



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

---

---

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO DE UN CENTRO DE MICROMAQUINADO POR  
ELECTROEROSIÓN ASISTIDO POR COMPUTADORA”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

PRESENTA

**LUIS SALVADOR LÓPEZ FLORES.**

ASESOR

M.C. MIGUEL VILLAGÓMEZ GALINDO

COASESOR

DR. MARCO ANTONIO ESPINOSA MEDINA

MORELIA, MICH. AGOSTO 2012

---

---



**“DISEÑO DE UN CENTRO DE  
MICROMAQUINADO POR  
ELECTROEROSIÓN ASISTIDO POR  
COMPUTADORA”.**



UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE  
SAN NICOLAS DE HIDALGO

45 – años Impulsando el Desarrollo de la Ingeniería Mecánica.

División de Estudios del Posgrado  
Fac. Ing. Mec. 1965-2010  
Nº Of. 895/07/11

**DR. CRISANTO MENDOZA COVARRUBIAS  
PRESIDENTE DEL CONSEJO INTERNO DE LA DIVISIÓN  
DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD  
DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UMSNH.**

**PRESENTE**

Por medio de la presente el **Comité Tutorial** del alumno LUIS SALVADOR LÓPEZ FLORES hace saber que en función de los siguientes puntos:

- a) Concordancia entre el tema, los objetivos y la hipótesis, o preguntas directrices.
- b) Objetivos claros, congruentes y con posibilidades de brindar aportes científicos.
- c) Revisión adecuada de los antecedentes
- d) Justificación coherente con los objetivos y la posibilidad de éxito de la investigación.
- e) La hipótesis o preguntas directrices son claras y precisas.
- f) Existe coherencia entre el problema, objetivos, diseño experimental, y las metas o productos a generar sobre el protocolo de investigación.
- g) El cronograma de actividades es adecuado con el diseño propuesto y los tiempos solicitados
- h) Se observa alta factibilidad y probabilidad de resultados exitosos.
- i) Hace referencia sobre la factibilidad de publicar sus resultados de investigación en una revista indexada.

Se reviso el protocolo de Investigación titulado "Diseño de un centro de micromáquinado por electroerosión asistido por computadora" marcándose algunas observaciones, las cuales posteriormente fueron cumplidas por el alumno, por lo tanto el **Comité Tutorial** hace constar que el tema de investigación propuesto cumple con todos requisitos para ser **aprobado**.


Morelia, Mich., a 4 de julio de 2011

ATENTAMENTE

COMITÉ TUTORIAL

  
MIGUEL VILLAGÓMEZ GALINDO



  
DR. MARCO ANTONIO ESPINOSA MEDINA

  
DRA. LAURA A. IBARRA BRACAMONTES

  
DRA. GEORGINA CARBAJAL DE LA TORRE

  
DR. JUAN FELIPE SORIANO PEÑA.

DIVISION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO  
FAC. DE ING. MECANICA

C.c.p. a su expediente

## AGRADECIMIENTOS.

*Una de las aspiraciones personales que tenía en este proyecto de vida que me he fijado era el de estudiar un posgrado en Ingeniería Mecánica y la UMSNH me ofreció la oportunidad de cumplir este anhelo, durante estos escasos dos años de lucha constante, de gratas vivencias, de grandes aprendizajes no solo en el área educativa sino también en la vida cotidiana, finalmente cumpla un objetivo más, este logro se lo dedico:*

*A mis padres, pilares fundamentales en mi vida, dignos de ejemplo de trabajo y constancia, quienes me han brindado todo el apoyo necesario para alcanzar mis metas y sueños, y han estado allí cada día de mi vida, lo que me compromete a seguir superándome día a día, correspondiendo de esta manera al gran esfuerzo que realizaron.*

*A mis hermanas Fani y Gabi que les deseo alcancen las metas que se propongan siempre anteponiendo los valores que nuestros padres nos enseñaron.*

*A todas aquellas personas que me apoyaron durante mis estudios haciendo una mención especial a mi asesor de tesis el M. C. Miguel Villagomez Galindo y a mi coasesor Dr. Marco Antonio Espinoza Medina por la enseñanzas ofrecidas en esta área de la ingeniería, la mecatrónica que tanto en el presente como en el futuro representará el desarrollo tecnológico y económico de un país.*

## RESUMEN.

Este proyecto presenta el diseño de un centro de micromaquinado, usando el proceso de maquinado por electroerosión conocido por sus siglas como EDM. El proceso EDM es un proceso de maquinado no convencional del que se obtienen piezas de trabajo de materiales que son muy difíciles de manufacturar en los procesos de maquinado convencionales tales como el fresado o el torneado donde el único requerimiento para el maquinado de una determinada geometría es que la pieza de trabajo tiene que ser eléctricamente conductor.

Este centro de micromaquinado se configuró a través de 5 elementos: el sistema de posicionamiento, porta-electrodo, el generador de pulsos, el sistema de circulación del fluido dieléctrico y la interfaz para CAM.

Para la configuración de este centro de micromaquinado  $\mu$ EDM, se estableció una plataforma base para el control de la posición del electrodo, la cual consistió de 2 elementos: El sistema de posicionamiento y el porta-eléctrodo. Esta plataforma base junto con el generador de pulsos se vinculó a la interfaz para CAM para de esta forma obtener el control del proceso EDM.

Usando un material intermetálico de base Fe-Al, este proyecto obtuvo el maquinado EDM mediante el proceso de micro-hole para un material con características físicas tales como, alta dureza, baja ductilidad y eléctricamente conductor, y con esto se estableció una primera etapa en el conocimiento a nivel microestructural de cómo se comportan este tipo de materiales bajo el proceso EDM usando técnicas como la difracción de rayos-X y la microscopia electrónica de barrido.

**Palabras clave:** Microelectroerosión, material intermetálico, diseño, mecatrónica, manufactura asistida por computadora.

## **ABSTRACT.**

This paper presents the design of a micromachining center, using the process of Electrical Discharge Machining (sinker EDM). The EDM process is an alternative machining process in the manufacture industry, with this process it can get workpieces of materials that are so difficult to manufacture in milling, lathing or any other conventional process, the unique requirement for this process is that the workpiece has to be electrically conductive.

The micromachining center was configured through five elements: position system, one port-electrode, pulse generator, dielectric flow system and an interface to CAM.

Within the design of this micromachining center to  $\mu$ EDM process; it was established a base platform to control the electrode's position, which consists of two elements: position system and one port-electrode. This base platform with the pulse generator through the linking of a CAM interface it could get the control of the process of EDM.

Using an intermetallic material base Fe-Al, this project get a micro-hole EDM manufacture of one material with physical characteristics such, high hardness, low ductility and electrically conductor, and with this it established a first stage in the knowledge in a microstructural level about the behavior of materials under EDM process using techniques like X-ray diffraction and scanning electron microscopy.

**Keywords:** Micro-electrical discharge machining, intermetallic material, design, mecatronics, Computer Aid Manufacturing (CAM).

# ÍNDICE.

RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABLAS.....	XIV
GLOSARIO.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
JUSTIFICACIÓN.....	XVIII
OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN.....	XX
HIPOTÉISIS.....	XXI
<b>CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.....</b>	<b>2</b>
1.1. DESARROLLO HISTÓRICO DEL PROCESO DE ELECTROMAQUINADO.....	2
1.2. EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN.....	6
1.3. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MECANIZADO ELECTROEROSIVO.....	7
1.4. PROCESO DE LA DESCARGA.....	8
<b>CAPÍTULO II. PLATAFORMA BASE DEL CENTRO DE MICROMAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN (μEDM).....</b>	<b>12</b>
2.1. EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DEL CENTRO DE μEDM.....	12
2.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO.....	13
2.1.2. CONFIGURACIÓN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO EN TRES EJES. .	14
2.1.3. ANALISIS ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO.....	18
2.2. CONTROL DEL CENTRO DE MICROMAQUINADO MEDIANTE EL DESARROLLO ELECTRONICO ARDUINO.....	21
2.2.1. CONTROL DEL MOTOR PASO A PASO BIPOLAR CON LA TARJETA ELECTRÓNICA EASYDRIVER V4.4.....	21

2.2.2.	CONEXIÓN DEL DESARROLLO ELECTRONICO ARDUINO MEGA 2560 A LA TARJETA ELECTRÓNICA EASYDRIVER. ....	24
2.3.	PROGRAMACIÓN EN EL SOFTWARE ARDUINO 0022.....	26
2.4.	EL PORTA-ELECTRODO.....	30
2.4.1.	CONFIGURACIÓN DEL PORTA-ELECTRODO.....	30
2.5.	CONFIGURACIÓN FINAL DE LA PLATAFORMA BASE DEL CENTRO DE MICROMAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN ( $\mu$ EDM).....	31
<b>CAPÍTULO III. DISPOSITIVOS NECESARIOS PARA EL PROCESO DE MICROELECTROEROSIÓN (<math>\mu</math>EDM).</b> .....		<b>33</b>
3.1.	GENERADOR DE PULSOS. ....	33
3.1.1.	COMPONENTES DEL GENERADOR DE PULSOS.....	34
3.1.2.	CONFIGURACIÓN FINAL DEL GENERADOR DE PULSOS. ....	39
3.2.	SISTEMA DE CIRCULACIÓN DEL MEDIO DIELECTRICO. ....	40
3.2.1.	EL FLUIDO DIELECTRICO .....	40
3.2.2.	CONFIGURACION SISTEMA DE CIRCULACIÓN DEL FLUIDO DIELECTRICO.....	41
3.3.	ELÉCTRODO PARA EL MECANIZADO.....	45
3.3.1.	CARACTERÍSTICAS DEL ELÉCTRODO. ....	45
3.3.2.	ELECTRODOS UTILIZADOS EN EL CENTRO DE $\mu$ EDM. ....	46
<b>CAPÍTULO IV. PROGRAMACIÓN DEL CENTRO DE MICROMAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN (<math>\mu</math>EDM).</b> .....		<b>48</b>
4.1.	IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ CAM ENTRE EL CENTRO DE MICROMAQUINADO EDM Y LA COMPUTADORA. ....	48
<b>CAPÍTULO V. CONFIGURACIÓN DEL CENTRO DE CENTRO DE MICROMAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN (<math>\mu</math>EDM).</b> .....		<b>52</b>
5.1.	ENSAMBLE PARA CONFIGURAR EL CENTRO DE MICROMAQUINADO PARA EDM.....	52
5.2.	MAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN MEDIANTE EL PROCESO DE MICRO-HOLE EN EL CENTRO DE MICROMAQUINADO $\mu$ EDM. ....	55

5.3. PRECISIÓN DEL CENTRO DE $\mu$ EDM. ....	56
<b>CAPÍTULO VI. MATERIAL UTILIZADO EN EL CENTRO DE CENTRO DE MICROMAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN (<math>\mu</math>EDM).</b> .....	<b>59</b>
6.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL A MAQUINAR.....	59
6.2. FUNDICIÓN DEL MATERIAL INTERMETÁLICO Fe-Al. ....	59
6.3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL INTERMETÁLICO DE BASE Fe-Al.....	61
6.4. ESTUDIO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS-X.....	62
6.4.1. ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS-X DEL MATERIAL INTERMETÁLICO DE BASE Fe-Al. ....	63
6.5. ANÁLISIS METALOGRÁFICO POR MEDIO DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO. ....	64
6.5.1. MÉTODO DE PREPARACIÓN DE LA PROBETA. ....	64
6.5.2. ATAQUE QUÍMICO DE LA PROBETA. ....	66
6.5.3. ANÁLISIS METALOGRÁFICO DEL MATERIAL INTERMETÁLICO DE BASE Fe-Al.....	67
6.6. ANALISIS MEDIANTE EL MICROSCOPIO ÓPTICO DE LAS PROBETAS MAQUINADAS EN EL CENTRO DE $\mu$ EDM. ....	68
<b>CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b> .....	<b>71</b>
7.1. CONCLUSIONES.....	71
7.2. APORTACIONES AL CONOCIMIENTO.....	72
7.3. RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTURO.....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	75
<b>APÉNDICES</b> ....	<b>77</b>
APÉNDICE I. PLATAFORMA ABIERTA ARDUINO MEGA 2560. ....	78
APÉNDICE II. MOTOR A PASOS BIPOLAR.....	79
APÉNDICE III. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL FLUIDO DIELECTRICO UTILIZADO EN TRANSFORMADORES. ....	80
APÉNDICE IV. PUBLICACIONES.....	82

## LISTA DE FIGURAS.

Figura 1.	(a) Placa grabada enviada por Alejandro Volta a José Priestley, donde demuestra la chispa producida por cortocircuito de un tarro de Leiden (1775).....	3
Figura 1.	(b) Bosquejos de los cráteres de la erosión en superficie del cátodo, observados por Joseph Priestley en 1766.....	3
Figura 2.	(a) Demostración pública de la descarga de arco de carbón, probablemente por Humphry Davy en la institución real de Londres (siglo XIX temprano). El cuadro demuestra el sótano con una batería enorme, usada para crear la descarga.....	4
Figura 2.	(b) Lámparas de arco de carbón de aire (izquierdo) y de recipiente de cristal agotado (derecho), también conocido como “Davy’s electric eggs”.....	4
Figura 3.	50 años de evolución en EDM machines: Eleroda D1 (1955) and Robofil 2050 TW (2005) de Charmilles (images © Charmilles Technologies).....	6
Figura 4.	Imagen de los elementos que intervienen en el proceso de electroerosión.....	7
Figura 5.	Salto de chispas en el mecanizado por electroerosión.....	8
Figura 6.	Campo eléctrico, .....	8
Figura 7.	Canal de descarga, .....	9
Figura 8.	Erosión del material y desgaste del electrodo, .....	9
Figura 9.	Implosión de la bola de gas,.....	10
Figura 10.	Flushing del líquido dieléctrico.....	10
Figura 11.	Configuración de los 3 ejes para el posicionamiento del centro $\mu$ EDM.....	12
Figura 12.	Mecanismo micrométrico para el movimiento lineal de cada eje.....	13
Figura 13.	Mecanismo utilizado para el movimiento lineal de cada eje obtenido de un CD Rom Drive .....	14
Figura 14.	Diseño estructura soporte. Dimensiones: mm.....	14
Figura 15.	Estructura soporte hecha de acrílico.....	15
Figura 16.	Pack de fijación para los ejes X y Y.....	16

Figura 17. CD-ROM drive y Floppy drive utilizados en el sistema de posicionamiento del centro de $\mu$ EDM .....	16
Figura 18. Sujeción del eje Y.....	17
Figura 19. Sujeción del eje X.....	17
Figura 20. Sujeción del eje Z; disposición final del ensamble para definir el sistema de posicionamiento del centro de $\mu$ EDM en 3 ejes .....	17
Figura 21. Colocación de las cargas en el modulo de simulación del software Solidworks 2010.	
Figura 22. Gráfica de los esfuerzos de von Mises de la estructura de acrílico del centro de $\mu$ EDM .....	19
Figura 23. Tarjeta Easy Driver 4.4.....	20
Figura 24. Pines tarjeta Easy Driver 4.4.....	21
Figura 25. Motor a pasos bipolar.....	22
Figura 26. Conexión de las 2 bobinas de un motor a pasos en los pines COIL A y B.....	23
Figura 27. Conexión Arduino Mega 2560 – Easy Driver 4.4 y motor a pasos (para un eje) .....	24
Figura 28. Conexión física Arduino Mega 2560 – Easy Driver 4.4 y motor a pasos (para un eje) .....	24
Figura 29. Esquema para los 3 ejes .....	25
Figura 30. Ambiente de programación software Arduino 0022 .....	25
Figura 31. Características del broquero Dremel utilizado para configurar el porta-electrodo .....	26
Figura 32. Configuración del porta-electrodo de la plataforma de $\mu$ EDM.....	30
Figura 33. Plataforma base centro de $\mu$ EDM .....	31
Figura 34. Propiedades de los pulsos para el proceso de $\mu$ EDM .....	34
Figura 35. Generador de pulsos proceso $\mu$ EDM.....	34
Figura 36. Software MPLAB IDE V8.0 para la programación del PIC 16F877A.....	35

