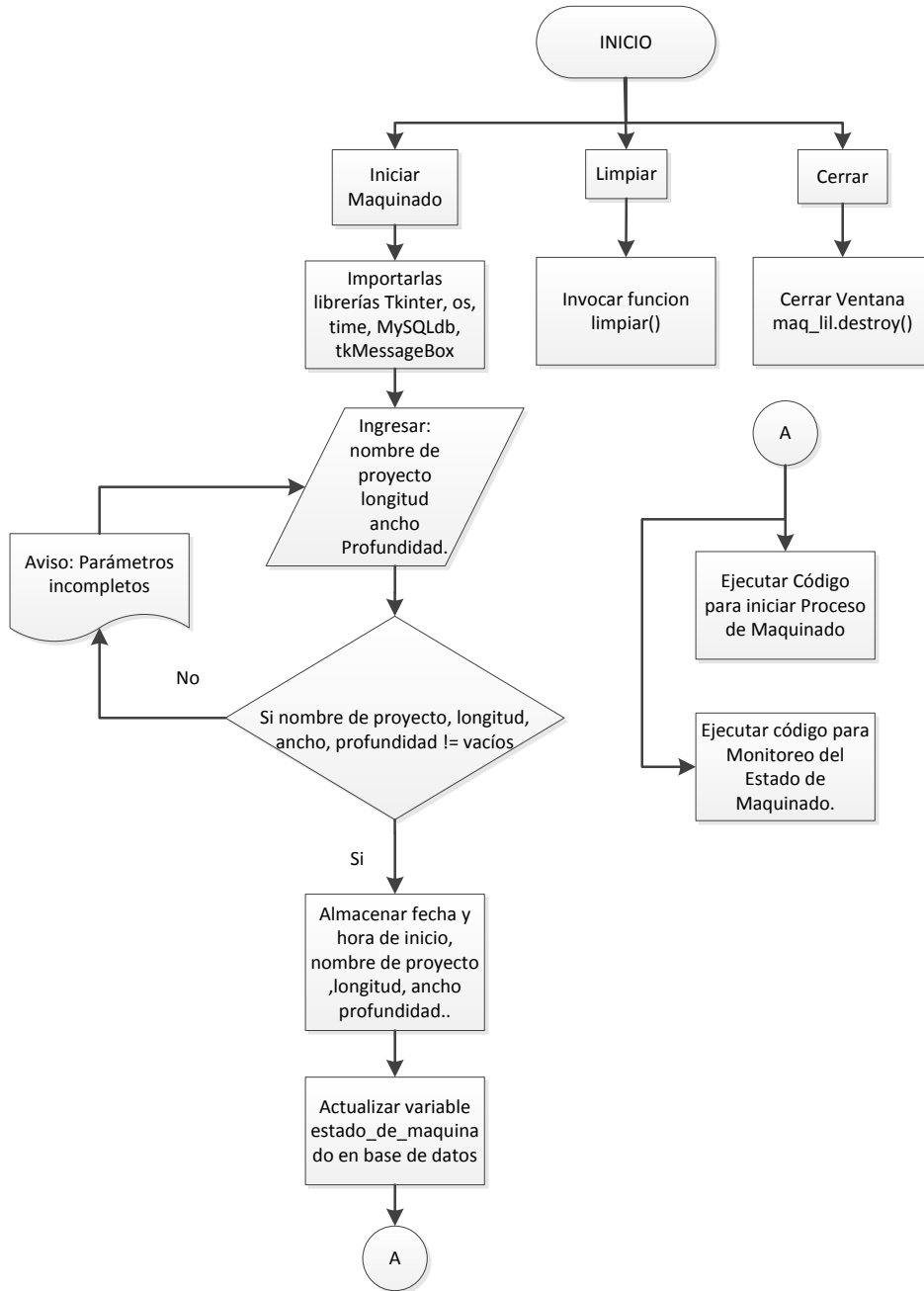


Figura 5.38: Diagrama de Flujo de Ventana Maquinado Poligonal

Se puede observar que esta sección del sistema cuenta con 3 procesos principales, el primero definido como INICIO DE MAQUINADO, se importan las librerías necesarias para el funcionamiento del código fuente el usuario ingresa los parámetros solicitados para realizar el proceso de maquinado electroquímico, si los parámetros son los indicados el

sistema permite realizar el proceso de maquinado almacenar los datos de maquinado y se invoca a un código Python que se encarga de realizar el proceso de maquinado. En caso de que el usuario no ingrese algún parámetro se cuenta con una validación la cual despliega un mensaje de error.

5.15.4 Desplazamiento mecánico manual

En el primer prototipo el usuario podía realizar el desplazamiento manual del sistema mecánico desde una interfaz gráfica, lo cual sirvió de ayuda para realizar la primera caracterización del proceso de maquinado electroquímico; ésta característica es parte del sistema computacional para tener acceso al desplazamiento manual se ingresa seleccionando el submenú **Opciones**, donde se despliega una ventana la cual permite al usuario desplazar manualmente el sistema mecánico, para desplazar la herramienta de trabajo hasta una posición deseada, el usuario solo debe ingresar la distancia que desea desplazar algún eje (1), y a continuación presionar el botón correspondiente a dicho eje(X+, X-, Y+, Y-, Z+, Z-). La correspondencia de cada eje mecánico con respecto a los botones de la ventana es mostrada en la Figura 5.39.

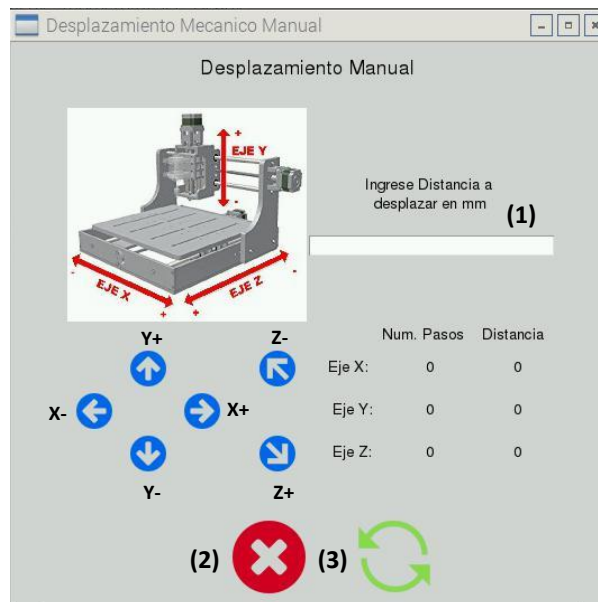


Figura 5.39: Ventana Desplazamiento Manual de Software CAMECM.

La ventana implementa etiquetas la cuales cambian con respecto a la cantidad de pasos y distancia que se ha desplazado cada eje mecánico, mismas que pueden retornar a un valor 0 cuando se presiona el botón de color verde (3), para cerrar la ventana y regresar a la

ventana principal se presiona el botón de color rojo (2). El diagrama de flujo de esta ventana se presenta en la Figura 5.40.

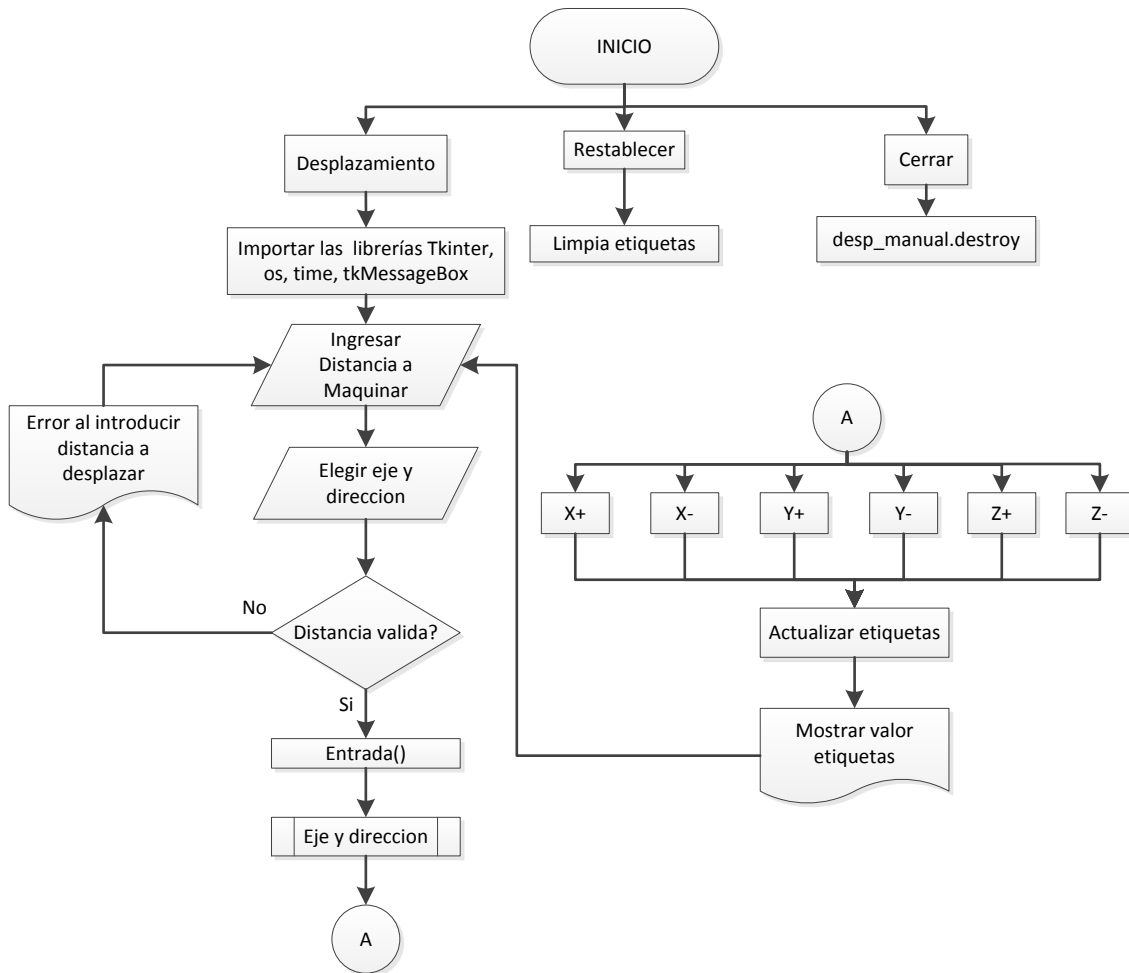


Figura 5.40: Diagrama de flujo de ventana Desplazamiento Manual.