Figura 37. Programa del PIC16F877A y el periodo de tiempo de un ciclo de operación para el generador .....	36
Figura 38. Diagrama electrónico optoacoplador 4N32.....	37
Figura 39. Diagrama electrónico del MC34062 para duplicar el voltaje de 12 – 24 volts.....	38
Figura 40. Diagrama electrónico transistor NPN.....	39
Figura 41. Diagrama electrónico en el software Proteus Isis Professional 7 de la configuración final del generador de pulsos.....	39
Figura 42. Construcción física del diagrama electrónico simulado en el software Proteus Isis Professional para configurar el generador de pulsos .....	40
Figura 43. Tanques de almacenamiento para el sistema de circulación del fluido dieléctrico; dimensiones: mm.....	42
Figura 44. Tanques de almacenamiento hechos de acrílico .....	43
Figura 45. Sistema de circulación de la plataforma de $\mu$ EDM.....	44
Figura 46. Limpieza por aspiración a través de la pieza.....	44
Figura 47. Configuración sistema de circulación para el fluido dieléctrico .....	45
Figura 48. Diagrama de flujo para la implementación de la interfaz CAM.....	48
Figura 49. Firmware cargado en la tarjeta Arduino Mega 2560 .....	49
Figura 50. Ambiente de la interfaz CAM utilizada RepSnapper.....	49
Figura 51. Elementos necesarios para la construcción del centro de $\mu$ EDM.....	52
Figura 52. Componentes del centro de $\mu$ EDM .....	52
Figura 53. Montaje circuito electrónico.....	53
Figura 54. Montaje del sistema de circulación en la carcaza.....	53
Figura 55. Montaje del sistema de circulación en el sistema de posicionamiento.....	54
Figura 56. Configuración final del centro de micromaquinado EDM asistido por computadora.....	54
Figura 57. Proceso de maquinado por electroerosión de Micro-Hole en el centro de $\mu$ EDM.....	55

Figura 58. Ambiente de programación de la interfaz para CAM repsnapper para manipular el posicionamiento del centro de $\mu$ EDM.....	57
Figura 59. Moldes de cobre para la fundición del material intermetálico.....	60
Figura 60. Fundición del material intermetálico Fe-Al.....	60
Figura 61. Lingote obtenido en el proceso de fundición.....	61
Figura 62. Difractograma del material intermetálico Fe-Al antes de maquinarse en el centro de $\mu$ EDM.....	63
Figura 63. Papel para esmerilado manual.....	65
Figura 64. Proceso de pulido.....	65
Figura 65. Probeta atacada de material intermetálico Fe-Al. Dimensiones 1 X 1 cm.....	66
Figura 66. Imagen del material intermetálico obtenida con un microscopio óptico con un aumento de 100X.....	67
Figura 67. Imagen obtenida en el microscopio óptico de los cráteres hechos por los electrodos de latón y molibdeno en el centro de $\mu$ EDM.....	68
Figura 68. Micro-Hole o crater producido por el electrodo de latón de la marca GF Agie Chermilles.....	69

## LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Características físicas del acrílico de impacto medio-alto.....	18
Tabla 2. Peso de los componentes que integran la plataforma base del centro de $\mu$ EDM.....	19
Tabla 3. Combinaciones que pueden ser programadas en los pines MS1 y MS2 para el control de los pasos del motor.....	23
Tabla 4. Ecuaciones de cálculo de los componentes electrónicos del diagrama de la figura 37.....	38
Tabla 5. Características físicas de los electrodos utilizados en el centro de $\mu$ EDM.....	46
Tabla 6. Precisión del centro de $\mu$ EDM.....	57

## GLOSARIO.

- Arco** Sucesión de descargas eléctricas que se sitúan localizadamente en un punto.
- Arduino** Plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles.
- Aspiración** Succión del líquido dieléctrico a través de la pieza o electrodo.
- EDM** (Electrical Discharge Machining). Maquinado por electroerosión de electrodo.
- CAM** (Computer Assisted Manufacturing) Manufactura asistida por computadora.
- CNC** (Control Numerical Computer) Maquinado de control numérico.
- Cortocircuito** Situación dada cuando existe contacto directo entre los dos electrodos (electrodo y pieza).
- Cráter** Cavidad realizada por cada uno de los impulsos sobre la superficie que se esta mecanizando.
- Dieléctrico (Líquido)** Líquido no conductor de electricidad que se utiliza en electroerosión, en él se sumergen la pieza y el electrodo durante el proceso de mecanizado.
- Descarga** Paso de corriente a través de algún punto del gap, debida a un impulso de tensión.
- Desionización** Retorno del líquido dieléctrico a la situación normal no conductora después de cada descarga eléctrica.
- Easy Driver** Tarjeta electrónica usada para el control de motores a pasos (velocidad, números de pasos, sentido de giro, entre otras variables).
- Eléctrodo** Es la herramienta de trabajo que se utiliza en electroerosión.
- Frecuencia** Número de impulsos que se dan en un segundo

- Flushing** Se produce cuando el material fundido del proceso de electroerosión se solidifica y es arrastrado en forma de bolas por el líquido dieléctrico.
- Interfaz** Es la conexión entre dos ordenadores o máquinas de cualquier tipo dando una comunicación entre distintos niveles.
- Gap** Espacio entre el electrodo y pieza en el cual se dan las descargas eléctricas.
- Ionización** Periodo anterior al paso de la descarga eléctrica durante el cual el líquido dieléctrico se convierte en conductor en un punto dado. Para ello se ha de aplicar tensión eléctrica en ambos electrodos.
- Limpieza** Es la circulación del líquido dieléctrico entre el electrodo y la pieza que se está mecanizando.
- Micro-Hole** Proceso de electroerosión de electrodo donde se utiliza un alambre como electrodo para el maquinado de agujeros o crateres de acuerdo al diámetro del alambre usado.
- Open source** Software disponible sin costo alguno y libre para todo público.
- Periodo** Tiempo que pasa desde el comienzo de un impulso hasta el comienzo del impulso siguiente.
- PIC** (Programmable Integrated Circuit) Circuito integrado programable.
- Repsnapper** Software alternativo generador de códigos G open source.
- Resistencia dieléctrica** Se define resistencia dieléctrica de un dieléctrico al campo eléctrico que es capaz de aguantar dicho dieléctrico sin ionizarse, es decir, sin volverse conductor. Se mide en Kvolts/cm.
- WEDM** (Wire Electric Discharge) Maquinado por electroerosión de hilo.
- μEDM** (Micro Electrical Discharge Machining) Micromaquinado por electroerosión de electrodo.

## **INTRODUCCIÓN.**

Los avances en diversos campos de la ciencia en combinación con una necesidad cada vez más creciente de materiales de alta resistencia en industrias de alta tecnología, han provocado un aumento en el uso de materiales de difícil maquinado en los procesos de manufactura.

El desarrollo de procesos de maquinado no tradicionales hoy en día se ha convertido en parte vital dentro de los procesos industriales para poder trabajar con materiales de alta dureza, de alta resistencia mecánica, materiales frágiles.

El uso del procedimiento de mecanizado mediante el sistema electroerosivo (también conocido por las siglas EDM, de “Electrical Discharge Machining”) ha permitido trabajar con estos tipos de materiales teniendo como única condición de que estos materiales tienen que ser conductores [1].

El proceso EDM debido a su versatilidad ha permitido el poder trabajar con materiales tales como aleaciones de hierro, titanio, aleaciones de alta resistencia mecánica, acero inoxidable, superaleaciones, etc, que son muy difíciles de maquinar en los métodos convencionales y cuyo costo de maquinado es muy elevado. Además el proceso EDM debido a su alta precisión y productividad permite la producción de herramientas de fabricación tales como matrices para plásticos, matrices para fundición a presión, forja, matrices de punzonar, de extrusión y para el corte de formas externas tales como troqueles, elaboración de piezas para la industria aeroespacial, etc [2].

## JUSTIFICACIÓN.

Debido a los avances en los procesos industriales, la industria nacional debe ajustarse a las tendencias que se están manejando en otros países más desarrollados, ya que el maquinado convencional está siendo desplazado por otro tipo de tecnologías cuyo costo de maquinado es menor, más eficiente y más flexible como en el caso del proceso de electroerosión de electrodo conocido por sus siglas como EDM [3].

El proceso EDM permite el manejo de materiales tales como aleaciones de hierro, aleaciones de aluminio, de titanio, entre otros; que en sistemas convencionales de maquinado o también denominados de desgaste de viruta (torno, fresadora, cepillo) resulta muy difícil el poder maquinaslos.

La versatilidad de este método permite en los procesos de producción, grandes posibilidades para mecanizar estos materiales independientemente de su dureza y propiedades mecánicas, además de la posibilidad de mecanizar un gran abanico de espesores, con una alta precisión independientemente del tamaño de la pieza a fabricar.

El presente proyecto se enfocó en el diseño de un centro de micromaquinado por electroerosión ( $\mu$ EDM) con una interfaz para CAM por computadora, que permita acercarnos al estudio sobre la caracterización de los parámetros esenciales tales como: voltaje, corriente, frecuencia de generación de pulsos eléctricos para un maquinado de un material intermetálico de base Fe-Al en un proceso de micromaquinado por electroerosión por micro-hole.

La importancia de estudiar este tipo de materiales radica en que estos han tenido gran aplicación, sobre todo en las áreas de bioingeniería y en el desarrollo de tecnología en el área aeroespacial, por lo que es importante tener un punto de partida para futuras investigaciones en las áreas de estudio ya mencionadas.

Por otra parte, el impacto que dejaría este proyecto de investigación es que la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH, cuente con este procedimiento de

mecanizado dentro de su equipo de laboratorio acercando al alumnado a tecnologías alternas a las de arranque de viruta que actualmente se utilizan en la industria metalmeccánica por su alta precisión, como es el caso del proceso de electroerosión de electrodo. Además de que a largo plazo se pretende conjuntar una red de trabajo junto con un laboratorio en donde se encuentren diferentes especialidades dentro del área de bioingeniería; siendo este proyecto una fase inicial para establecer material y equipo de laboratorio que reproduzca piezas con un grado de biocompatibilidad en el cuerpo humano, y establecer si el uso de un material intermetálico con base Fe-Al es potencialmente aplicable.

Los materiales intermetálicos de base Fe-Al poseen inconvenientes al trabajarse en maquinas de arranque de viruta como: la escasa ductilidad y tenacidad a temperatura ambiente que poseen. Por lo que aprovechando también propiedades como: una buena estabilidad estructural y buena resistencia a la oxidación a altas temperaturas, los convierten en materiales idóneos para ser maquinados en el proceso de electroerosión.

## **OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN.**

### **1.- Objetivo general.**

Diseñar un centro de micromaquinado por electroerosión de electrodo controlado por computadora y con interfaz a un sistema CAM.

### **2.- Objetivos particulares.**

1. Establecer el diseño de la plataforma base para el posicionamiento del electrodo (sistema de posicionamiento y porta-electrodo).
2. Establecer la selección de los dispositivos físicos necesarios para lograr el proceso de electroerosión tales como: generador de pulsos, seleccionar la bomba de circulación y establecer el sistema de circulación apropiado para manejar el líquido dieléctrico elegido, establecer las dimensiones de los tanques que alojaran al líquido dieléctrico , además del diseño y construcción del electrodo.
3. Programar el centro de micromáquinado vinculando la interfaz por computadora (un programa CAM) con el desarrollo electrónico arduino para poder controlar el proceso de electroerosión.
4. Adecuar los parámetros del proceso de electroerosión al maquinado del material intermetálico seleccionado con base Fe-Al tales como: Voltaje necesario, corriente necesaria, frecuencia de generación de pulsos.

## **HIPOTÉISIS.**

Es posible diseñar un centro de micromaquinado por electroerosión de electrodo con interfaz CAM para estudiar los parámetros de desbaste de un material intermetálico con grado de biocompatibilidad.

# **CAPÍTULO I.**

## **ANTECEDENTES.**

# **CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.**

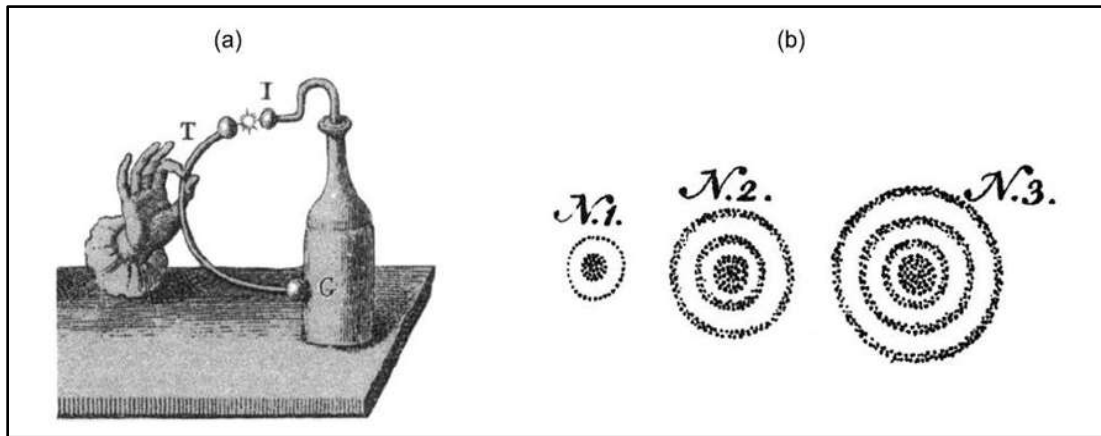
## **1.1. DESARROLLO HISTÓRICO DEL PROCESO DE ELECTROMAQUINADO.**

Las raíces históricas del proceso EDM datan del descubrimiento de las descargas eléctricas. Además de las descargas que se producen por fenómenos naturales (por ejemplo el relámpago), la producción de descargas artificiales ha sido estrechamente vinculada al desarrollo de fuentes de energía eléctricas.

Las primeras investigaciones de fenómenos electrostáticos fueron realizadas con las máquinas friccionales, durante la primera mitad del siglo XVIII. Después de eso, las primeras chispas y arcos pulsados fueron producidos con el “Leyden Jars” de Leiden; una forma temprana de condensador inventada en Alemania y en los Países Bajos (ver Figura 1.a).

Alrededor de 1745 descargas de mayor alcance fueron creadas poniendo varios tarros de Leiden paralelamente, creando así una batería. Aunque los científicos de este período detectaron que la naturaleza de estas descargas artificiales era igual que la naturaleza del relámpago, la comprensión de los fenómenos observados era muy incompleta [4].

José Priestley (1733-1804), teólogo y químico inglés, fue el primero en descubrir los cráteres de la erosión dejados por descargas eléctricas en la superficie del cátodo en 1766 (ver Figura 1.b). Priestley también investigó la influencia del material del electrodo y de la corriente derivada en el tamaño de los cráteres [5].