El código de esta sección cuenta con 3 procesos principales los cuales son invocados al presionar los botones, el primero definido desplazamiento en primer lugar importa las librerías para el funcionamiento del código, posteriormente el usuario debe ingresar la distancia en [mm] a desplazar, y enseguida presionar el botón correspondiente al eje y dirección, de ser válido el parámetro se invoca a una función que genera los pulsos para los circuitos de control del sistema mecánico y que de esta manera se genere el movimiento mecánico, el segundo proceso definido como reestablecer se encarga de borrar el contenido de las etiquetas que muestran la distancia y pasos que se ha desplazado el

sistema mecánico, el último se encarga de terminar todos los procesos, cerrar la ventana y re direccionar al usuario a la ventana principal.

El sistema implementa una validación para el parámetro que ingresa el usuario y determina la distancia que se va a desplazar el sistema mecánico , la cual comprueba que el parámetro ingresado sea válido o en su defecto si el campo está 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 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 5.41.



Figura 5.41: Aviso del sistema a detectar error en el parámetro DISTANCIA.

5.15.5 Posición de Inicio

El software tiene implementada la opción **Posición de Inicio**, 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 inicio 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 (1) 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, el segundo botón de color rojo (2) el cual desempeña la función de cerrar la ventana y retornar al usuario a la ventana principal en la Figura 5.42 se puede observar la ventana encargada de establecer la posición de fábrica del sistema mecánico.

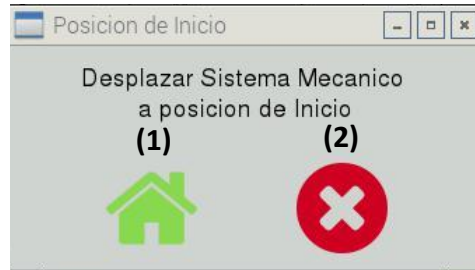


Figura 5.42: Ventana Posición de Inicio del software.

En la Figura 5.43, se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento de la ventana Posición de Inicio, primero se importan las librerías necesarias para el funcionamiento de esta sección de código, posteriormente 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 desplaza 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.

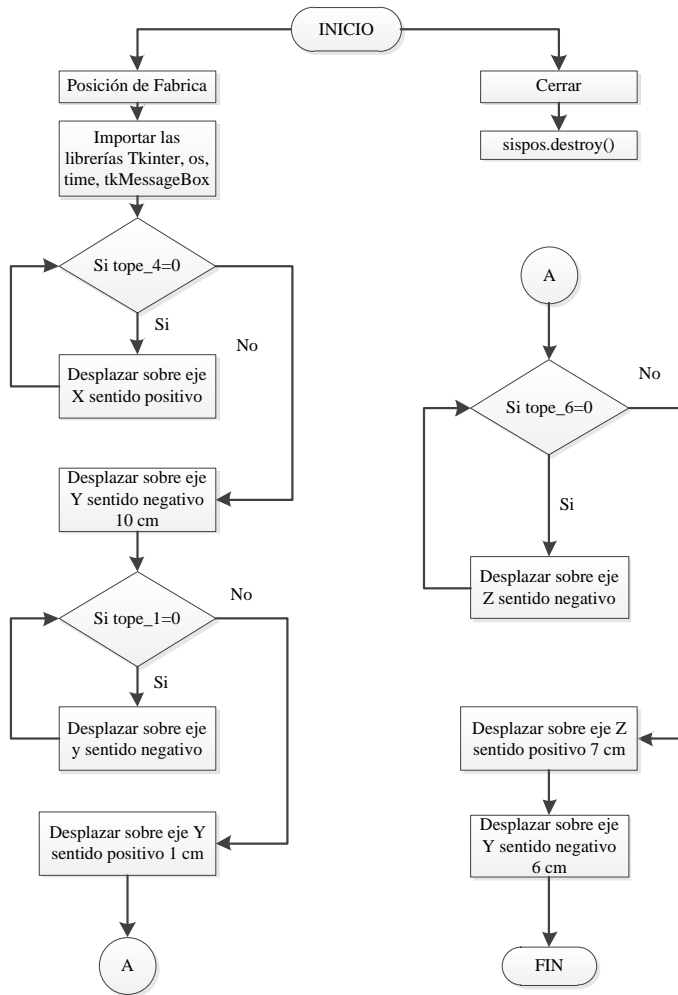


Figura 5.43: Diagrama de flujo ventana Posición de Inicio.

5.15.6 Estado de Maquinado

Conocer el estado del proceso de maquinado que se está realizando en ese momento fue uno de los requisitos primordiales a implementar en el sistema, esta sección de código está vinculada directamente con las secciones de MAQUINADO LINEAL Y MAQUINADO POLIGONAL dado que en cuanto se inicia el proceso de maquinado desde cualquiera, esta sección de código es invocada, dentro del sistema se define por el nombre **maquinado.py**, en la Figura 5.44, se puede observar dicha ventana donde se muestra el nombre del proyecto que se está maquinado (1) así como el tipo de maquinado (lineal o poligonal) (2), fecha y hora en el que se inició el proyecto (3), 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 (4)), la magnitud de la

corriente de maquinado (6) así como el voltaje de polarización (7), la profundidad que el usuario desea obtener en el maquinado (8) y la profundidad que se está obteniendo (9). Cuenta con dos botones, el primero de color naranja detiene el proceso de maquinado (10) si así lo desea el usuario y el de color rojo cierra la ventana (11).



Figura 5.44: Ventana Estado de Maquinado.

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 5.45.

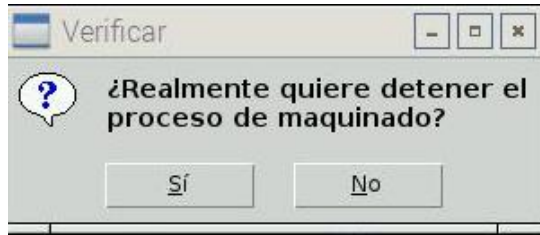


Figura 5.45: Ventana de verificación para el paro del maquinado.

En el caso de que el usuario no requiera 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 5.46. 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.

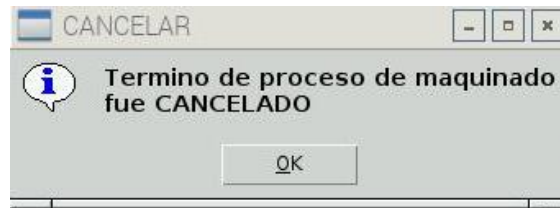


Figura 5.46: Mensaje informativo de cancelación de paro de maquinado.

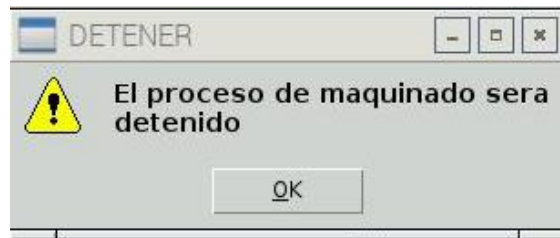


Figura 5.47: Mensaje informativo de paro del maquinado.

En la Figura 5.48 se puede apreciar el diagrama de flujo que sirvió como base para desarrollar la codificación necesaria para la ventana Estado de Maquinado.

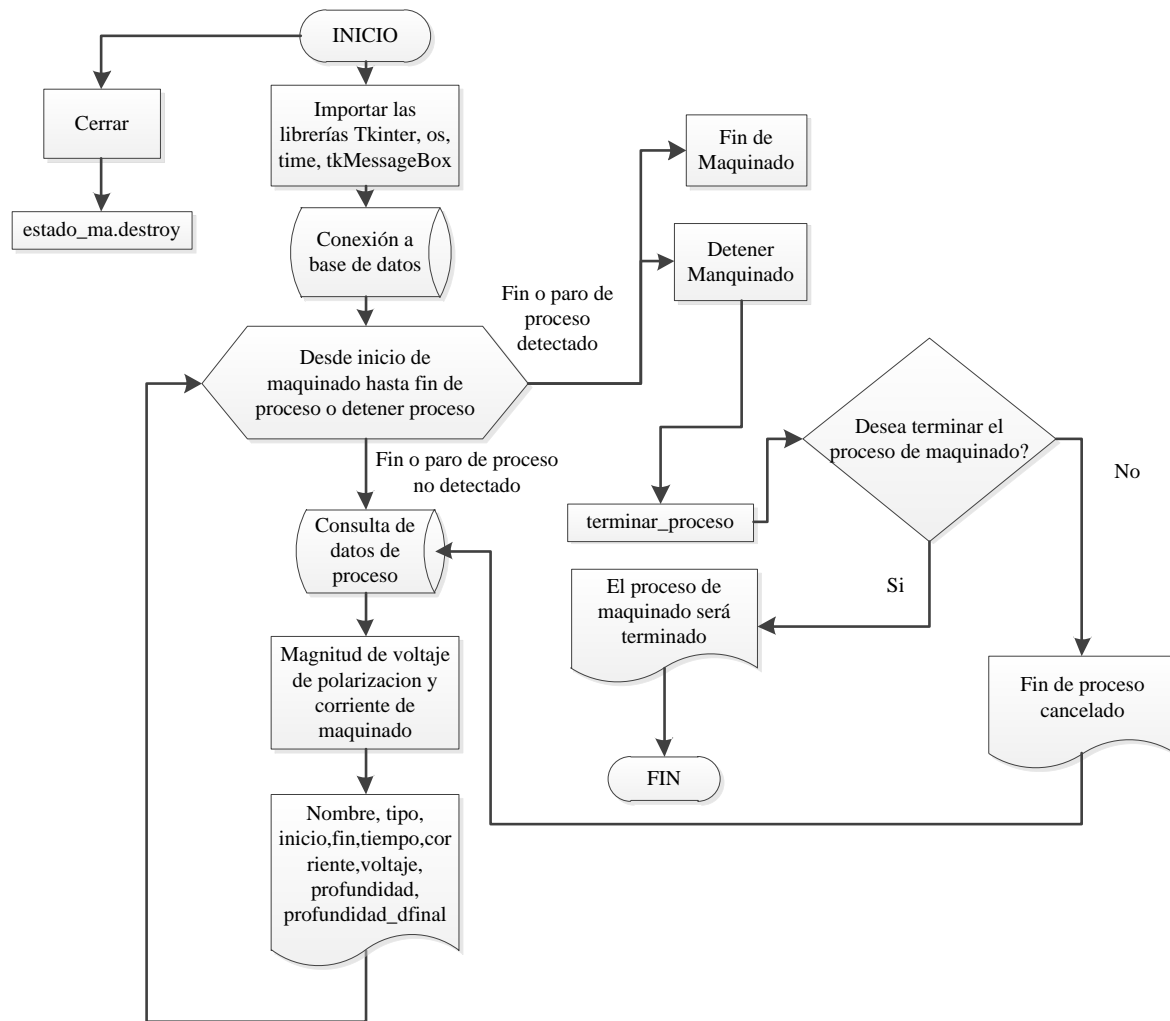


Figura 5.48: Diagrama de flujo Ventana Estado Maquinado software CAMECM.

5.15.7 Atajos de Teclado

Como sección adicional y para favorecer el acceso a cada sección del software se integró una sección de información para ser consultada por el usuario, la cual se ingresa al seleccionar la opción del menú Ayuda, donde se despliega una ventana que muestra al usuario una lista con las diferentes partes del software CAMECM, 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 5.49, se muestra la ventana Atajos de teclado. Esta ventana es de carácter informativo para el usuario y en la cual no se ejecuta ningún tipo de proceso o tarea.



Figura 5.49: Ventana Atajos de Teclado.

Esta ventana es de carácter informativo para el usuario y en la cual no se ejecuta ningún tipo de proceso o tarea.

5.15.8 Ventana Acerca de

La opción **Acerca de**, del menú **Ayuda**, despliega una ventana la cual 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 5.50 se muestra la ventana **Acerca de**.



Figura 5.50: Ventana Acerca de.

5.15.9 Proceso de maquinado

La sección del sistema computacional que se encarga de llevar a cabo el control de la remoción de material dentro del proceso de maquinado electroquímico está a cargo del código Python que lleva el nombre de maquinado.py, este código fuente es ejecutado fuera de la interfaz gráfica y de manera continua, una vez que el usuario ha elegido la opción de maquinado poligonal o lineal del sistema computacional, ingresado los parámetros solicitados e iniciado el proceso de maquinado activa de manera inmediata este código, su diagrama de flujo se expone en dos secciones en la Figura 5.51 y en la Figura 5.52 esto dada su extensión; al inicio se importan todas la librerías Python necesaria para su funcionamiento, enseguida se consulta la base de datos donde se almacenaron los parámetros ingresados por el usuario, se identifica que tipo de maquinado será realizado, si el tipo de maquinado corresponde a uno lineal se determina el número de muestras de la corriente de maquinado, considerando la longitud que tendrá el maquinado, ésta cantidad es calculada dividiendo la longitud entre 0.12 mm equivalente a la longitud que se desplaza la herramienta de trabajo con una secuencia de 3 pasos del motor paso a paso, la cantidad resultante de muestra es multiplicada por 2 considerando la longitud desplazada en una trayectoria de ida y vuelta. Mediante la fórmula (5.5) contenida en Groover, P.M [1], se calcula la resistividad del electrolito.

$$r = \frac{Va}{gI} \quad (5.5)$$

Donde:

I = Corriente de maquinado (A)
a = area frontal de la herramienta de trabajo (mm²)
V = Voltaje de polarizacion (V)
g = distancia interelectrodos (mm)
r = resistividad del electrolito (Ω * mm)

Nota: Se profundizará más a cerca de esta técnica en una sección posterior del documento.

Posteriormente se inicia un ciclo que durará hasta que se alcance la profundidad deseada o hasta que el usuario detenga el proceso de maquinado electroquímico, durante este ciclo, la herramienta realizará un desplazamiento lineal de ida y vuelta, mientras se realiza el proceso de maquinado con la adquisición de la corriente de maquinado, sumándola y

promediándola al final de cada recorrido para que de esta manera se pueda calcular la distancia inter electros mediante la fórmula (5.6) resultado del despeje para g en (5.5).

$$g = \frac{Va}{Ir} \quad (5.6)$$

Si la distancia inter electrodos supera los 0.04 mm, que es la resolución mínima del sistema mecánico, la herramienta de trabajo es desplazada 0.04mm con el objetivo de mantener la distancia inter electrodos cercana a los 0.36 mm , después se realiza una actualización en la base de datos de la profundidad alcanzada para ese maquinado, en caso contrario de no alcanzar los 0.04mm el proceso continua hasta alcanzar ese valor, si se ha alcanzado la profundidad deseada se detiene el proceso de maquinado y el movimiento mecánico, así como todos los proceso secundarios relacionados. Finalmente se genera un archivo de extensión .xls donde se almacena la magnitud de las variables monitoreadas que se adquirieron durante todo el proceso de maquinado. Mientras no exista un proceso de maquinado este código fuente se sigue ejecutando a la espera del inicio de un proceso de maquinado por parte del usuario.

En la Figura 5.52 se puede visualizar la sección B del diagrama de flujo del código maquinado, en el caso de que el usuario elija un maquinado de tipo poligonal el funcionamiento es similar, donde la diferencia radica en que el maquinado poligonal es una secuencia continua de trayectorias lineales, el número de muestras tomadas es mayor así como el tiempo de ejecución, la validación y condiciones son iguales, donde se debe alcanzar la profundidad deseada por el usuario, al alcanzar esta profundidad o al detectarse un paro por parte de usuario, se genera un archivo con extensión .xls con la magnitud de las variables de interés, esto con el objetivo de darle al usuario la posibilidad de analizar el comportamiento del maquinado durante su ejecución.

Este código no cuenta con una interfaz gráfica y se ejecuta al inicio cuando es encendida la Raspberry Pi.