**Figura 1. (a) Placa grabada enviada por Alejandro Volta a José Priestley, donde demuestra la chispa producida por cortocircuito de un tarro de Leiden (1775); (b) bosquejos de los cráteres de la erosión en superficie del cátodo, observados por Joseph Priestley en 1766 [5].**

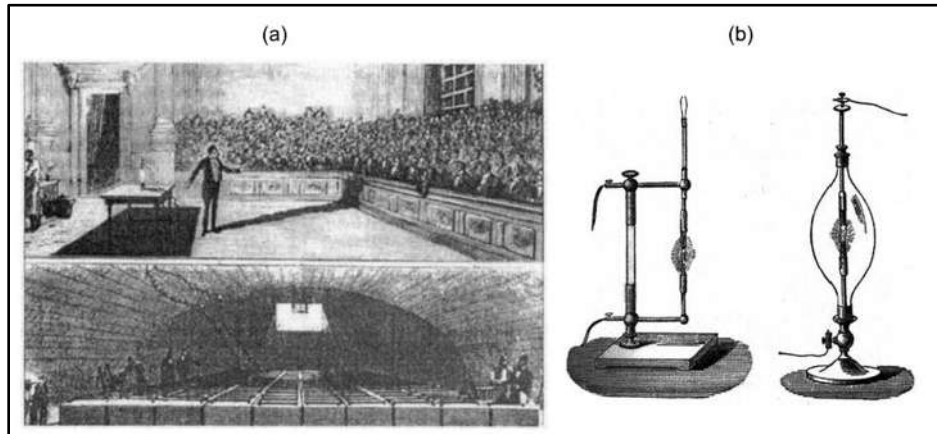
Considerando que las descargas estudiadas por Priestley eran pulsos (por las características de los tarros de Leiden), las descargas continuas se lograron producir solamente con la batería de celdas electroquímicas, inventada más adelante por Alejandro Volta (1745-1827) en 1799 [6].

Desarrollando las baterías voltáicas más grandes, el primer arco de carbón continuo fue producido por Vasillii Petrov en St-Petersburgo en 1802. Publicado en 1803 pero solamente en Rusia, su descubrimiento fue ignorado y olvidado por más de un siglo.

El descubrimiento del arco eléctrico se atribuye a menudo a Humphry Davy (1778-1829). Inconsciente del trabajo de Petrov, Davy volvió a descubrir en forma independiente arcos de carbón alrededor de 1808, usando una enorme batería voltáica de la Institución Real de Londres (ver Figura 2.a). Separando dos electrodos horizontales de carbón conectados con la batería, Davy creó una descarga brillante y estable. La forma de esta descarga fue arqueada, dando su nombre a este fenómeno [6].

El desarrollo de dispositivos usando arcos eléctricos para propósitos de iluminación siguió rápidamente. El filósofo suizo Auguste-Arturo de la Rive (1801 - 1873) probó en 1820 utilizando un recipiente de cristal sellado al vacío que los

arcos pueden producirse también en vacío. (ver Figura 2.b) ejemplos de las demostraciones de estas lámparas de arco de carbón [6].



**Figura 2 (a) Demostración pública de la descarga de arco de carbón, probablemente por Humphry Davy en la Institución Real de Londres (inicios del siglo XIX). El cuadro demuestra el sótano con una batería enorme, usada para crear la descarga; (b) lámparas de arco de carbón de aire (izquierdo) y de recipiente de cristal sellado al vacío (derecho), también conocido como "Davy's electric eggs"[5].**

Con la sofisticación de fuentes eléctricas y su industrialización, Auguste de Meritens (1834-1898) desarrolló en 1881 en Francia un segundo uso importante de los arcos eléctricos. Él utilizó el calor producido por un arco para unir 2 placas, estableciendo las bases del proceso de soldadura por arco [7].

La historia del proceso EDM comienza en 1943, con el descubrimiento del principio de funcionamiento del proceso por los científicos rusos Boris y Natalya Lazarenko en Moscú. El gobierno soviético los asignó para investigar el desgaste causado por las chispas entre los contactos eléctricos de tungsteno, un problema que era particularmente crítico para el mantenimiento de automotores durante la Segunda Guerra Mundial. Poniendo los electrodos en aceite, encontraron que las chispas eran más uniformes y fiables que en el aire. Tenían entonces la idea de invertir el fenómeno, y de utilizar la chispa como método de erosión. Aunque no pudieron solucionar el problema original del desgaste, los Lazarenkos desarrollaron durante la guerra las primeras máquinas EDM, las cuáles eran muy útiles para erosionar los metales duros tales como tungsteno o carburo de

tungsteno. El “Lazarenko Circuit” permaneció como la base para las máquinas EDM [7].

En los años 50's, el progreso de esta tecnología se centró en la comprensión del fenómeno de la erosión. Es también durante este período que las industrias produjeron las primeras máquinas de EDM. Las industrias suizas estuvieron implicadas desde los primeros años en este mercado, y todavía siguen siendo líderes hoy en día. Agie fue fundado en 1954, y “Les Ateliers de Charmilles” produjeron su primera máquina en 1955. Debido a la mala calidad de los componentes electrónicos, el funcionamiento de este tipo de máquinas era limitado en este tiempo [8].

En los años 60's, el desarrollo de la industria del semiconductor permitió considerables mejoras en máquinas EDM. Las máquinas de EDM se convirtieron en tecnología confiable y producida con calidad controlada, mientras que las máquinas de WEDM (Wire Electric Discharge) estaban apenas en sus inicios.

Con la introducción del control de posición numérico a finales de los 60's y principios de los 70's, el movimiento del electrodo llegó a ser mucho más exacto. Esta importante mejora impulsó el desarrollo de las máquinas de corte por hilo (WEDM). Los sistemas de control numérico por computadora (CNC) mejoraron aún más el funcionamiento de las maquinas EDM a mediados de los años 70's [9].

Durante las décadas siguientes, los esfuerzos se centraron principalmente en el diseño del generador de pulsos, los usos del micromaquinado, la automatización del proceso, el servocontrol y la robótica (ver Figura 3).

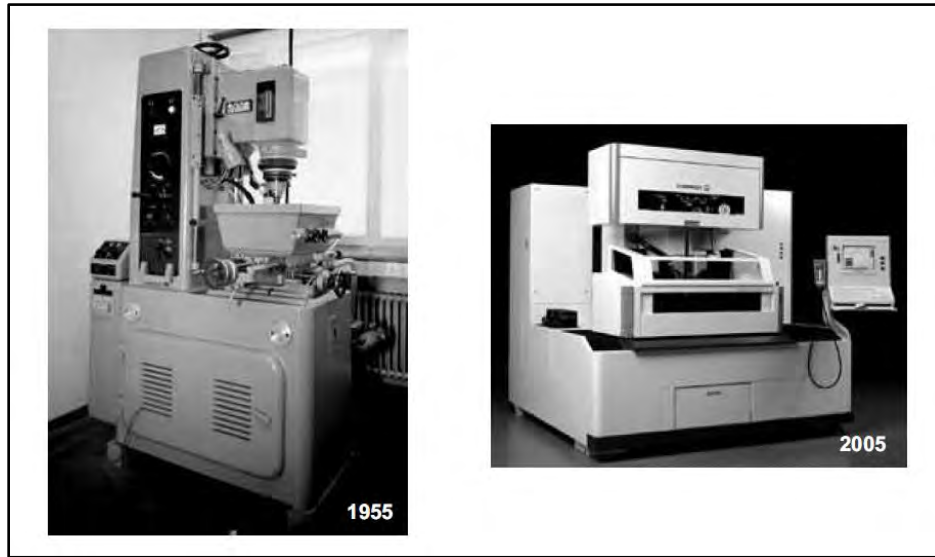


Figura 3. 50 años de evolución en EDM machines: Eleroda D1 (1955) and Robofil 2050 TW (2005) de Charmilles (images © Charmilles Technologies) [7].

## 1.2. EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN

EDM es un proceso termoeléctrico en el cual se provoca la erosión o el desprendimiento de material con la generación controlada de una chispa eléctrica. Es uno de los procesos de maquinado no tradicionales que más desarrollo y atención ha tenido por parte de la industria manufacturera. Hoy en día, el procedimiento EDM es usado en la producción de cavidades de matrices para la manufactura de componentes automotores, aeroespaciales y quirúrgicos, cortes con formas complejas en materiales de alta dureza [10].

El proceso EDM se ha convertido en un método casi imprescindible en la industria debido a su capacidad de maquinar cualquier material eléctricamente conductor independientemente de su resistencia mecánica o de su dureza [11].

A pesar de sus ventajas, las preocupaciones ambientales asociadas a este tipo de maquinado han sido una desventaja importante en el proceso EDM. El líquido dieléctrico usado en el proceso EDM es la fuente de contaminación primaria.

### 1.3. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MECANIZADO ELECTROEROSIVO.

El principio del EDM aprovecha el efecto de erosión provocado por una serie de descargas controladas que generan una chispa eléctrica entre un electrodo y el material de trabajo. Las chispas se generan en un líquido dieléctrico, generalmente agua o aceite, entre el material de trabajo (cátodo) y el electrodo (ánodo) generalmente hecho de grafito o cobre, que se puede considerar como la herramienta de corte.

No hay contacto mecánico entre los electrodos durante el proceso entero. Puesto que la erosión es producida por descargas eléctricas entre el electrodo y el objeto, los cuales deben ser eléctricamente conductores [11].

Así, el proceso de maquinado consiste en la eliminación sucesiva de pequeños volúmenes de material de la pieza a maquinar (ver Figura 4). Este pequeño volumen es fundido o vaporizado durante cada descarga. El volumen quitado por una sola chispa es pequeño, en la gama de  $10^{-6} - 10^{-4} \text{ mm}^3$ , pero este proceso básico se realiza repetidamente bajo una frecuencia determinada [12].

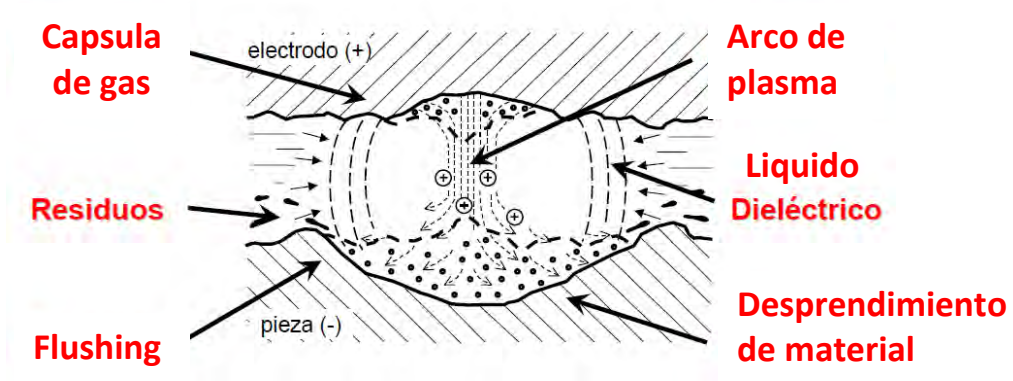


Figura 4. Imagen de los elementos que intervienen en el proceso de electroerosión [1].

#### 1.4. PROCESO DE LA DESCARGA.

El mecanizado por electroerosión se efectúa mediante el salto de chispas eléctricas entre dos electrodos sometidos a una determinada tensión eléctrica y sumergidos ambos en un aislante aislante o dielectrico (ver Figura 5) [13].

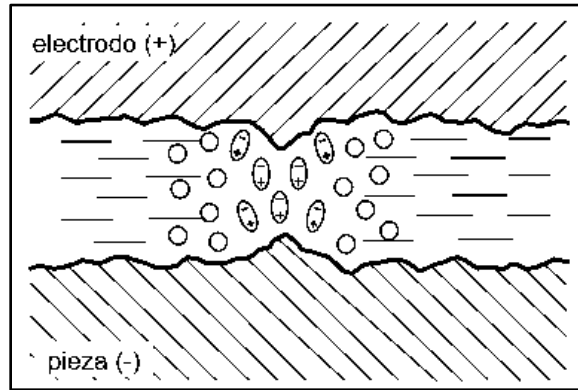


Figura 5. Electrodos y líquido dieléctrico [10].

Al estar ambos electrodos en un medio dieléctrico o aislante, la tensión que se aplique a ambos ha de ser suficiente como para llegar a crear un campo eléctrico (ver Figura 6) mayor que la rigidez dieléctrica del líquido [14].

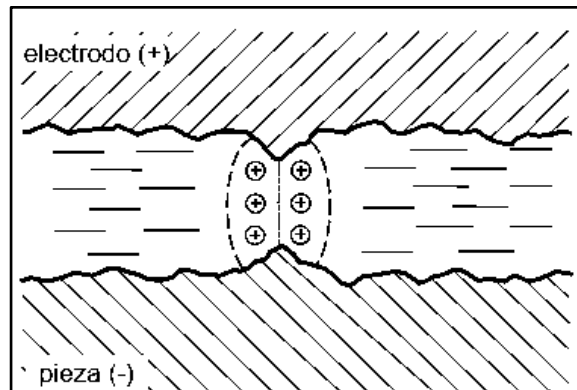


Figura 6. Campo eléctrico [10].

Bajo la acción de este campo eléctrico, iones libres positivos y electrones se encontrarán acelerados creando un canal de descarga (ver Figura 7) que se vuelve conductor, y es precisamente en este punto donde salta la chispa eléctrica. Esto provoca colisiones entre los iones positivos (+) y los electrones (-). Se forma entonces un canal de plasma.

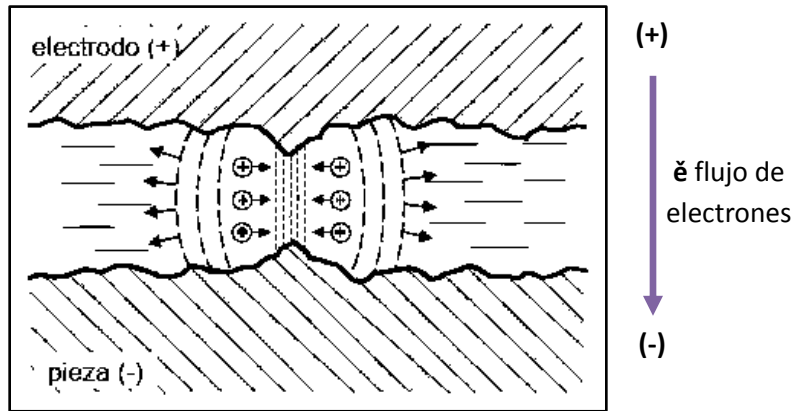


Figura 7. Canal de descarga [10].

Bajo el efecto de los choques se crean altas temperaturas en ambos polos y alrededor del canal de plasma se forma una cápsula de gas que empieza a crecer. Por otro lado las altas temperaturas que se han dado en los dos polos, provocan que en el interior de la cápsula se vaya fundiendo parte del material de la pieza a maquinar, mientras que el electrodo se desgasta casi en forma despreciable en función al desgaste que sufre la pieza a maquinar (ver Figura 8) [15].

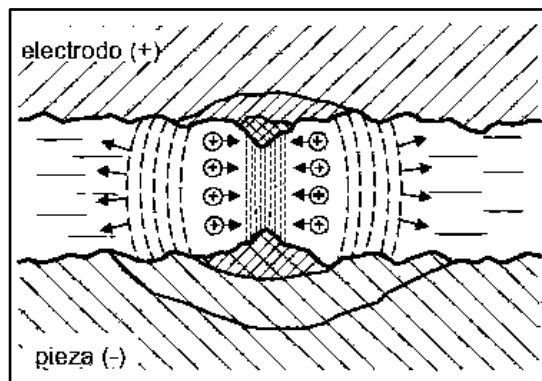


Figura 8. Erosion del material y desgaste del electrodo [10].

En esta situación con el canal de plasma formado, el material fundido en ambos polos provoca que se corte la corriente eléctrica y que el canal de plasma se interrumpa y con ello la chispa eléctrica desaparezca. El líquido dieléctrico entonces colapsa la cápsula de gas haciéndola implosionar (ver Figura 9) [16].