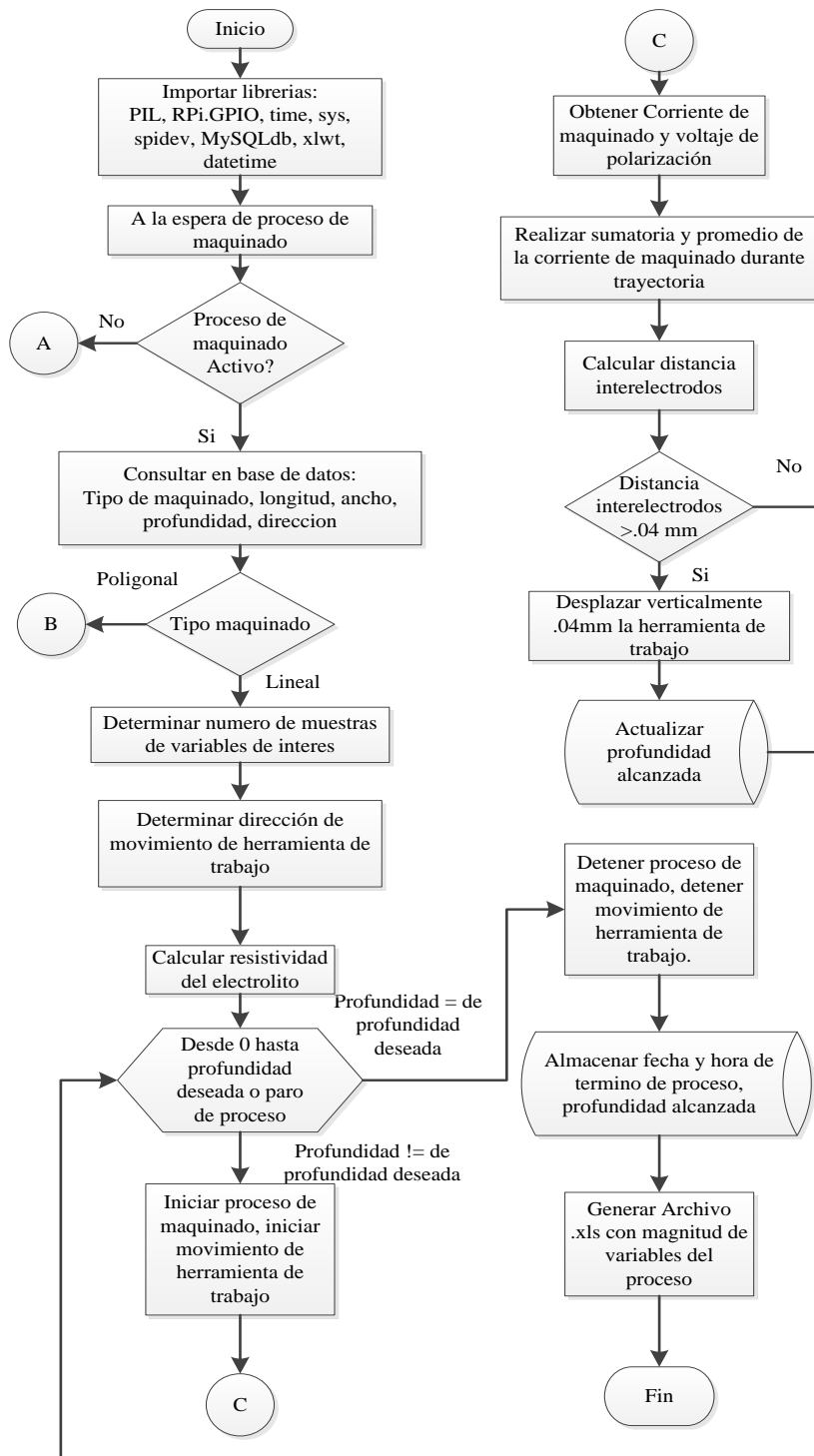


Figura 5.51: Diagrama de flujo del código maquinado (A)

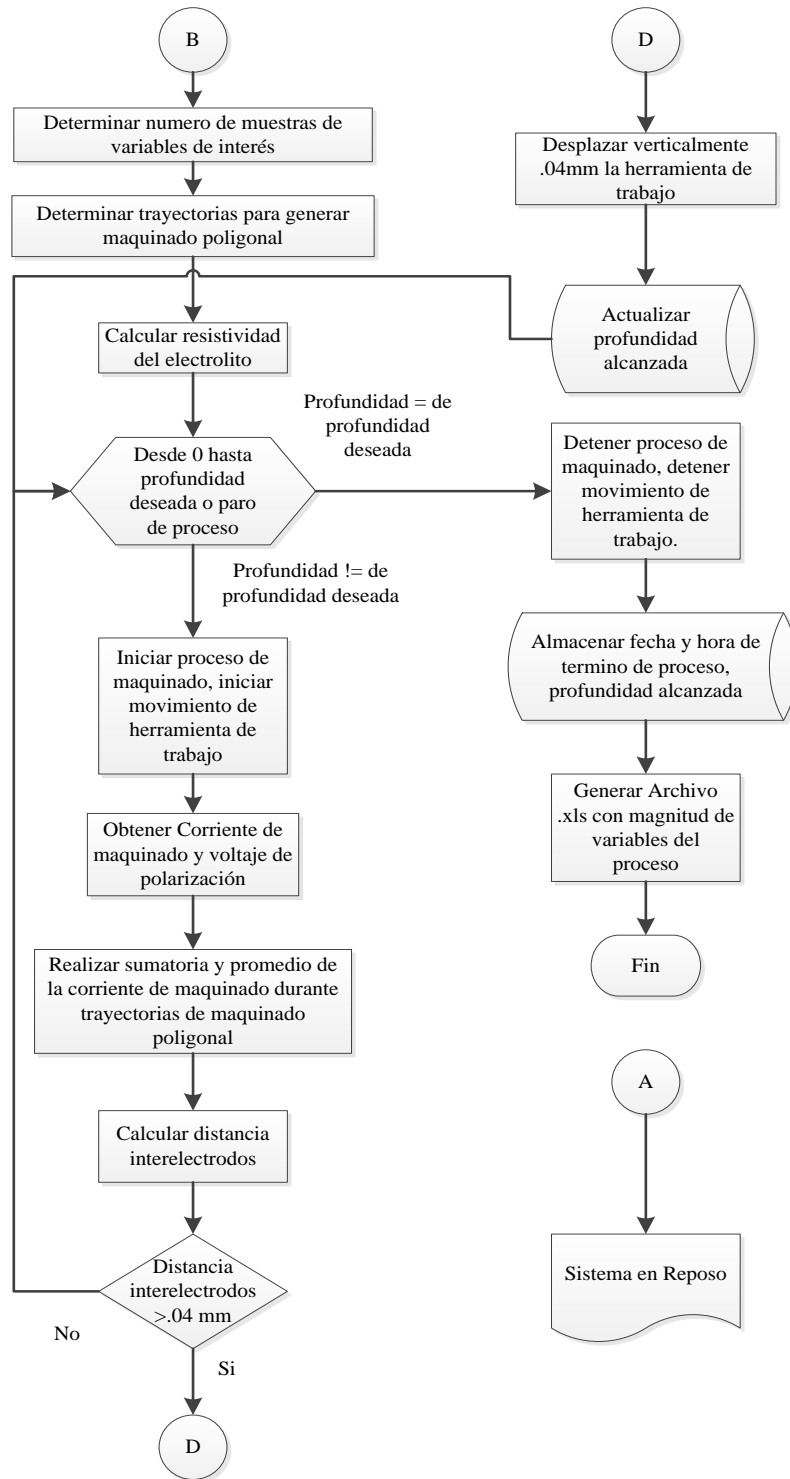


Figura 5.52: Diagrama de flujo del código maquinado (B)

A través del desarrollo de 5 prototipos se logró obtener una versión del sistema computacional que cumple con las características requeridas la primordial es la de una remoción controlada de material en un proceso de maquinado electroquímico, la integración de las diferentes versiones del sistema dieron como resulta un sistema en el cual se puede generar un movimiento manual, una calibración automática, la posibilidad de generar maquinados lineales o poligonales, a su vez el usuario tiene conocimiento de la magnitud de las variables en todo momento y la posibilidad de acezar las secciones del sistema a través de una interfaz gráfica intuitiva, el sistema lleva el control de todos los procesos al grado que el usuario solo debe posicionar la pieza de trabajo en la zona indicada e ingresar los parámetros como los son el tipo de maquinado, la longitud y la profundidad, dejando el control del proceso al sistema. Basar el desarrollo del sistema computacional en el modelo por prototipos que propone la Ingeniera de software, dio la posibilidad de administrar de manera adecuada los recursos, mediante el diseño previo se identificaron las necesidades y requerimientos, mediante el diagrama de caso de usos se identificó los actores físicos y lógicos y las funciones que despeñarían dentro del sistema, los componentes físicos y lo sub componentes de estos pudieron ser identificados mediante el diagrama de bloques, el flujo de información desde el inicio del proceso hasta el fin del mismo pudo ser diseñada y prevista mediante el diagrama de secuencia.

Las diferentes etapas del sistema computacional fueron entregadas bajo los tiempos establecidos esto debido al diseño propuesto, y por lo cual se pudo continuar con la etapa de pruebas y validación del sistema, generando así etapas de mantenimiento para el sistema con la finalidad de mejorar su desempeño.

En la Figura 5.53 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 recirculación del electrolito.
3. La Raspberry Pi y el conjunto de circuitos de mando.
4. La herramienta y pieza de trabajo.

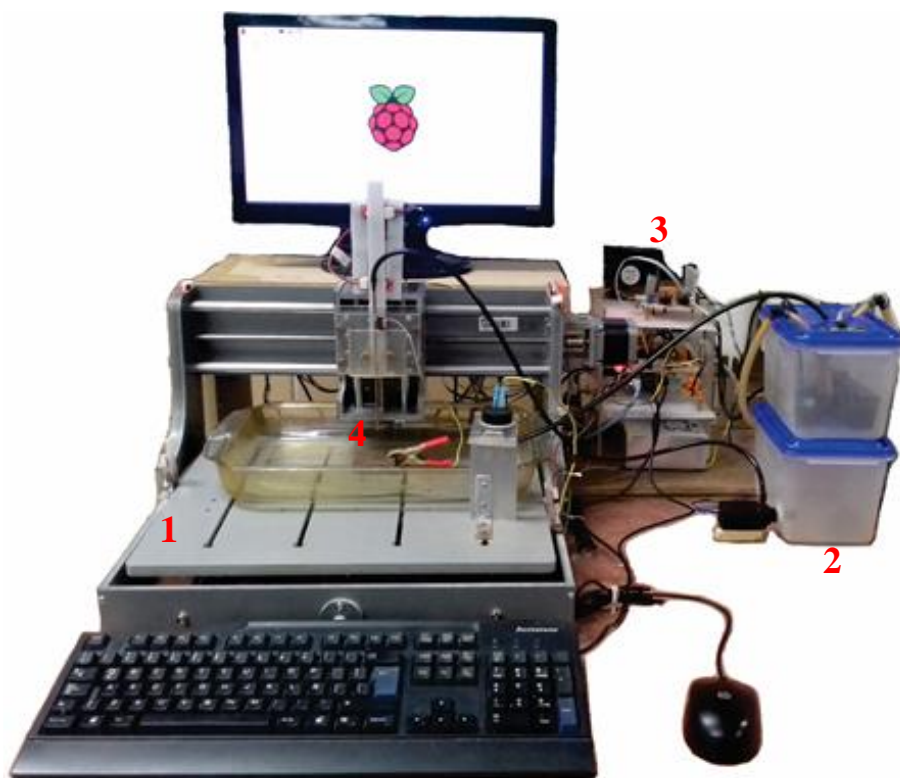


Figura 5.53: Imagen del Sistema computacional Completo.