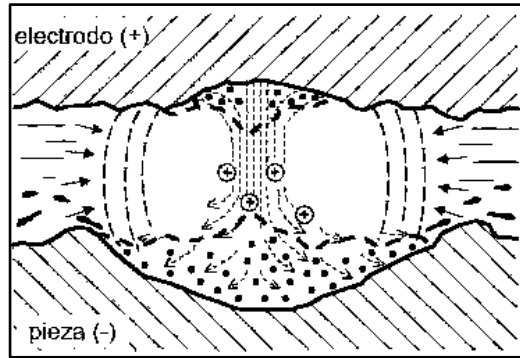


Figura 9. Implosión de la bola de gas [10].

Ello hace que se creen fuerzas que hacen salir el material fundido formando dos cráteres en las superficies. El material fundido se solidifica y es arrastrado en forma de bolas por el líquido dieléctrico "Flushing" (ver Figura 9), constituyendo lo que se puede llamar "viruta del proceso de electroerosión" [17].

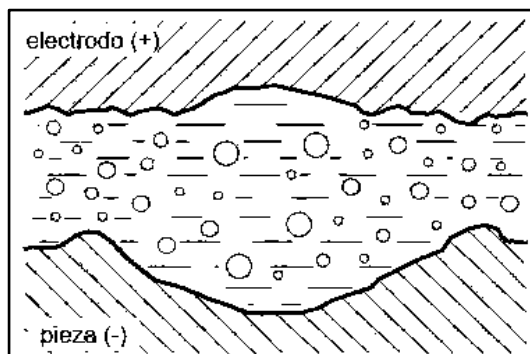


Figura 10. Flushing del líquido dieléctrico [10].

**CAPÍTULO II.**

**PLATAFORMA BASE DEL CENTRO  
DE MICROMAQUINADO POR  
ELECTROEROSIÓN ( $\mu$ EDM).**

## CAPÍTULO II. PLATAFORMA BASE DEL CENTRO DE MICROMAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN ( $\mu$ EDM).

Las partes más importantes para el diseño de la plataforma base son:

- 1) El sistema de posicionamiento.
- 2) El porta-electrodo.

### 2.1. EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DEL CENTRO DE $\mu$ EDM.

Para el posicionamiento del centro de micromaquinado se necesitaba de una referencia para establecer la configuración de los ejes (ver figura 11) y tener un punto de partida sobre cómo configurar y diseñar el sistema de posicionamiento del centro de maquinado [18].

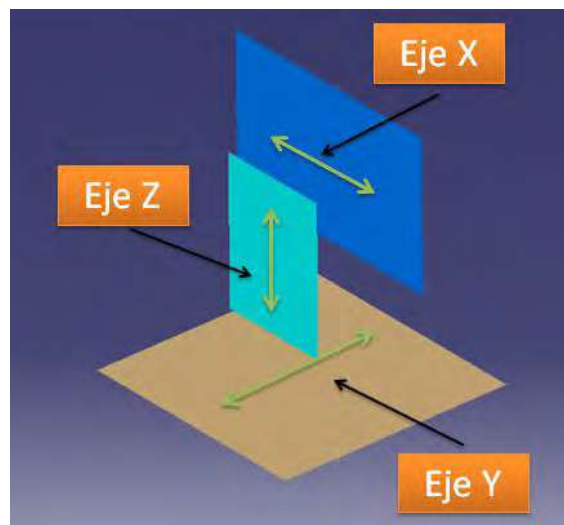


Fig 11. Configuración de los 3 ejes para el posicionamiento del centro  $\mu$ EDM.

El sistema de posicionamiento del centro de  $\mu$ EDM se estableció con los siguientes parámetros:

- De 3 ejes.
- Tipo prismático.
- En coordenadas rectangulares.



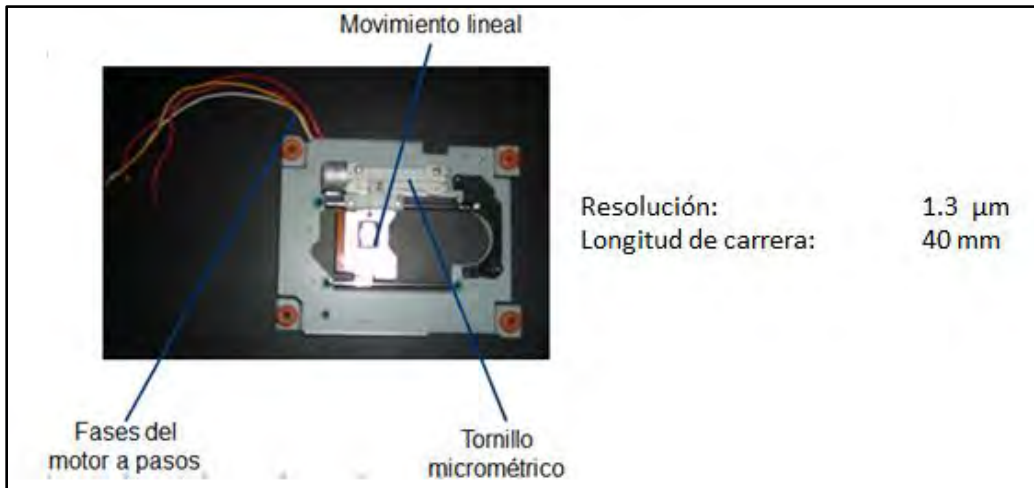


Fig 13. Mecanismo utilizado para el movimiento lineal de cada eje obtenido de un CD Rom Drive.

### 2.1.2. CONFIGURACIÓN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO EN TRES EJES.

Para ubicar cada uno de los 3 ejes para el posicionamiento, fue necesario diseñar una estructura soporte para establecer la configuración mostrada en la figura 11. Dicha estructura fue establecida mediante el Software de CAD Solidworks 2010 (ver figura 14).

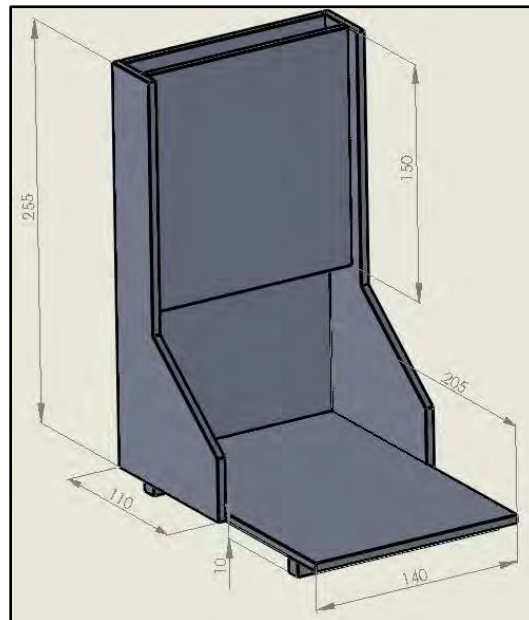


Fig 14. Diseño estructura soporte. Dimensiones: mm.

Establecido el diseño de la estructura soporte para el sistema de posicionamiento del centro de micromaquinado; la estructura físicamente se definió utilizando como

material base acrílico (ver figura 15), debido a que el material es de bajo precio y fácil manufacturabilidad además de que proporciona la rigidez necesaria para colocar los 3 ejes de posicionamiento además de que para fijar cada uno de ellos se requería realizar una serie de barrenos y este material permitía poder realizar esta acción ya que este no es quebradizo cuando se somete a un taladrado.

El espesor utilizado para la estructura fue de 3 mm exceptuando a las placas laterales cuyo espesor fue de 5 mm.



**Fig 15. Estructura soporte hecha de acrílico.**

Para fijar al eje X y Y se utilizó un pack de fijación para cada eje (ver figura 16) de:

- 4 bujes de 20 mm de largo por 10 mm de diámetro
- 4 tornillos de métrica 5 por 30 mm de largo, con tuerca y doble rondana.



**Fig 16. Pack de fijación para los ejes X y Y.**

Para los ejes 3 ejes se utilizaron lectores de CD-ROM de PC como el que muestra en la figura 17.



**Fig 17. CD-ROM drive utilizado en el sistema de posicionamiento del centro de  $\mu$ EDM.**

El ensamble para establecer el sistema de posicionamiento es mostrado en las siguientes figuras. Además para fijar el eje Z se utilizaron 2 tornillos de métrica 2 por 30 mm de largo.

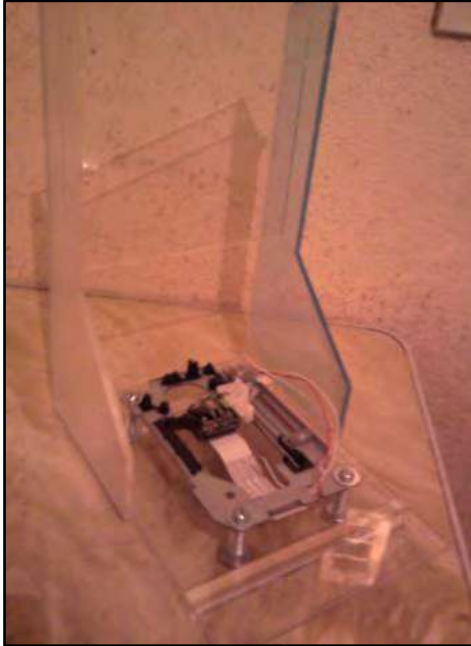


Fig 18. Sujeción del eje Y

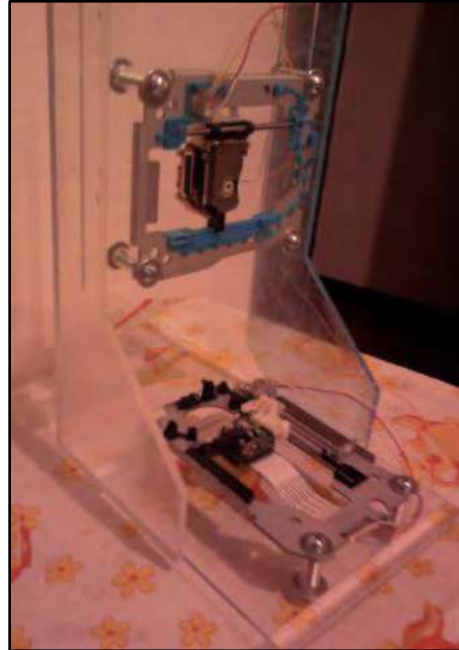


Fig 19. Sujeción del eje X

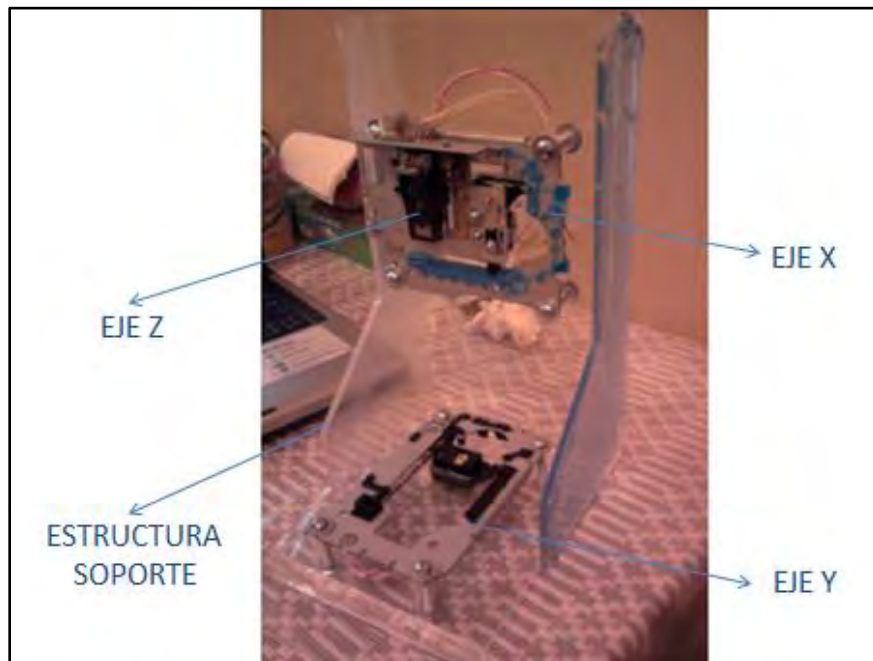


Fig 20. Sujeción del eje Z; disposición final del ensamble para definir el sistema de posicionamiento del centro de  $\mu$ EDM en 3 ejes.

### 2.1.3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO.

Se realizó el análisis estructural del sistema de posicionamiento diseñado en el software Solidworks 2010 (ver figura 14). Con la finalidad de conocer el comportamiento de la estructura de acrílico y si este puede ser utilizado como material para la plataforma base del centro de  $\mu$ EDM.

**Tabla 1. Características físicas del acrílico de impacto medio-alto.**

Acrílico Impacto Medio-Alto	
Nombre:	Acrílico (Impacto medio-alto)
Tipo de modelo:	Isotrópico elástico lineal
Límite elástico:	4.5e+007 N/m <sup>2</sup>
Límite de tracción:	7.3e+007 N/m <sup>2</sup>
Módulo elástico:	3e+009 N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson:	0.35
Densidad:	1200 kg/m <sup>3</sup>
Módulo cortante:	8.9e+008 N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de dilatación térmica:	5.2e-005 /Kelvin

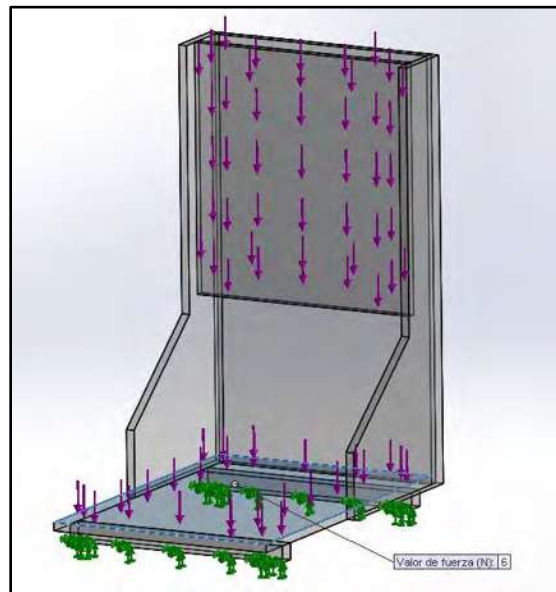
El proceso de electroerosión tiene la característica de que no hay un contacto mecánico directo entre la pieza de trabajo y el electrodo como sucede en los procesos de arranque de viruta (torno, fresadora, cepillo, etc) ya que el maquinado EDM se va logrando mediante la generación de chispas eléctricas que van erosionando el material conforme se van generando los arcos de plasma de cada pulso eléctrico hasta obtener la geometría deseada; debido a esto el análisis de las cargas aplicadas sobre la estructura de acrílico son el peso del mecanismo de

cada eje (lector de cd-drive), el porta-electrodo y la tina para colocar la pieza de trabajo.

*Tabla 2. Peso de los componentes que integran la plataforma base del centro de  $\mu$ EDM.*

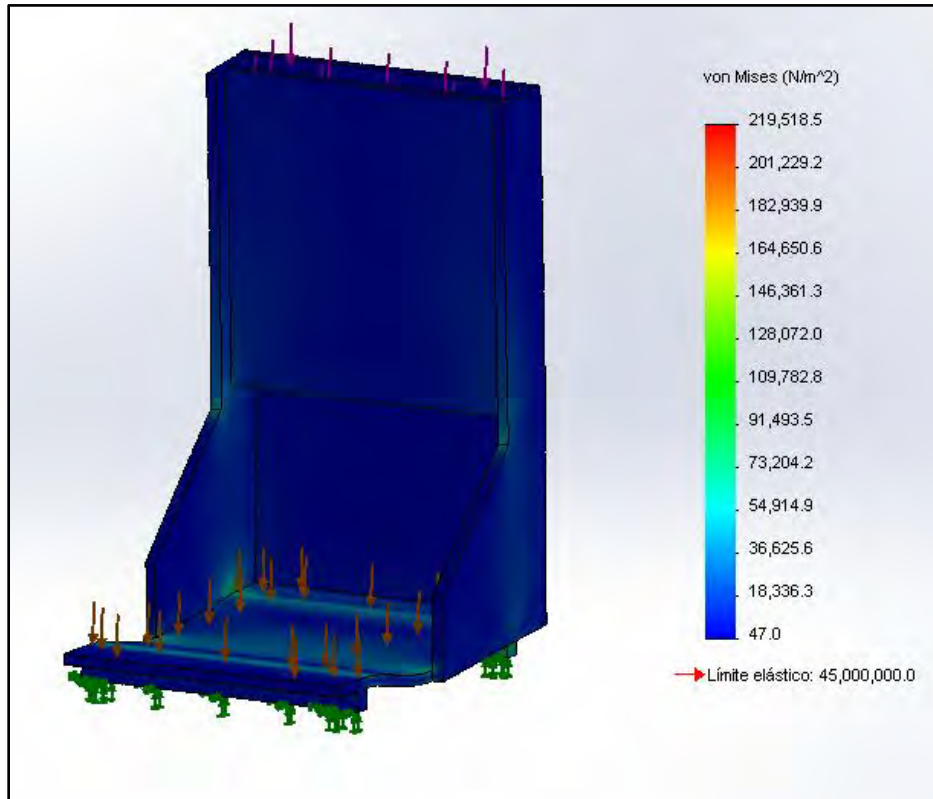
COMPONENTE	PESO (GRAMOS)
Lector de CD-Drive	250
Porta-electrodo	125
Tina para colocar la pieza de trabajo (se suma el peso del fluido dielectrico)	300

Utilizando el módulo de simulación del software Solidworks 2010, se realizó el análisis estructural de la estructura de acrílico, las cargas se definieron de acuerdo a los datos de la tabla 2 (ver figura 21).



**Fig 21. Colocación de las cargas en el módulo de simulación del software Solidworks 2010.**

Los resultados del análisis estructural de la estructura de acrílico se presentan en la siguiente figura.



**Fig 22. Gráfica de los esfuerzos de von Mises de la estructura de acrílico del centro de  $\mu$ EDM.**

En esta imagen se muestran los esfuerzos de Von Mises sobre la estructura de acrílico. Como se observa en la tabla 1, el límite elástico del acrílico de impacto medio-alto es de 45 MPa, de acuerdo a la imagen anterior el máximo esfuerzo que se tiene sobre la estructura es de 219.518 KPa, con estos valores se obtiene que la estabilidad estructural de la estructura de acrílico para la plataforma base es la adecuada para utilizarla en el centro de  $\mu$ EDM.

## 2.2. CONTROL DEL CENTRO DE MICROMAQUINADO MEDIANTE EL DESARROLLO ELECTRONICO ARDUINO.

Establecida la configuración del sistema de posicionamiento en tres ejes para el centro de  $\mu$ EDM y de acuerdo al desarrollo del proyecto el siguiente paso fue la parte el control de los ejes.

Para el control del sistema de posicionamiento se requirió del siguiente material:

- Desarrollo electrónico Arduino Mega 2560 [ver apéndice I].
- 3 tarjetas controladoras de pasos EasyDriver (uno para cada eje).
- Una fuente de voltaje (se utilizan las terminales de 5 volts).
- 3 motores a pasos bipolar (mecanismo CD-ROM drive) [ver apéndice II].

### 2.2.1. CONTROL DEL MOTOR PASO A PASO BIPOLAR CON LA TARJETA ELECTRÓNICA EASYDRIVER V4.4.

Para iniciar la programación la primera acción era vincular cada motor a pasos con su tarjeta controladora de pasos EASY Driver V4.4 correspondiente (ver figura 23), para después vincular las 3 tarjetas controladoras de pasos con la plataforma abierta arduino.



Fig 23. Tarjeta electrónica Easy Driver 4.4

Esta tarjeta tiene como función principal controlar un "Motor a pasos" también conocido como "Stepper Motor" como se explica a continuación (ver figura 24).

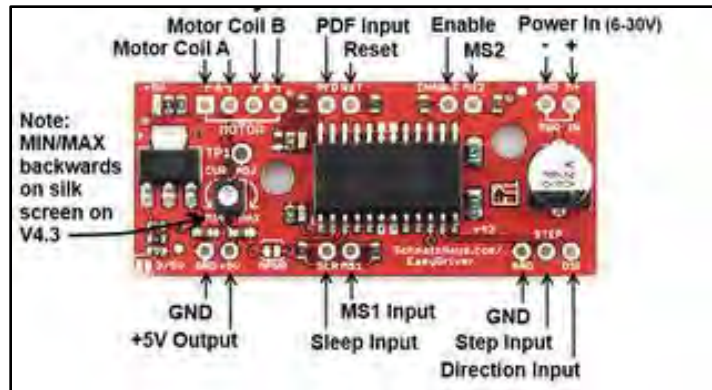


Fig 24. Pines tarjeta Easy Driver 4.4 [20].

### POWER IN (Alimentación).

La tarjeta electrónica Easy Driver puede ser alimentada desde 5 a 30 volts de DC, lo que permite manejar el motor a pasos con casi cualquier fuente DC (con un mínimo de 1 Amp).

### STEP INPUT Y DIRECTION INPUT

La tarjeta electrónica EasyDriver permite manejar un motor a pasos con tan solo 2 líneas, una de ellas da la cantidad de pasos a programar en el motor, y la otra da la dirección de giro del motor. Para programar estas líneas se debe tener en cuenta ciertos parámetros que se verán en el programa de la tarjeta Arduino (ver pagina 26).

### MS1 Y MS2

La tarjeta electrónica EasyDriver permite manejar un motor a pasos con un grado de precisión de micras, también permite modificar el tipo de paso de nuestro motor. Por ejemplo giros rápidos y eficaces o giros lentos y precisos.

Tipos de paso: 1, 1/2, 1/4, 1/8 (ver tabla 3).

**Tabla 3. Combinaciones que pueden ser programadas en los pines MS1 y MS2 para el control de los pasos del motor.**

MS1	MS2	STEP (PASO)
L	L	1
L	H	1/2
H	L	1/4
H	H	1/8

### SLEEP INPUT

La tarjeta electrónica EasyDriver permite parar el motor en cualquier instante, con solo habilitar un LOW en la entrada del pin SLEEP, esto permitirá detener el motor y que éste espere hasta que el pin SLEEP reciba un HIGH para ponerse en marcha de nuevo.

### MOTOR COIL A Y B

La tarjeta electrónica EasyDriver da la facilidad de conectar directamente ambas bobinas del motor a pasos directamente a la tarjeta sin necesidad de componentes intermedios, lo que permite usar el motor más fácilmente.

Los motores utilizados en el proyecto son motores a pasos bipolares, cada uno tiene 4 cables, que permiten conectar con las 2 bobinas del motor y así controlarlo (ver figura 25).



**Fig 25. Motor a pasos bipolar.**

Cada bobina tiene 2 cables de salida; por lo que cada pareja de cables pueden ir directamente conectados a la tarjeta electrónica EasyDriver en los pines COIL 1 ó COIL 2, sección A (pines encerrados por la A en la tarjeta) o la sección B, siempre comprobando que cada par de cables de cada bobina estén juntos en una de estas secciones (ver figura 26).

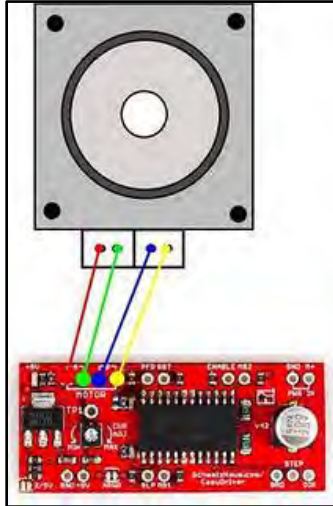


Fig 26. Conexión de las 2 bobinas de un motor a pasos en los pines COIL A y B.

## 2.2.2. CONEXIÓN DEL DESARROLLO ELECTRÓNICO ARDUINO MEGA 2560 A LA TARJETA ELECTRÓNICA EASYDRIVER.

Establecido el conexionado entre la tarjeta electrónica Easy Driver y el motor a pasos, este se vincula con la tarjeta Arduino Mega 2560 (ver figura 27 y 28).

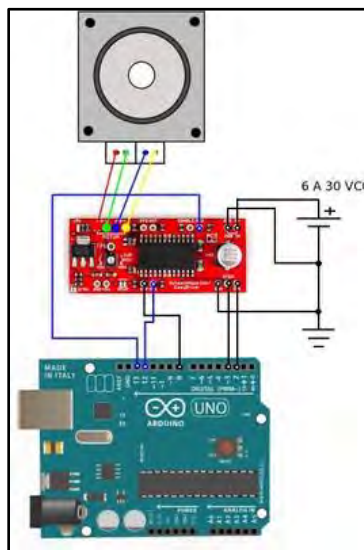


Fig 27. Conexión Arduino Mega 2560 – Easy Driver 4.4 y motor a pasos (para un eje).



Fig 28. Conexión física Arduino Mega 2560 – Easy Driver 4.4 y motor a pasos (para un eje).

De esta forma para el control del sistema de posicionamiento del centro de micromaquinado EDM se estableció la siguiente configuración electrónica (ver figura 29).

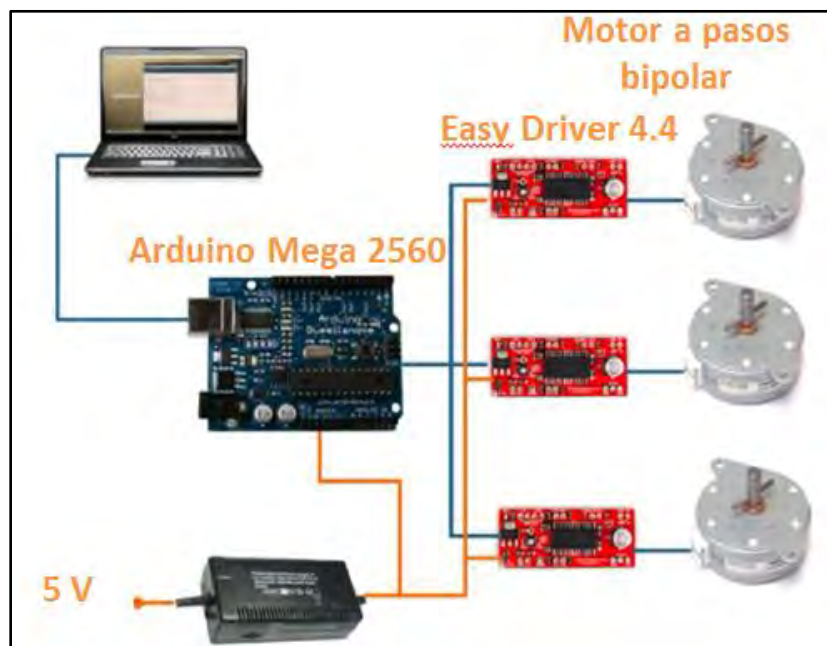


Fig 29. Esquema para los 3 ejes.

## 2.3. PROGRAMACIÓN EN EL SOFTWARE ARDUINO 0022.

Una vez conectada la tarjeta Arduino Mega 2560 a las 3 tarjetas EasyDriver 4.4, y éstas a los motores a pasos de los lectores de CD-ROM, se conecta La tarjeta Arduino vía USB para grabar el programa básico de control en el software Open Source Arduino 0022 (ver figura 30).

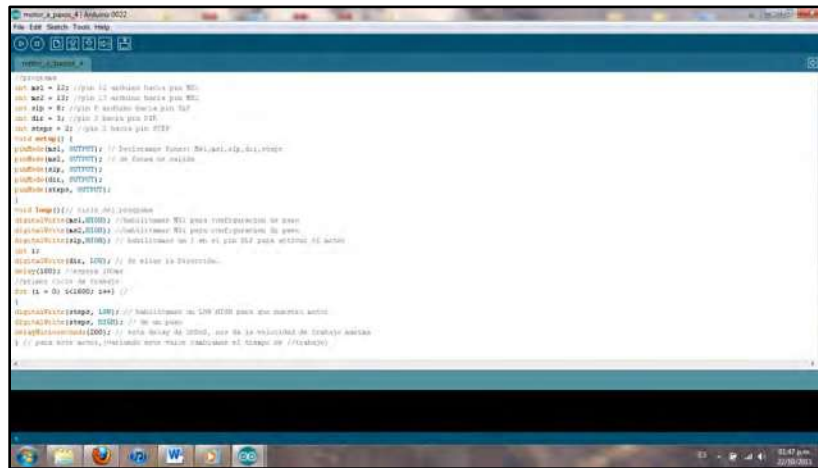


Fig 30. Ambiente de programación software Arduino 0022 [21].

### //programa control 3 Easy Drivers

int ms11 = 12; //pin 12 arduino hacia pin MS1 EJE X

int ms21 = 13; //pin 13 arduino hacia pin MS2

int slp1 = 8; //pin 8 arduino hacia pin SLP

int dir1 = 3; //pin 3 hacia pin DIR

int steps1 = 2; //pin 2 hacia pin STEP

int ms12 = 10; //pin 10 arduino hacia pin MS1 EJE Y

int ms22 = 11; //pin 11 arduino hacia pin MS2

int slp2 = 9; //pin 9 arduino hacia pin SLP

int dir2= 5; //pin 5 hacia pin DIR

int steps2= 4; //pin 4 hacia pin STEP

int ms13= 24; //pin 24 arduino hacia pin MS1 EJE Z

int ms23= 26; //pin 26 arduino hacia pin MS2

int slp3= 28; //pin 28 arduino hacia pin SLP

int dir3= 7; //pin 7 hacia pin DIR

```

int steps3= 6; //pin 6 hacia pin STEP
void setup() {
pinMode(ms11, OUTPUT); // Declaramos Pines: Ms1 ,ms2,slp,dir,steps
pinMode(ms21, OUTPUT); // de forma de salida para cada eje
pinMode(slp1, OUTPUT);
pinMode(dir1, OUTPUT);
pinMode(steps1, OUTPUT);
pinMode(ms12, OUTPUT);
pinMode(ms22, OUTPUT);
pinMode(slp2, OUTPUT);
pinMode(dir2, OUTPUT);
pinMode(steps2, OUTPUT)
pinMode(ms13, OUTPUT);
pinMode(ms23, OUTPUT);
pinMode(slp3, OUTPUT);
pinMode(dir3, OUTPUT);
pinMode(steps3, OUTPUT)
}
void loop(){// ciclo del programa
digitalWrite(ms11,HIGH); //habilitamos MS1 para configuracion de paso           EJE X
digitalWrite(ms21,HIGH); //habilitamos MS2 para configuracion de paso
digitalWrite(slp1,HIGH); // habilitamos un 1 en el pin SLP para activar el motor
int i;
digitalWrite(dir1, LOW); // Se elige la Dirección.
delay(100); //espera 100ms
digitalWrite(ms12,HIGH); //habilitamos MS1 para configuracion de paso           EJE Y
digitalWrite(ms22,HIGH); //habilitamos MS2 para configuracion de paso
digitalWrite(slp2,HIGH); // habilitamos un 1 en el pin SLP para activar el motor
int i;
digitalWrite(dir2, LOW); // Se elige la Dirección.