Es con esta versión del prototipo, con la que se realizaron las pruebas de maquinado para la validación de la hipótesis.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Maquinados.

Para evaluar el funcionamiento del sistema computación se realizaron pruebas de maquinado, donde se usó:

- Acero estructural 10-18 como material de trabajo.
- Solución acuosa de $H_2O + NaCl$ en una concentración del 20%.
- Electrodo hueco de cobre con un diámetro de 2.9 mm.
- Sistema de recirculación para electrolito con filtros para la retención de residuos provenientes del proceso.
- Fuente de Voltaje Matrix MPS-3003D de 1-30 V y de 0-3 A.

El sistema computacional permite la medición de la corriente de maquinado, variable de interés para determinar la remoción de material controlada, la magnitud de esta variable es medida por el sistema computacional cada 10 ms, tiempo que demora el sistema mecánico en desplazarse 120 μm , para desplazamientos lineales y poligonales se realiza una sumatoria de la magnitud de la corriente para posteriormente promediarla y así conocer la variación que está teniendo durante la duración del proceso de maquinado.

Para el almacenamiento de la magnitud de la corriente el sistema computacional genera un archivo con extensión .xls, con la finalidad de tenerlos en un formato de fácil acceso y para ahorrar tiempo de ejecución, dicho archivo se genera de manera automática al término del proceso con los datos de fecha y hora de término del proceso para evitar redundancia o duplicidad de archivos.

Para visualizar la variación que tiene la corriente de maquinado durante un proceso ECM y la capacidad del sistema computacional para la adquisición y almacenamiento de la misma, se realizó una prueba de maquinado empleando los recurso antes descritos, en la Figura 6.1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la

evolución con respecto al tiempo de la magnitud de la corriente de maquinado de una prueba ECM durante un proceso de 2 minutos, donde se puede observar la variación de la corriente con respecto al tiempo de duración del proceso.

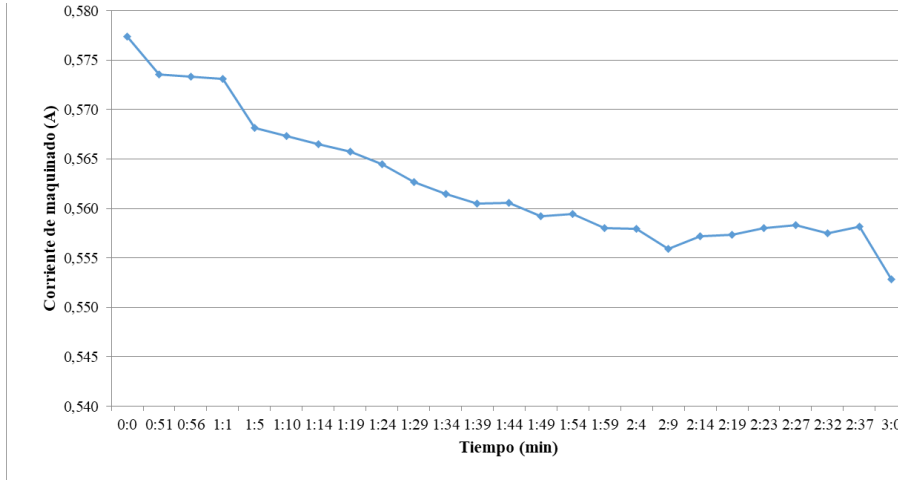


Figura 6.1: Variación de la corriente de maquinado en proceso ECM.

El descenso de la corriente indica que la remoción de material se está realizando de manera adecuada, dado que si la magnitud de la corriente de maquinado aumenta significa que la distancia inter electros es menor al parámetro inicial de $360 \mu m$ en caso contrario si la corriente disminuye significa que la distancia inter electros supero los $360 \mu m$ a causa del espacio que deja el material removido.

Los datos antes mostrados están en términos de corriente, para generar una remoción de material controlada es necesario estimar la distancia inter electrodos que existe en ese momento del proceso y así determinar el desplazamiento vertical de la herramienta de trabajo, para que aunado al desplazamiento horizontal se alcance la distancia lineal y profundidad deseada por el usuario, tomando como referencia esto, se implementó el uso de la ecuación (5.6), contenida en Groover, P.M [1]

Teniendo esta fórmula, se despeja para "g" quedando la ecuación:

$$g = \frac{VA}{Ir} \quad (6.1)$$

Misma que se sustituyó dentro del sistema computacional integrando los siguientes valores:

$$V = 5V$$

$$A = 2.45 \text{ mm}^2$$

I = Corriente de maquinado obtenida por el sistema.

$$r \approx 50 \Omega * \text{mm}$$

El valor de la resistividad de electrolito está contemplado para condiciones ideales, por lo que considerando la proporción del electrolito, así como los agentes adicionales que contiene el agua potable usada y el área aproximada de la herramienta de trabajo, se propone que mediante el propio sistema, y antes de iniciar el proceso de remoción controlada se debía determinar la resistividad del electrolito, con la finalidad de tener datos lo más acercados a la realidad. Con las variables conocidas y despejando la ecuación (5.6) para "r" se obtuvo:

$$r = \frac{VA}{gI} \quad (6.2)$$

Siendo:

g = distancia inter electrodos inicial .360mm.

Una vez despejados los valores y calculada la resistividad del electrolito se obtuvo:

$$r = \frac{5 V * 2.45 \text{ mm}^2}{.36 \text{ mm} * I} \quad (6.3)$$

$$r \approx 58.93 \Omega * \text{mm} \quad (6.4)$$

Siendo:

I = Corriente de maquinado adquirida por el sistema. (0.557 A).

El valor de la resistividad calculada por el sistema al iniciar el proceso de maquinado tiene una valor superior por 8.93 Ω y se justifica por el uso de agua potable misma que contiene agentes adicionales (cloro, sales minerales) que modifican la resistividad. Con el valor

calculado de la resistividad, se implementó el cálculo de la distancia inter electrodos mediante el sistema computacional usando la ecuación (6.1) obteniendo la variación de la distancia inter electrodos misma que se puede visualizar en la Figura 6.2 el aumento de la distancia corresponde a un periodo de 2 minutos de maquinado, con esto se pudo determinar la relación de la corriente de maquinado con respecto a la distancia inter electrodos.

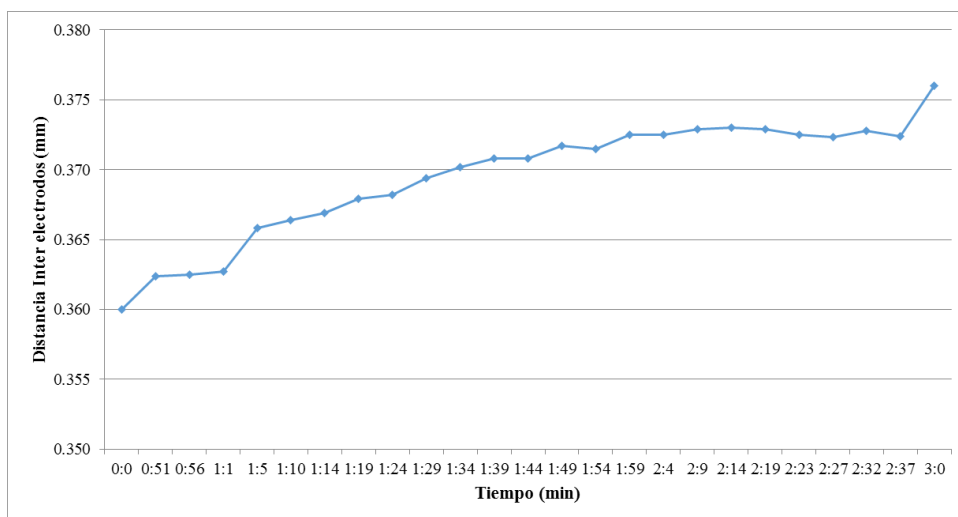


Figura 6.2: Evolución de la distancia inter electrodos en función del tiempo, como una manifestación de la remoción de material (ensanchamiento del gap).

El desplazamiento vertical de la herramienta de trabajo está condicionado a la resolución del sistema mecánico, así que la herramienta solo puede ser desplazada verticalmente hasta que la distancia inter electrodos alcance una diferencia de 40 μm , que es la distancia de desplazamiento lineal que genera un paso del motor a pasos. El constante monitoreo de la corriente de maquinado y con ello el cálculo de la distancia inter electrodos permite que el desplazamiento de la herramienta de trabajo se realice en el momento exacto y así mantener la distancia inter electrodos cercana a los 0.36 mm para generar una remoción de material controlada hasta alcanzar la profundidad indicada 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 (cuadrangulares, en primera instancia) de una longitud y profundidad establecida por el usuario, dichas

pruebas se realizaron con la finalidad de evaluar el funcionamiento del sistema computacional y así comprobar que es capaz de realizar una remoción controlada para generar estos tipos de maquinado. Se realizaron pruebas de maquinado lineal y poligonal, mismas que se describen a continuación:

6.1.1 Prueba de maquinado lineal.

Con el uso del software que integra el sistema computacional se realizó una prueba de maquinado lineal donde los parámetros ingresados por el usuario fueron los siguientes:

- Longitud: 15 mm.
- Profundidad: 1 mm.

Los recursos empleados fueron:

- Acero estructural 10-18.
- Solución acuosa de $H_2O + NaCl$ en una concentración del 20%.
- Electrodo hueco de cobre con un diámetro de 2.9 mm.
- Sistema de recirculación para electrolito con filtros para la retención de residuos provenientes del proceso.
- Voltaje de polarización del electrodo: 5 V.