```

```

delay(100); //espera 100ms
digitalWrite(ms13,HIGH); //habilitamos MS1 para configuracion de paso           EJE Z
digitalWrite(ms23,HIGH); //habilitamos MS2 para configuracion de paso
digitalWrite(slp3,HIGH); // habilitamos un 1 en el pin SLP para activar el motor
int i;
digitalWrite(dir3, LOW); // Se elige la Dirección.
delay(100); //espera 100ms
//primer ciclo de trabajo
for (i = 0; i<1600; i++) //
{
digitalWrite(steps1, LOW); // habilitamos un LOW HIGH para que nuestro motor     EJE X
digitalWrite(steps1, HIGH); // de un paso
delayMicroseconds(200); // este delay de 200uS, nos da la velocidad de trabajo maxima
digitalWrite(steps2, LOW); // habilitamos un LOW HIGH para que nuestro motor     EJE Y
digitalWrite(steps2, HIGH); // de un paso
delayMicroseconds(200); // este delay de 200uS, nos da la velocidad de trabajo maxima
digitalWrite(steps3, LOW); // habilitamos un LOW HIGH para que nuestro motor     EJE Z
digitalWrite(steps3, HIGH); // de un paso
delayMicroseconds(200); // este delay de 200uS, nos da la velocidad de trabajo maxima
} // para este motor,(variando este valor cambiamos el tiempo de //trabajo)
digitalWrite(di1, HIGH);//cambiamos la dirección. EJE X
delay(200);
digitalWrite(dir2, HIGH);//cambiamos la dirección. EJE Y
delay(200);
digitalWrite(dir3, HIGH);//cambiamos la dirección. EJE Z
delay(200);
// Segundo ciclo de trabajo
for (i = 0; i<1600; i++)
{
digitalWrite(steps1, HIGH); //

```

```
digitalWrite(steps1, LOW); //  
delayMicroseconds(200);  
digitalWrite(steps2, HIGH); //  
digitalWrite(steps2, LOW); //  
delayMicroseconds(200);  
digitalWrite(steps3, HIGH); //  
digitalWrite(steps3, LOW); //  
delayMicroseconds(200);  
}  
} //fin de programa.
```

#### NOTAS:

- Variando "**Delay Microseconds (200);**" podemos configurar la velocidad de trabajo del motor paso a paso variando el tiempo entre paso y paso, como su nombre lo dice.
- La configuración de MS1 Y MS2 nos permite ver el tipo de paso que utilizará el motor.

## 2.4. EL PORTA-ELECTRODO.

### 2.4.1. CONFIGURACIÓN DEL PORTA-ELECTRODO

Para configurar el porta electrodo se utilizó un broquero de la marca Dremel con las siguientes características (ver figura 31).



Fig 31. Características del broquero Dremel utilizado para configurar el porta-electrodo.

Debido a que uno de los alcances del proyecto es realizar el proceso EDM de micro-hole; se requería de un broquero que permitiera asegurar un electrodo de pequeñas dimensiones desde diámetros de 4 mm hasta 0.3 mm por lo que las características del broquero de la marca Dremel se ajustaron perfectamente.

Se utilizó además un esparrago de 100 mm de longitud con un diámetro de métrica 5 para establecer la configuración final del porta-electrodo (ver figura 32).

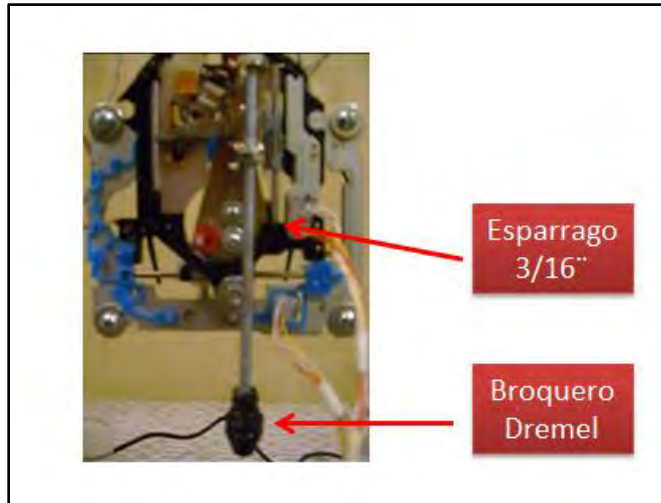


Fig 32. Configuración del porta-electrodo de la plataforma de  $\mu$ EDM.

## 2.5. CONFIGURACIÓN FINAL DE LA PLATAFORMA BASE DEL CENTRO DE MICROMAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN ( $\mu$ EDM).

Colocando el porta-eléctrodo sobre el eje z del sistema de posicionamiento, se obtuvo la configuración final de la plataforma base del centro de  $\mu$ EDM (ver figura 33).

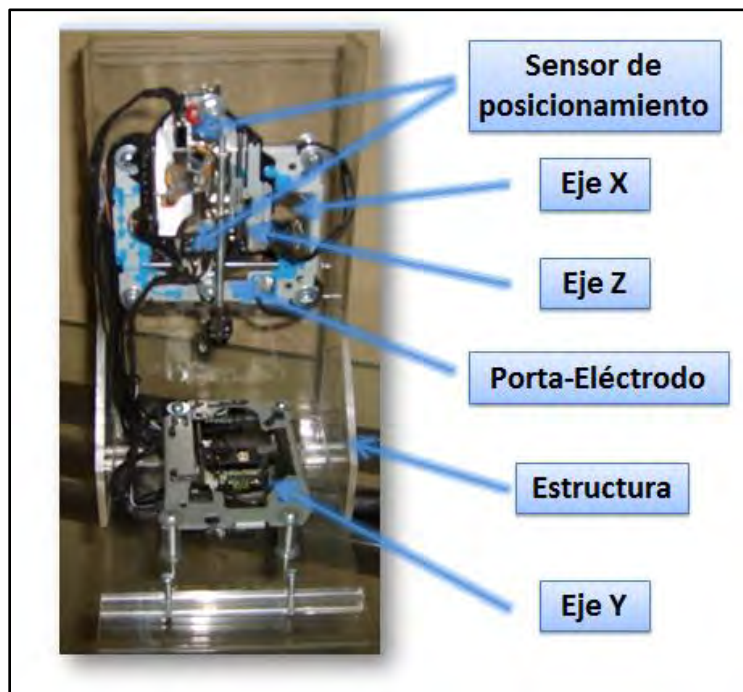


Fig 33. Plataforma base centro de  $\mu$ EDM.

**CAPÍTULO III.**

**DISPOSITIVOS NECESARIOS  
PARA EL PROCESO DE  
MICROELECTROEROSIÓN ( $\mu$ EDM).**

## **CAPÍTULO III. DISPOSITIVOS NECESARIOS PARA EL PROCESO DE MICROELECTROEROSIÓN ( $\mu$ EDM).**

Los dispositivos necesarios para el proceso de electroerosión con electrodo EDM son:

- 1) Generador de pulsos.
- 2) Sistema de circulación.
- 3) Electrodo para el mecanizado.

### **3.1. GENERADOR DE PULSOS.**

El generador es uno de los elementos esenciales para el proceso de electroerosión con electrodo. Este se logró mediante la implementación de un PIC que se comunica con la tarjeta Arduino Mega 2560; el control del generador de pulsos del centro de  $\mu$ EDM, se explica a continuación.

Para el presente proyecto se requiere que tanto la duración como el ancho de pulsos a la carga y a la descarga tengan el mismo valor; con la finalidad de producir pulsos simétricos.

El proceso de  $\mu$ EDM requiere valores para el período que se encuentren entre un rango de 10 – 100  $\mu$ s (ver figura 34) de acuerdo a la bibliografía consultada [22].

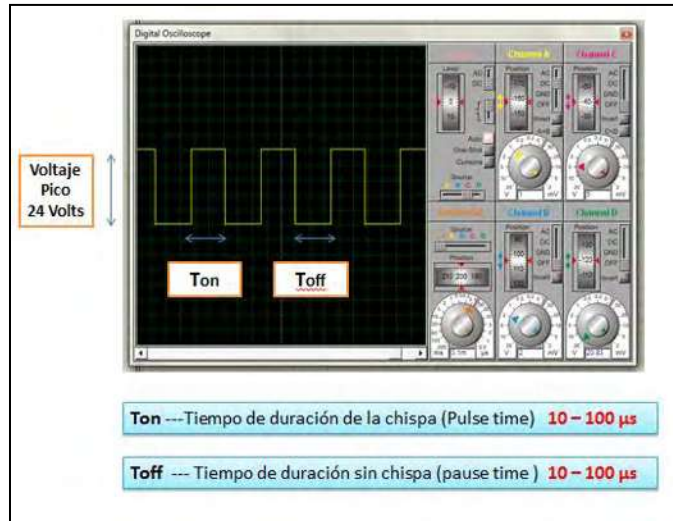


Fig 34. Propiedades de los pulsos para el proceso de  $\mu$ EDM.

### 3.1.1. COMPONENTES DEL GENERADOR DE PULSOS.

Para establecer el generador de pulsos del proceso de  $\mu$ EDM se requieren los siguientes componentes (ver figura 35):

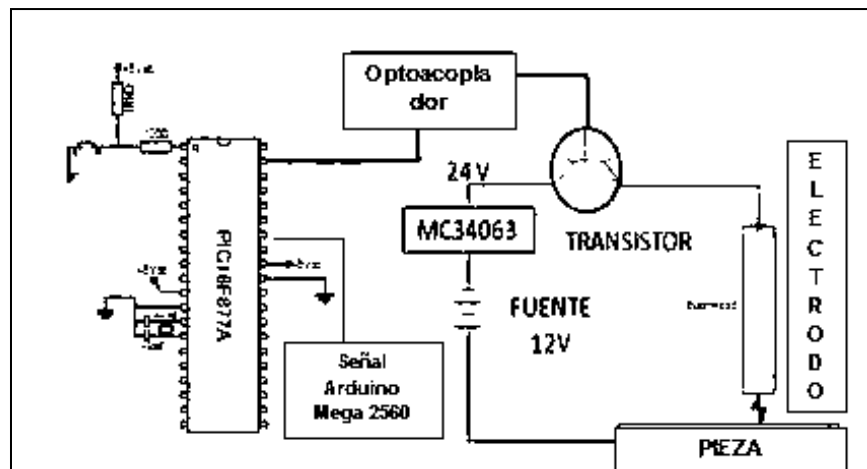


Fig 35. Generador de pulsos proceso  $\mu$ EDM.

- PIC16F877A
- Optoacoplador 4N32
- Circuito MC34063
- Transistor
- Fuente de 12 V

## Pic 16F877A

El PIC utilizado tiene la función de generar los pulsos con la frecuencia requerida, esto se obtiene mediante la programación del PIC en lenguaje ensamblador mediante el software MPLAB IDE V8.0 (ver figura 36).

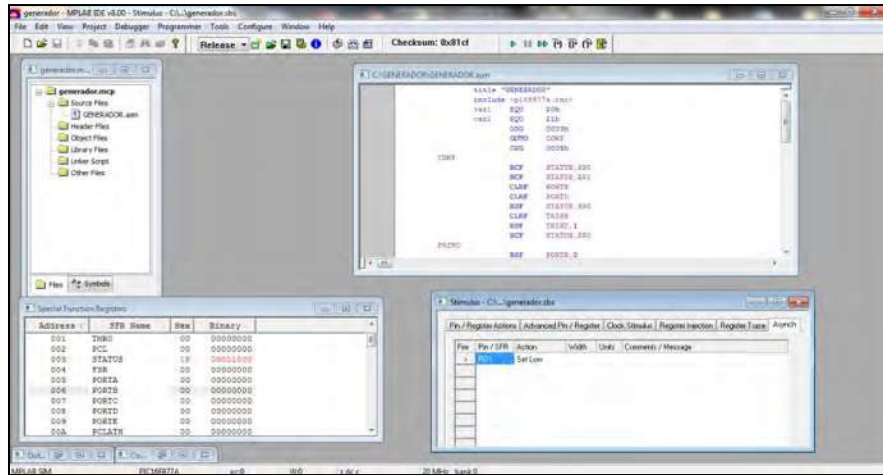


Fig 36. Software MPLAB IDE V8.0 para la programación del PIC 16F877A

En el generador de pulsos se colocó un cristal de cuarzo de 4 MHz. El PIC almacena la información en ciclos simples de tiempo, un total de 4 completan un ciclo de operación que es el necesario para que el PIC ejecute una instrucción; con estos datos se obtiene el periodo de tiempo que dura cada ciclo de operación mediante la siguiente ecuación (ver ecuación 1) [23].

$$T_{CO} = 4(CS)(1/f_Q) \quad 1$$

$$T_{CO} = 4(1) \left( \frac{1}{4 * 10^6 \text{ Hz}} \right) = 1 * 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{ciclo}} = \mathbf{1 \mu\text{s/ciclo}}$$

CS - Ciclo simple

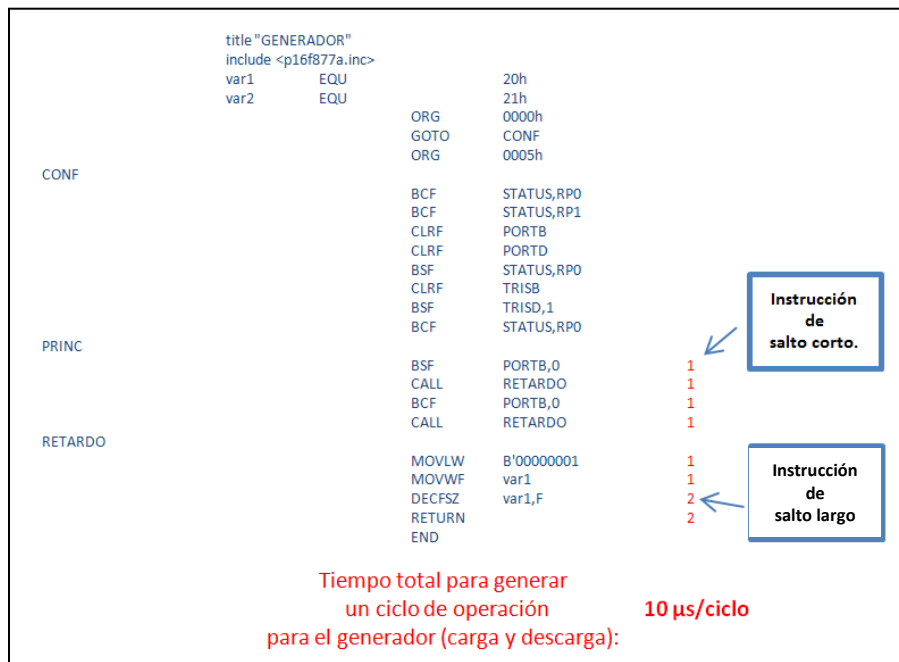
$T_{CO}$  –Período ciclo de operación.

$f_Q$  – Frecuencia del cristal de cuarzo

El PIC maneja instrucciones de salto corto (requieren un ciclo de operación) y de salto largo (requieren 2 ciclos de operación), de acuerdo al cristal de cuarzo que tenga el PIC cada una de estas 2 instrucciones tienen una determinada duración.

Para este proyecto con un cristal de cuarzo de 4 MHz, una instrucción de salto corto y una de salto largo requieren períodos de tiempo de 1 y 2  $\mu$ s respectivamente.

Estos datos son necesarios para obtener el período de tiempo para generar los pulsos en el centro de  $\mu$ EDM [24], de acuerdo al programa que es cargado al PIC 16F877A (ver figura 37).



**Fig 37. Programa del PIC16F877A y el periodo de tiempo de un ciclo de operación para el generador.**

Realizando una suma aritmética se obtiene el periodo de tiempo para un ciclo de operación del generador con un valor de 10  $\mu$ s.

### Optoacoplador 4N32

Este dispositivo electrónico es utilizado para la protección del PIC. Ya que basa su funcionamiento en el empleo de un haz de radiación luminosa para pasar señales de un circuito a otro sin conexión eléctrica (ver figura 38), y con ello proteger al PIC de un corto circuito o una sobrecarga eléctrica que pudiera dañarlo.

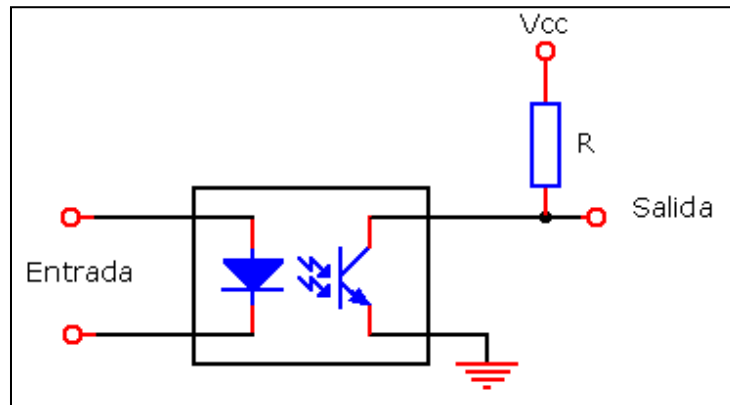


Fig 38. Diagrama electrónico optoacoplador 4N32.

### Circuito MC34063

El circuito electrónico MC34063 se utilizó como duplicador de voltaje, de acuerdo a las necesidades del proyecto; este circuito fue utilizado para duplicar el voltaje de 12 volts DC de la fuente de alimentación a 24 volts DC ya que el proceso de micromaquinado por electroerosión se obtiene utilizando voltajes que oscilan entre 12 y 40 volts; con esto, el centro de  $\mu$ EDM se definió utilizando un voltaje de 24 volts.

Se utilizó el software Proteus Isis Professional 7, con el objetivo de diseñar el diagrama electrónico con la tarjeta MC34062 para la obtención de los 24 volts que se necesitan para la generación de los pulsos eléctricos (ver figura 39).

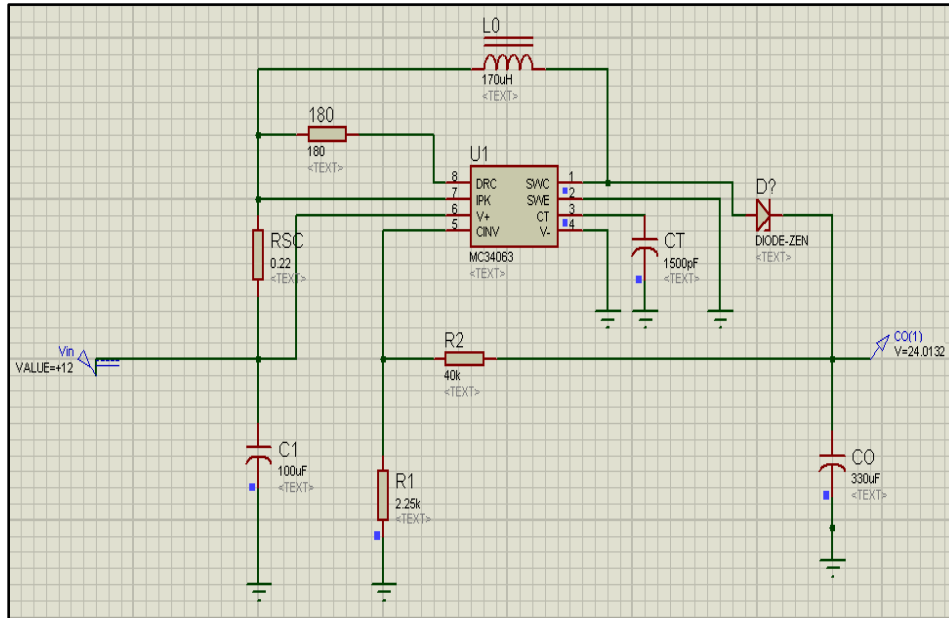


Fig 39. Diagrama electrónico del MC34062 para duplicar el voltaje de 12 – 24 volts.

Fue necesario calcular los componentes electrónicos requeridos en el diagrama de la figura 6 tales como:  $C_0$ ,  $C_T$ ,  $R_{SC}$ , entre otros para el adecuado funcionamiento del circuito MC34063, estos valores fueron obtenidos por medio de las ecuaciones [23] de la tabla 4.

Tabla 4. Ecuaciones de cálculo de los componentes electrónicos del diagrama de la figura 37.

Calculation	Step-Up	Step-Down	Voltage-Inverting
$t_{on}/t_{off}$	$\frac{V_{out} + V_F - V_{in(min)}}{V_{in(min)} - V_{sat}}$	$\frac{V_{out} + V_F}{V_{in(min)} - V_{sat} - V_{out}}$	$\frac{ V_{out}  + V_F}{V_{in} - V_{sat}}$
$(t_{on} + t_{off})$	$\frac{1}{f}$	$\frac{1}{f}$	$\frac{1}{f}$
$t_{off}$	$\frac{t_{on} + t_{off}}{\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1}$	$\frac{t_{on} + t_{off}}{\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1}$	$\frac{t_{on} + t_{off}}{\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1}$
$t_{on}$	$(t_{on} + t_{off}) - t_{off}$	$(t_{on} + t_{off}) - t_{off}$	$(t_{on} + t_{off}) - t_{off}$
$C_T$	$4.0 \times 10^{-5} t_{on}$	$4.0 \times 10^{-5} t_{on}$	$4.0 \times 10^{-5} t_{on}$
$I_{pk( switch )}$	$2I_{out(max)} \left( \frac{t_{on}}{t_{off}} + 1 \right)$	$2I_{out(max)}$	$2I_{out(max)} \left( \frac{t_{on}}{t_{off}} + 1 \right)$
$F_{eo}$	$0.3/I_{pk( switch )}$	$0.3/I_{pk( switch )}$	$0.3/I_{pk( switch )}$
$L_{(min)}$	$\left( \frac{V_{in(min)} - V_{sat}}{I_{pk( switch )}} \right) t_{on(max)}$	$\left( \frac{V_{in(min)} - V_{sat} - V_{out}}{I_{pk( switch )}} \right) t_{on(max)}$	$\left( \frac{V_{in(min)} - V_{sat}}{I_{pk( switch )}} \right) t_{on(max)}$
$C_0$	$9 \frac{I_{out} t_{on}}{V_{ripple(pp)}}$	$\frac{I_{pk( switch )} (t_{on} + t_{off})}{8V_{ripple(pp)}}$	$9 \frac{I_{out} t_{on}}{V_{ripple(pp)}}$

## Transistor NPN

Este dispositivo es utilizado para separar el voltaje de control (PIC, optoacoplador) con el voltaje de maquinado producido en el circuito MC34063 de 24 Volts, y evitar posibles sobrecargas que pudieran dañar los circuitos de control (ver figura 40).

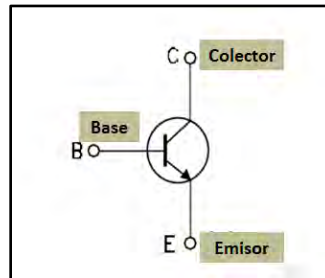


Fig 40. Diagrama electrónico transistor NPN.

En este caso el transistor es utilizado como interruptor para el circuito MC34063 para llevar a cabo la generación de los pulsos con el voltaje (24 V) y ancho de pulso adecuado (10  $\mu$ s).

### 3.1.2. CONFIGURACIÓN FINAL DEL GENERADOR DE PULSOS.

La configuración final del generador de pulsos se obtiene vinculando el Arduino Mega 2560 con el PIC 16F877A del generador de pulsos (ver figura 41).

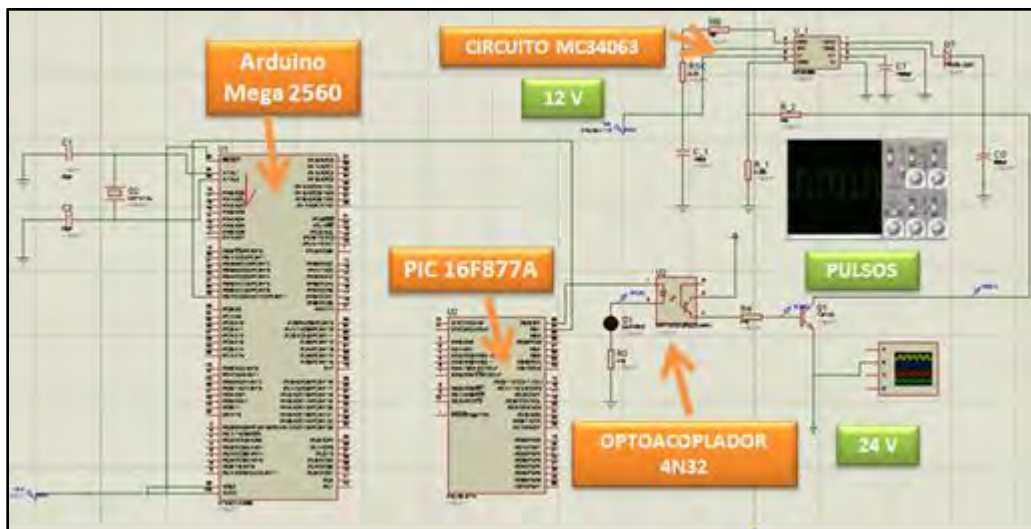


Fig 41. Diagrama electrónico en el software Proteus Isis Professional 7 de la configuración final del generador de pulsos.

En la figura anterior se muestra la simulación del generador de pulsos en el software ISIS PROTEUS 7 con la finalidad de comprobar su adecuado funcionamiento; posteriormente se construyó físicamente (ver figura 42).

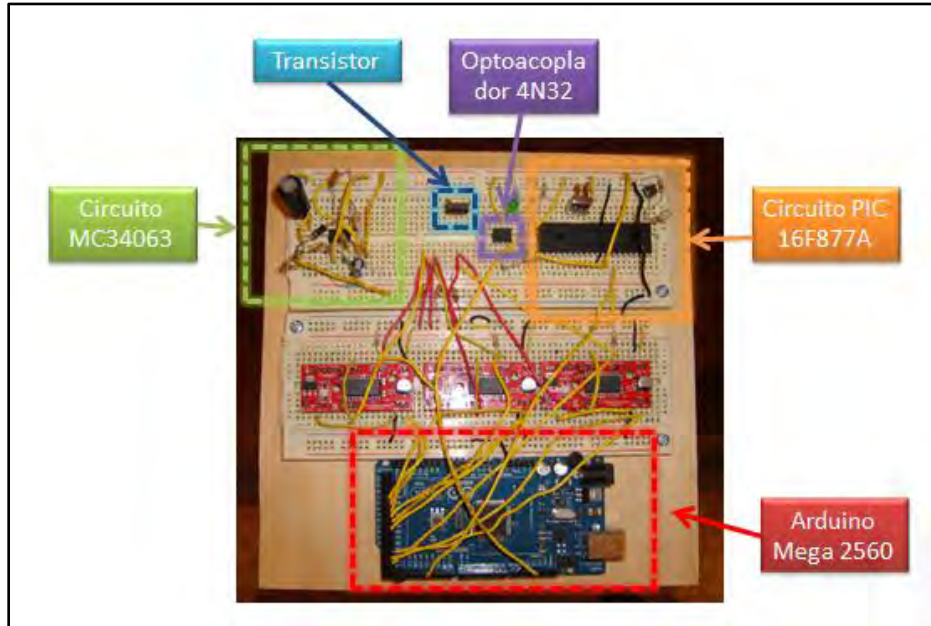


Fig 42. Construcción física del diagrama electrónico simulado en el software Proteus Isis Professional para configurar el generador de pulsos.

## 3.2. SISTEMA DE CIRCULACIÓN DEL MEDIO DIELECTRICO.

### 3.2.1. EL FLUIDO DIELECTRICO

El proceso EDM requiere que para ser llevado a cabo exista ausencia de oxígeno para que el proceso pueda ser controlado y se evite la oxidación. Si la oxidación ocurre, la superficie de la pieza de trabajo será pobre conductivamente obstaculizando el proceso de maquinado [24].

Propiedades del fluido dieléctrico.

- Los fluidos dieléctricos poseen una alta resistencia a la oxidación
- Poseen alta estabilidad química.
- Poseen buenas propiedades refrigerantes debido a su baja viscosidad, lo cual le facilita la transferencia del calor para el proceso EDM.

El proceso EDM requiere de un fluido dieléctrico que tenga una resistencia dieléctrica suficiente para que el proceso eléctricamente pueda ser controlado y al mismo tiempo ionizar cuando los electrones colapsen con sus moléculas, además durante la generación de las chispas eléctricas éste debe ser térmicamente resistente [25].

El fluido dieléctrico [*Ver apéndice III*] debe tener las siguientes funciones:

- Ayudar a iniciar la descarga sirviendo como medio conductor, permitir la formación de arcos y concentrar esta energía en una región muy estrecha.
- Refrigerar la pieza de trabajo, el electrodo.
- Arrastrar el metal erosionado (flushing).

### **3.2.2. CONFIGURACIÓN SISTEMA DE CIRCULACIÓN DEL MEDIO DIELECTRICO.**

El fluido dieléctrico realiza una función muy importante que es la de evacuar los residuos de la erosión provenientes del material arrancado a la pieza y el perdido por el electrodo.

De acuerdo a la bibliografía consultada, la presencia de residuos de erosión en suspensión en el fluido dieléctrico da lugar a efectos de índole negativa como pueden ser:

- ✚ Una disminución de la capacidad de arranque.
- ✚ Una mayor propensión a la generación de arcos eléctricos ramificados.
- ✚ Una mayor posibilidad de generación de descargas parásitas que pueden dañar a la precisión de la pieza.

Para evitar todos estos efectos negativos se hace necesario un sistema que permita la circulación del líquido dieléctrico por el área de trabajo para favorecer la evacuación de los residuos de la erosión, y sobre todo una unidad de filtrado que permita la separación de tales residuos del fluido dieléctrico [26].

Para el manejo del fluido dieléctrico en la plataforma de  $\mu$ EDM se requirió de los siguientes componentes:

- 2 Tanques de almacenamiento.
- Bomba de circulación.
- Filtro.
- Mangueras.

Los tanques de almacenamiento se diseñaron en el software SolidWorks 2012 (ver figura 43).