Una vez ingresados los parámetros al software del sistema computación se inició la prueba, que tuvo una duración de 13 minutos. Una vez que se alcanzó la profundidad deseada el software detiene todos los procesos y genera un archivo con extensión “xls” para el posterior análisis de los resultados. En la Figura 6.3 se muestra un segmento de 4 minutos del tiempo de maquinado donde se puede apreciar el cambio en la magnitud de la corriente de maquinado, lo cual significa que la remoción de material se está llevando a cabo como resultado del aumento de la distancia que existe entre la pieza y la herramienta de trabajo.

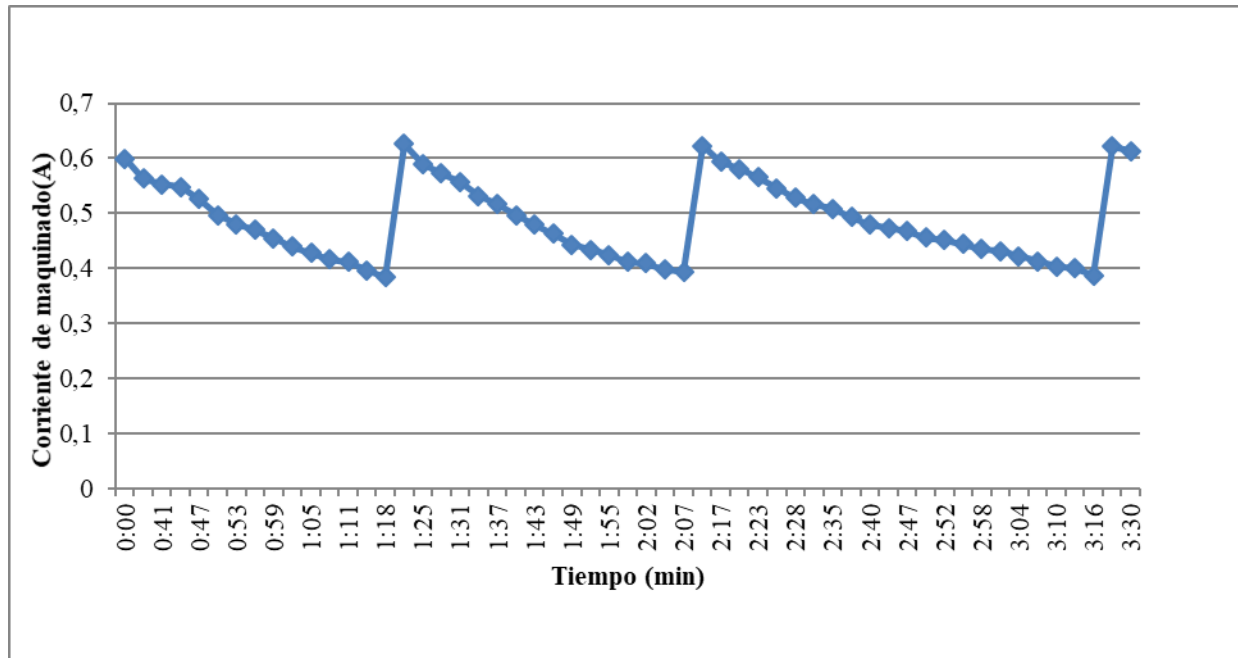


Figura 6.3: Corriente de maquinado en prueba de maquinado lineal, donde se aprecia el comportamiento de la corriente, cada vez que la herramienta de trabajo desciende verticalmente.

En la Figura 6.4 se muestra el valor de la distancia inter electrodos que se ha calculado por medio del software usando la ecuación (6.1) con la magnitud de la corriente de maquinado que ha sido adquirida por el sistema. Se puede visualizar gráficamente la correspondencia que existe entre la corriente de maquinado y la distancia inter electrodos dado que mientras la primera disminuye la segunda aumenta esto como resultado de una remoción de material llevada a cabo por el proceso electroquímico.

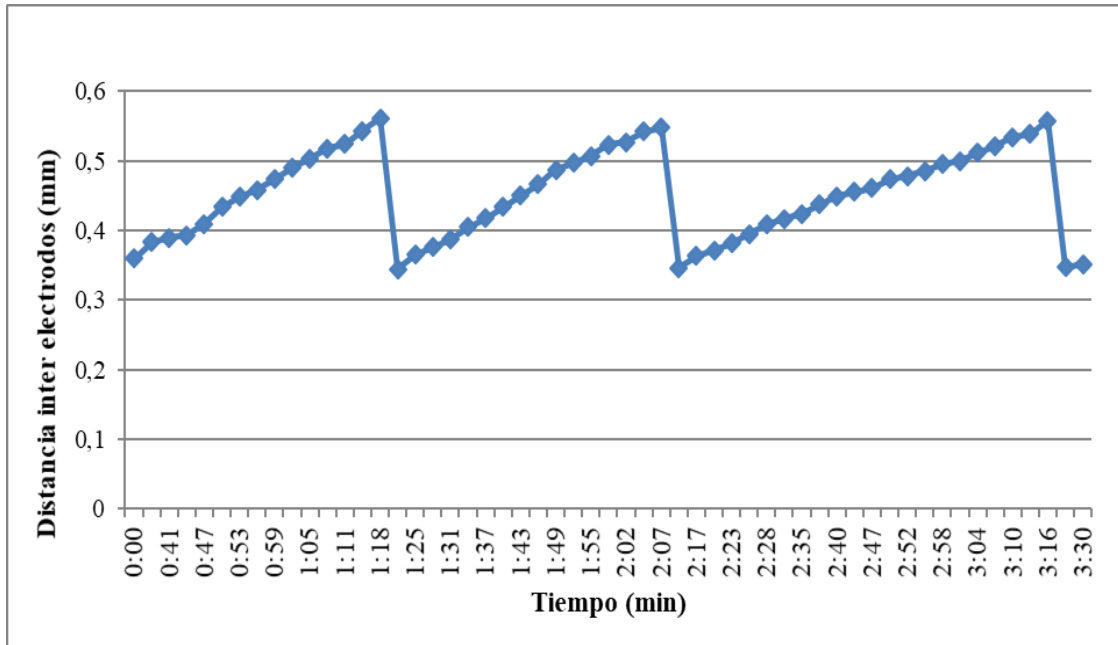


Figura 6.4: Comportamiento de la distancia inter electrodos en proceso de maquinado lineal.

El voltaje de polarización se mantiene constante esto debido a que durante el proceso de maquinado electroquímico este no sufre ninguna alteración lo cual puede ser corroborado en la Figura 6.5.

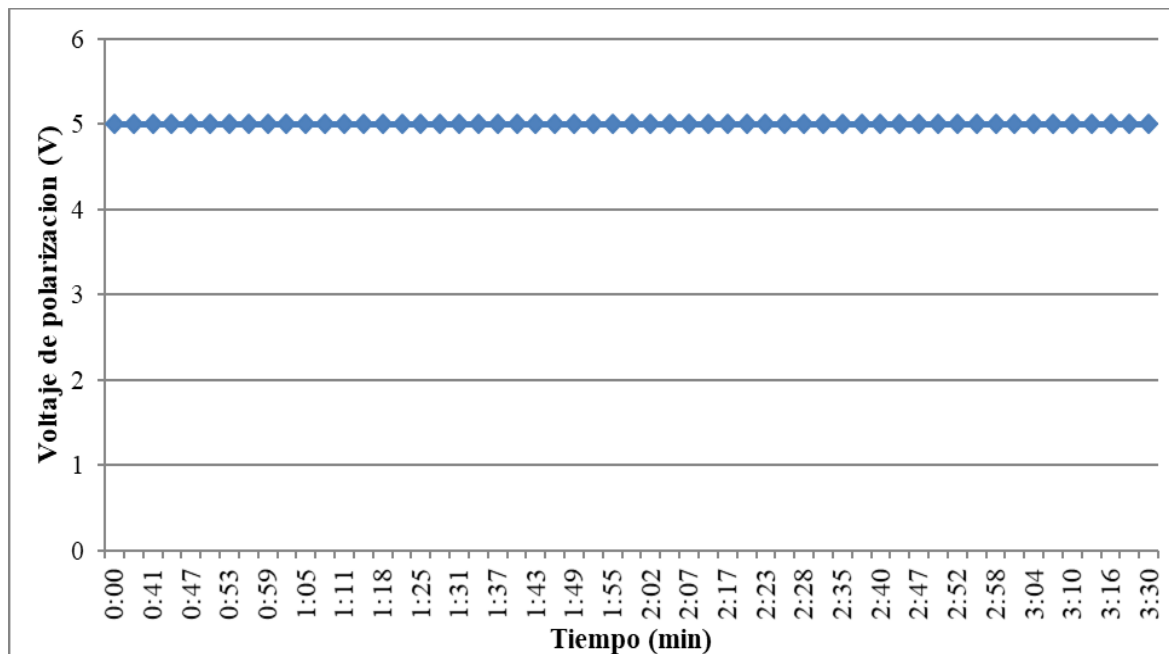


Figura 6.5: Voltaje de polarización en prueba de maquinado lineal.

Al término de la prueba, y después de los proceso de limpieza, se realizó la medición de la profundidad alcanzada; dicha medición se hizo con un calibrador Vernier digital INSIZE 1112, dando como resultado una profundidad lateral derecha de 0.93 mm, lateral izquierda de .093 y de 0.91 mm en la zona centro En la Figura 6.6, se muestra una fotografía del resultado obtenido de la prueba de maquinado lineal, el ensanchamiento lateral a ambos lados es resultado de la exposición que tienen estas áreas con la herramienta de trabajo, es por ello que las mediciones válidas para la prueba corresponden al área central del maquinado.



Figura 6.6: Resultado de prueba de maquinado lineal.

6.1.2 Prueba de maquinado poligonal.

Como parte de los alcances propuestos para el proyecto se integró la función de realizar maquinados de formas cuadrangulares, donde el usuario solo debe ingresar, un nombre para el proyecto que sirva de identificador para diferenciar ese maquinado de otros realizados, el largo, ancho y profundidad que se desea obtener. Se realizó una prueba la cual consistió en el maquinado de forma cuadrangular con los siguientes parámetros:

- Largo: 10 mm.
- Ancho: 10 mm.
- Profundidad: 1.5 mm.

Los recursos empleados fueron:

- Acero estructural 10-18.
- Solución acuosa de $H_2O + NaCl$ en una concentración del 20%.
- Electrodo hueco de cobre con un diámetro de 2.9 mm.
- Sistema de recirculación para electrolito con filtros para la retención de residuos provenientes del proceso.

- Voltaje de 5 V.

Dentro del menú del software se encuentra la opción de maquinado poligonal, es en esta opción donde el usuario ingreso los parámetros para el maquinado, para posteriormente iniciar el proceso, el cual tuvo una duración de 1 hora con 28 minutos. En esta prueba se tuvieron que realizar algunas modificaciones a los parámetros iniciales, al tratarse de un maquinado poligonal la herramienta de trabajo se desplaza sobre los tres ejes, en específico para realizar la trayectoria para el maquinado hace uso de 2 ejes y es requisito principal que la pieza de trabajo se encuentre totalmente en una posición vertical, de lo contrario se podría generar que la pieza y la herramienta de trabajo colisionaran en un segmento de la trayectoria, lo que llevaría al proceso a detenerse de manera inmediata esto debido al posible corto circuito, por esta razón se decidió establecer la distancia inter electrodos inicial en $480\ \mu\text{m}$, con el objetivo de dar una tolerancia mayor en caso de presentar una irregularidad o elevación en la pieza de trabajo.

Durante el proceso se detuvo la ejecución del mismo, debido a que el recubrimiento aislante de la herramienta de trabajo se desprendió, esto a causa de la presión ejercida por el electrolito y la variación en la temperatura causa del proceso electroquímico, el sistema detuvo todos los procesos a una profundidad de 1.2 mm, misma que indicaba el sistema en la interfaz gráfica.

Una vez detenida la prueba se procedió a realizar la evaluación de los resultados, en la Figura 6.7 se muestra la variación de la corriente de maquinado en un segmento de 28 minutos del proceso, el eje vertical muestra la magnitud de la corriente (A), mientras que el eje horizontal el tiempo. Se puede visualizar como la corriente de maquinado disminuye gradualmente esto a causa de que la remoción de material se está llevando a cabo y la distancia inter electrodos está aumentando, el aumento abrupto de la magnitud de la corriente es a causa que la herramienta de trabajo ha sido desplazada verticalmente 0.04 mm o $40\ \mu\text{m}$.

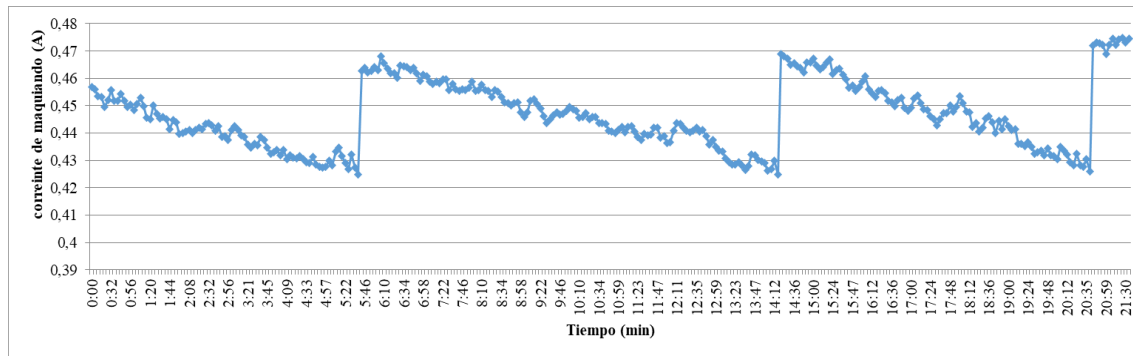


Figura 6.7: Corriente de maquinado en prueba de maquinado poligonal, donde se aprecia el comportamiento de la corriente, cada vez que la herramienta de trabajo desciende verticalmente.

En la Figura 6.8 se muestra la distancia inter electrodos correspondiente a la magnitud de la corriente de maquinado, se puede apreciar la evolución que esta tiene con respecto a la disminución de la corriente de maquinado y dadas las limitaciones del sistema mecánico se debe alcanzar una diferencia mínima de $40 \mu m$ para poder desplazar verticalmente la herramienta de trabajo, esta acción puede visualizarse en la figura al presentarse, como la disminución de la distancia inter electrodos acercándose al valor original de los $.48 \text{ mm}$ o $480 \mu m$ y posteriormente volviendo a elevarse su magnitud.

El valor de la resistividad según la literatura para una concentración del 20 % de solución de $H_2O + NaCl$ es de $50 \Omega * mm$, para esta prueba el valor calculado por el sistema teniendo en cuenta las condiciones iniciales del proceso fue de $56 \Omega * mm$, la diferencia entre los parámetros establecidos por la literatura y los obtenidos por el sistema pueden ser causada por la composición del agua potable usada así como pequeñas variaciones en la concentración del electrolito.

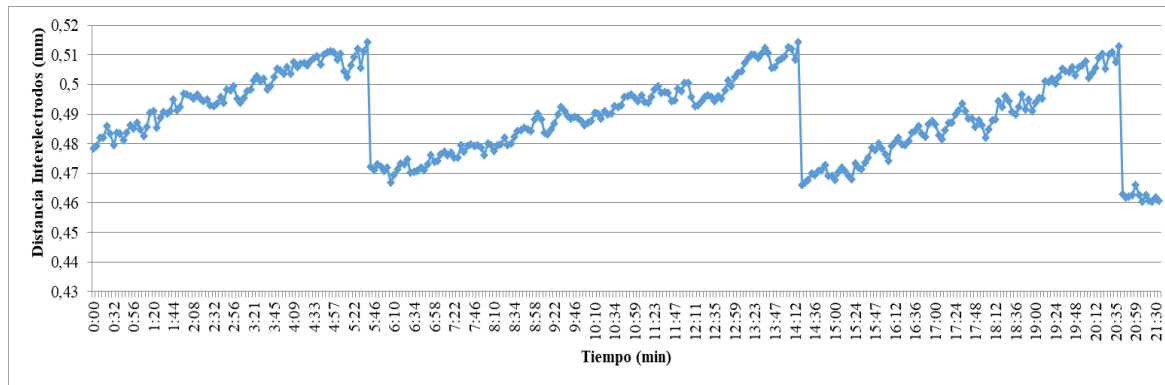


Figura 6.8: Comportamiento de la distancia inter electrodos en proceso de maquinado poligonal.

El voltaje de polarización durante la realización de la prueba se mantuvo constante a una magnitud de 5 V.

Al finalizar la prueba de maquinado se realizó la medición de la profundidad alcanzada mediante el uso de un vernier, donde se obtuvo como resultado una profundidad en promedio de $\approx 1.23 \text{ mm}$. A pesar de no alcanzar la profundidad deseada por fallas operativas y ajenas al sistema computacional, la distancia alcanzada tiene una variación de .03 milímetros con respecto a la indicada por el sistema.

En la Figura 6.9 se puede apreciar una imagen de los resultados obtenidos de la prueba de maquinado poligonal, donde se visualiza el acabado de la pieza y su uniformidad con respecto a los lados de la pieza. En este tipo de maquinados no se presentan deformaciones sobre ningún lado.

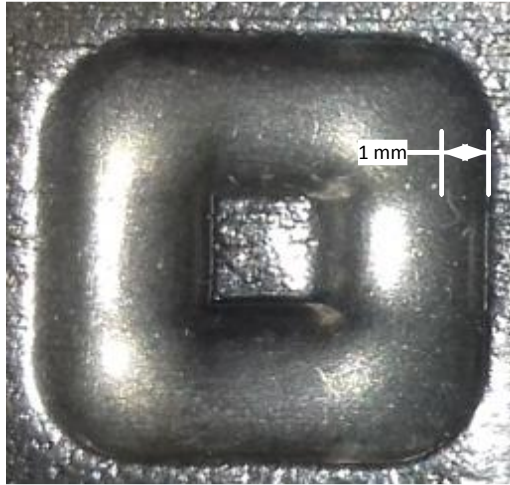


Figura 6.9: Resultado de Maquinado Poligonal.

6.1.3 Costo computacional

Estando en ejecución y funcionamiento operativo el sistema computacional, se verifico la cantidad de memoria y de CPU que este consume, desde una terminal del sistema operativo Raspbian se ingresó la siguiente instrucción:

```
#>top
```

Una vez ingresada esta instrucción se conoció la cantidad de memoria y CPU que consume el sistema computacional los cuales fueron:

- Memoria: 1.9%
- CPU: 19%

Teniendo en cuenta la Tabla 4.1, la cantidad de memoria usada es de 9.7 Mb y la de CPU es de 133 MHz. Confirmando así que el software puede ser ejecutado haciendo uso de una cantidad de recursos computacionales reducida.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un circuito el cual permite establecer de manera automática la distancia inter electrodos inicial para un proceso de maquinado electroquímico, librando al usuario de realizar este proceso de manera manual, ahorrando tiempo en las adecuaciones iniciales para realizar un proceso de maquinado electroquímico, brindándole la posibilidad que desde una interfaz gráfica pueda establecer dicha distancia.

Se desarrolló un sistema computacional que permite realizar la remoción controlada dentro de un proceso de maquinado electroquímico mediante la adquisición de la corriente de maquinado y el voltaje de polarización, estimando la distancia inter electrodos existente entre la pieza y la herramienta de trabajo, y con el uso de un sistema mecánico de ejes coordenados desplazar la herramienta de trabajo cada vez que se detecte un aumento de la distancia entre la pieza y la herramienta de trabajo, este desplazamiento debe de estar dentro de su resolución permisible del sistema mecánico que es de .04 mm, de esta manera mantener la distancia inter electrodos lo más cercana posible al su valor inicial lo cual como resultado genera un aumento en la profundidad alcanzada.

El sistema desarrollado permite el movimiento manual del sistema mecánico para poder posicionar la herramienta de trabajo en la posición que el usuario desee, además permite la calibración automática del sistema mecánico, esto por si se desea reubicar la herramienta de trabajo a una posición predeterminada, así mismo se adecuaron interruptores de final de carrera, con el objetivo de evitar daños físicos a causa de fallas lógicas o de operatividad.

Brinda la posibilidad de generar maquinados lineales o de forma cuadrangular donde el usuario debe de ingresar los parámetros básicos dejando el control del proceso al sistema, una vez que se ha concluido el proceso el sistema genera un archivo con extensión .xls donde se almacenan la magnitud de las variables de interés así como de la distancia inter electrodos al igual que datos de interés como el nombre del proyecto, duración, longitud y profundidad deseada así como la profundidad alcanzada.

El desarrollo del software bajo el lenguaje Python desde sus secciones operativas hasta las gráficas vuelve al software portable y brinda la posibilidad de duplicar el sistema solo

haciendo necesaria la instalación de paquetes y configuraciones básicas que cualquier usuario con conocimientos básicos de informática puede realizar.

La interfaz gráfica implementada haciendo uso de la librería TKINTER de Python hace que la ejecución de la misma consuma menos recursos computacionales, haciendo una interfaz ágil y ligera en ejecución, al implementar codificación gráfica y de ejecución en un solo programa se evitó la necesidad de crear aplicaciones compatibles con el software a nivel código, apariencia amigable con el usuario y estructura intuitiva da la posibilidad de ser operado por cualquier usuario con conocimientos básicos de informática.

El haber desarrollado el software bajo los parámetros y métricas establecidas por la ingeniería de software y usando el modelo por prototipos, permitió agilizar el proceso de fabricación del prototipo desde el nivel físico al lógico, economizando recursos tanto materiales como de computo, así mismo agilizó las fechas de entrega y permitió generar diversas versiones del prototipo, donde algunas de estas versiones fueron mejoradas e integradas a la versión final del sistema computacional.

La culminación del proyecto se basa en gran parte al uso de software libre, el cual permitió la manipulación del software sin tener restricción alguna, lo que a su vez permitió hacer importantes aportes a la comunidad que desarrolla software libre, entre las cuales destacan:

- Modificación a repositorio PIL que se enlaza a TKINTER mediante su módulo image lo cual permite usar recursos gráficos como lo son imágenes en formato .jpg, jpeg, .png, y lo hace compatible con el Ide Python en su versión 2.7 sin la necesidad de vectorizar o reducir calidad en la imagen.
- Se generó un parche de software lo cual hace compatible cualquier aplicación que haga uso de los paquetes y repositorios de TKINTER PIL IMAGE y que se hayan programado bajo Python 2.7 o superior, con cualquier versión del sistema operativo Raspbian y cualquier versión de la Raspberry Pi.

El haber desarrollado el sistema haciendo uso de una computadora de tamaño compacto como lo es la Raspberry Pi, convierte a este sistema en un sistema embebido y de fácil traslado al ser un sistema compacto su portabilidad no está limitada.

Se logró el objetivo principal al desarrollar un sistema computacional que mediante el monitoreo constante de la corriente de maquinado y voltaje de polarización de un proceso

de maquinado electroquímico , puede obtener una remoción de material controlada, esto estimando la distancia inter electrodos y manteniéndola dentro de un intervalo establecido con ayuda de un sistema mecánico de tres ejes que desplaza verticalmente la herramienta de trabajo hasta alcanzar la profundidad deseada por el usuario, además de brindar la posibilidad de generar maquinados lineales y poligonales, lo cual abre una ventana de oportunidades al estar incursionando en el micro maquinado de piezas con forma irregular, mismas que no pueden ser desarrolladas mediante métodos de manufactura tradicional.

REFERENCIAS

- [1] P. Groover, "Fundamentos de Manufactura Moderna", 4° ed., Mexico: McGrawHill, 2010.
- [2] D. Mi y W. Natsu, «"Proposal OF ECM method for holes with complex internal features by controlling conductive area ratio along tool electrode",» *Precision Engineering*, vol. 42, p. 179–186, 2015.
- [3] O. Chaides y H. Ahuett, «"Diseño y Prueba de un Sistema de Control de Espaciamiento y Potencia para Micro-EDM",» *Ingeniería Mecánica Tecnológica y Desarrollo*, vol. 3, p. México, 2011.
- [4] S. Kalpakjian y S. Steven , "Manufacturing Engineering & Technology", 7 ed., Singapur: Pearson.
- [5] K. Altena y A. Harmen, "Precision ECM by Process Characteristic Modelling", Edinburgh: University of Edinburgh, 2010.
- [6] M. Villagomez y M. A. Espinoza, «"Diseño de una Plataforma para Micromaquinado por Electroerosión (EDM) y/o Electroquímico (ECM)",» *Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo*, 2011.
- [7] R. A. Española, «"Diccionario de la lengua española",» 2014. [En línea]. Available: www.rae.es. [Último acceso: 20 julio 2016].
- [8] S. Kalpakjian y S. Schmid, *Manufactura, Ingeniería Y Tecnología.*, 5° ed., Pearson, 2008.
- [9] Z. Katz y C. Tibbles, «"Analysis of micro-scale ECM Process",» *Journal of Advance Manufacturing Technology*, vol. 35, pp. 923-928, 2010.

- [10] A. Hassan y E.-H. Gawad , *Advanced Machining Processes*, Alexandria: McGraw-Hill, 2005.
- [11] D. Clifton, A. Mount y G. Alder, «Ultrasonic measurement of the inter-electrode gap in electrochemical machining,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, pp. 1259-1267, 2002.
- [12] L. Yong, Z. Yunfei y Y. Guang, «Localized electrochemical micromachining with gap control,» *El Sevier*, vol. 108, pp. 144-148, 2003.
- [13] A. Martos , "Introduccion A La Informatica", Barcelona: Anaya Multimedia, 2012, p. 128.
- [14] M. Schmidt, "Raspberry Pi ", Alemania: Dpunkt Verlag , 2014.
- [15] Farnell, «"Raspberry Pi B+",» Farnell Org, 2012.
- [16] A. Mcewen y H. Cassimally, "Internet De Las Cosas. La Tecnologia Revolucionaria Que Todo Lo Conecta", España: Anaya Multimedia, 2014, p. 336.
- [17] C. Franklin, "Circuitos integrados y sistemas", 4 ed., EUA: Reverte, 2012.
- [18] I. Gilfillan, "La Biblia de MySQL", 10 ed., Madrid: Anaya Multimedia, 2011.
- [19] R. Org, «Raspbian,» [En línea]. Available: <https://www.raspbian.org/>. [Último acceso: 16 08 2016].
- [20] O. Raspbian, «Raspbian,» Raspbian Org, [En línea]. Available: <https://www.raspbian.org/download>. [Último acceso: 2016 10 12].
- [21] O. LXDE , «LXDE Org,» [En línea]. Available: <http://lxde.org/es>. [Último acceso: 2016 07 10].
- [22] S. Chazallet, "Python 3: Los Fundamentos Del Lenguaje", España: ENI, 2015, p. 860.

- [23] R. S. Pressman, *Ingeniería del Software un Enfoque Práctico*, 7 ed., Connecticut: Mc Graw Hill, 2012.
- [24] S. Roger, *Ingeniería del software. Un enfoque práctico*, 7 ed., M. d. Connecticut, Ed., cGraw-Hil, 2011.
- [25] M. Bocco y J. A. Cruz, "*Métodos De Investigación En Ingeniería Del Software*", Ra-Ma Editorial, 2014, p. 314.
- [26] G. Booch, J. Rumbaugh y I. Jacobson, *Lenguaje Unificado de Modelado*, 2 ed., Prentice Hall, 2007.
- [27] S. Thomson, *L298 Controlador de doble Puente H*, Microelectronics .
- [28] S. Thomson, *L297 Controlador de Motores Paso a Paso.*, Microelectronics.
- [29] T. Python , «<https://wiki.python.org/moin/TkInter>,» [En línea]. Available: <https://wiki.python.org/moin/TkInter>. [Último acceso: 16 12 2016].
- [30] N. Pons, "*Linux*", Madrid: ENI, 2014, p. 534.
- [31] A. V., "*Fundamentos Generales De Programacion*", McGraw Hill, 2014, p. 384.
- [32] J. Seoane y M. Cortés, "*Prácticas de Arquitectura de Ordenadores*", 2 ed., Reino Unido, 2011.
- [33] E. Upton y G. Halfacree, "*Raspberry Pi*", 1° ed., España: Anaya Multimedia, 2013.
- [34] Z. Shaw, "*Aprenda a programar con Python*", 2014 ed., Anaya Multimedia, 2014, p. 296.
- [35] I. Sommerville, "*Ingeniería del Software*", 9 ed., Mexico: Pearson, 2011.