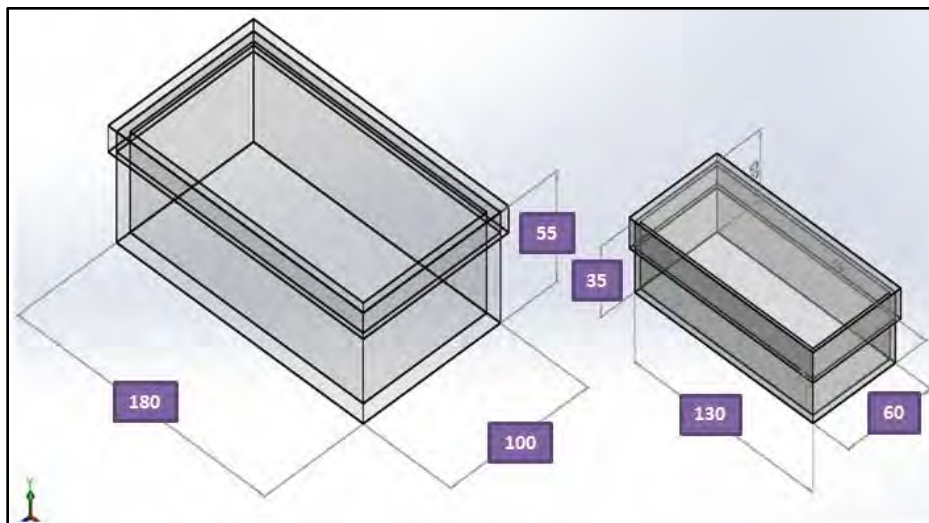
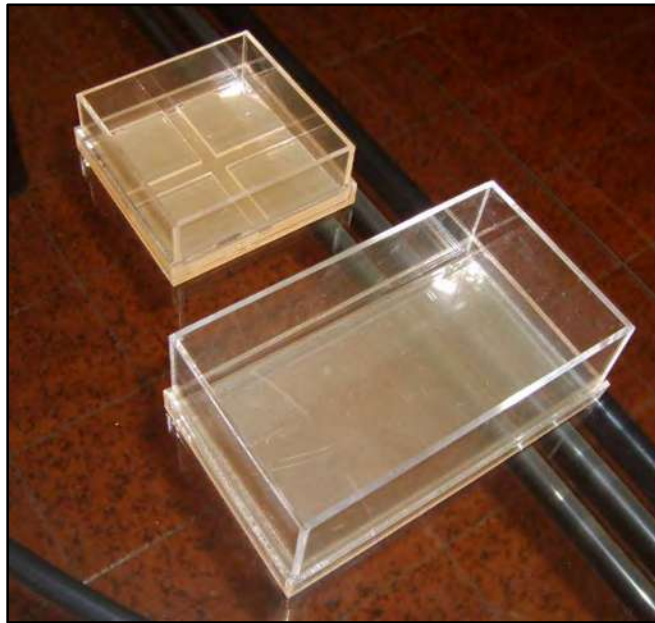


Fig 43. Tanques de almacenamiento para el sistema de circulación del fluido dieléctrico (dimensiones: mm).

Posteriormente las tinas se fabricaron utilizando como material base acrílico de espesor de 3 mm (ver figura 44).



**Fig 44. Tanques de almacenamiento hechos de acrílico.**

El tanque más grande se utilizó para colocar la bomba de circulación, mientras que el más pequeño para establecer el área de maquinado y en el colocar la pieza de trabajo a maquinar.

El sistema de circulación que se utilizó se observa en la figura 45, debido a que los tanques son de pequeñas dimensiones (0.99 L para el tanque de almacenamiento para la bomba y 0.2 L para el tanque de almacenamiento para la pieza) de acuerdo a estos datos se utilizó una bomba con un caudal de 150 L/hr (0.041 L/s) con una altura máxima de 30 cm.



Fig 45. Sistema de circulación de la plataforma de  $\mu$ EDM.

Existen diversos métodos para la limpieza del proceso EDM que tiene como objetivo, limpiar en el gap las impurezas que se producen durante la erosión.

Para la plataforma de  $\mu$ EDM se utilizó el método de limpieza por aspiración a través de la pieza, debido a que según la bibliografía consultada es el más adecuado para el proceso de micro-hole [27].

Este procedimiento consiste en succionar el dieléctrico, desde el tanque de trabajo, a través de la pieza por el sistema de sujeción de la pieza o vaso soporte (ver figura 46).

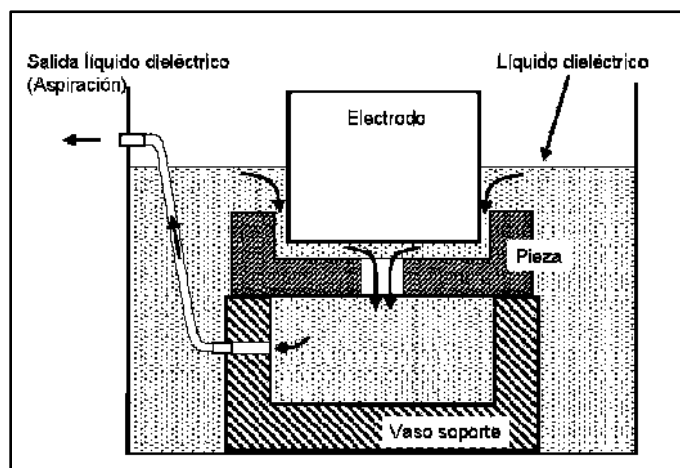


Fig 46. Limpieza por aspiración a través de la pieza [27].

El sistema de circulación del fluido dieléctrico se colocó de acuerdo a los parámetros del método de limpieza por aspiración a través de la pieza; así la configuración final quedo definida como se observa en la figura 47.

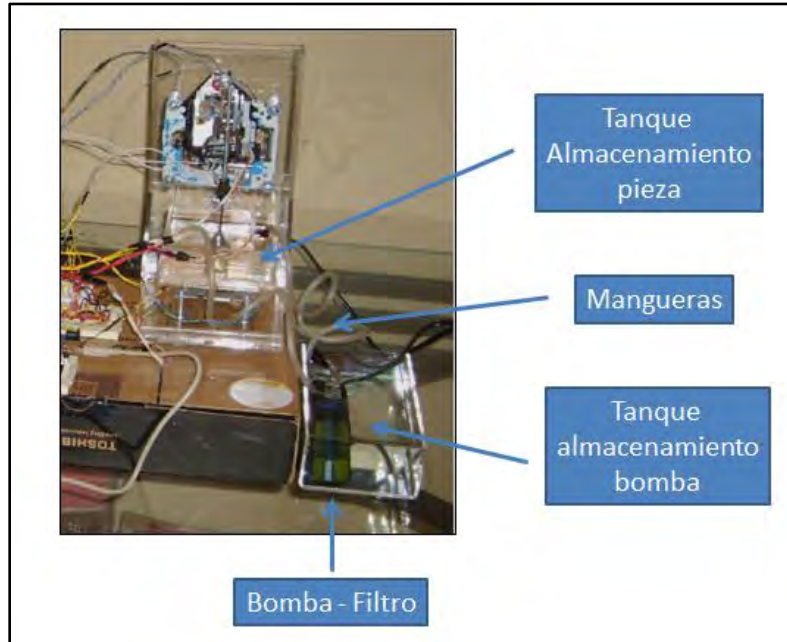


Fig 47. Configuración sistema de circulación para el fluido dieléctrico.

### 3.3. ELÉCTRODO PARA EL MECANIZADO.

#### 3.3.1. CARACTERÍSTICAS DEL ELÉCTRODO.

El material para el electrodo requiere que éste no experimente mucho desgaste cuando es afectado por cada descarga eléctrica.

Las características o los materiales básicos del electrodo son:

- Alta conductividad eléctrica.
- Alta conductividad térmica.
- Alto punto de fusión.
- Fácil manufacturabilidad.

A partir de estas características y de acuerdo a la bibliografía consultada los siguientes materiales son los que se usan comúnmente para el proceso de EDM [28]:

- Grafito
- Cobre
- Aleaciones de cobre.
- Latón

### 3.3.2. ELECTRODOS UTILIZADOS EN EL CENTRO DE $\mu$ EDM.

Los electrodos utilizados en el centro de  $\mu$ EDM son 3 tipos de alambre, dos de ellos son de latón pero de diferente fabricante y uno de molibdeno, sus características se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5. Características físicas de los electrodos utilizados en el centro de  $\mu$ EDM.**

		
<u>GF Agie Chermilles.</u> <b>Importador:</b> Prometal <b>D:</b> 0.25 mm <b>Resistencia a la tensión:</b> 900 N/ mm <sup>2</sup>	<u>Celectro</u> <b>Importador:</b> Nancobre <b>D:</b> 0.25 mm <b>Resistencia a la tensión:</b> 970 N/ mm <sup>2</sup>	<u>Changkai Industrial</u> <b>D:</b> 0.18 mm

Este tipo de electrodo fue utilizado debido a que usando este tipo de alambres se obtuvo uno de los alcances del proyecto que era obtener el proceso de Micro-Hole por electroerosión.

**CAPÍTULO IV.  
PROGRAMACIÓN DEL CENTRO  
DEL CENTRO DE  
MICROMAQUINADO POR  
ELECTROEROSIÓN ( $\mu$ EDM).**

## CAPÍTULO IV. PROGRAMACIÓN DEL CENTRO DE MICROMAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN ( $\mu$ EDM).

### 4.1. IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ CAM ENTRE EL CENTRO DE MICROMAQUINADO EDM Y LA COMPUTADORA.

El control del posicionamiento del centro de  $\mu$ EDM mediante la computadora se obtuvo implementando la interfaz para CAM, mediante el siguiente diagrama de flujo (ver figura 48)



Fig 48. Diagrama de flujo para la implementación de la interfaz CAM.

Para la implementación de la interfaz CAM, se necesita de una rutina o firmware adecuada (ver figura 49) previamente cargada en la tarjeta Arduino Mega 2560.

Este firmware es un programa que realiza la función de intérprete ya que es lo que permite reconocer los códigos G y M que envía la interfaz a ordenes de posicionamiento para cada eje y con ello controlar el proceso de maquinado desde la interfaz CAM.



El programa permite visualizar la pieza de trabajo o probeta, que puede ser dibujada previamente en cualquier programa de CAD (en este proyecto las piezas de trabajo o probetas serán dibujadas en el Software Solidworks) con la geometría deseada.

El dibujo de CAD debe ser guardado en formato STL en el programa de CAD para que sea reconocido por el programa *Repsnapper*.

A partir de la geometría deseada hecha en CAD el Repsnapper genera el código de maquinado G y M de la pieza para que finalmente estos códigos sean enviados a la tarjeta Arduino Mega 2560 e inicie el proceso de  $\mu$ EDM.

**CAPÍTULO V.**

**CONFIGURACIÓN DEL CENTRO  
DE MICROMAQUINADO POR  
ELECTROEROSIÓN ( $\mu$ EDM).**

## CAPÍTULO V. CONFIGURACIÓN DEL CENTRO DE MICROMAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN ( $\mu$ EDM).

Definido cada uno de los elementos de la plataforma base y los necesarios para el proceso EDM (ver figura 51) tales como: el sistema de posicionamiento, la interfaz CAM, el generador de pulsos, el sistema de circulación del fluido dieléctrico y el porta-electrodo, se procedió a realizar el ensamble de estos 5 elementos y poder establecer el centro de micromaquinado para EDM.



Fig 51. Elementos necesarios para la construcción del centro de  $\mu$ EDM.

### 5.1. ENSAMBLE PARA CONFIGURAR EL CENTRO DE MICROMAQUINADO PARA EDM.

En la figura 52 se muestran los componentes que se utilizaron para configurar el centro de  $\mu$ EDM.

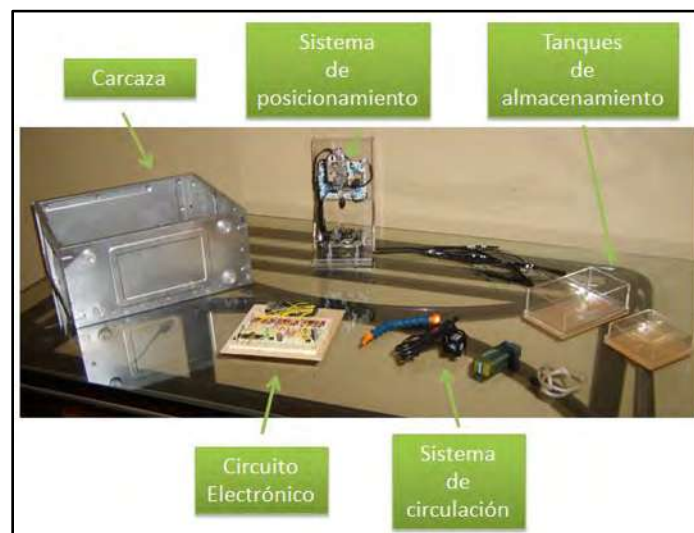


Fig 52. Componentes del centro de  $\mu$ EDM.

Dentro de la carcasa se colocaron el circuito electrónico (ver figura 53) y el tanque de almacenamiento para la bomba de circulación (ver figura 54).

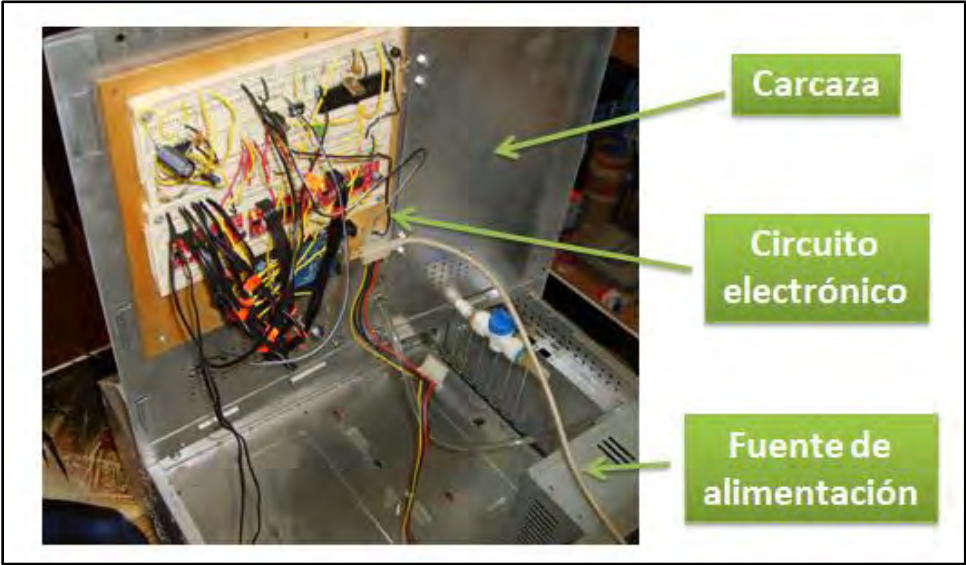


Fig 53. Montaje circuito electrónico.

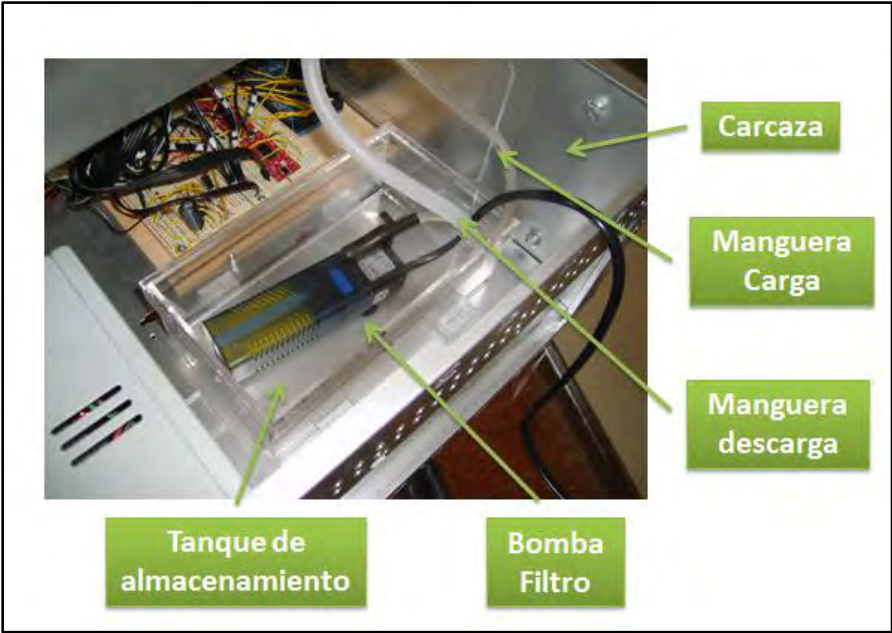


Fig 54. Montaje del sistema de circulación en la carcasa.

La segunda tina se colocó sobre el eje Y del sistema de posicionamiento (ver figura 55), se colocaron las mangueras de carga y descarga del fluido dieléctrico,

las terminales positiva (electrodo) y negativa (pieza) del generador de pulsos y se obtuvo la configuración final del centro de micromaquinado EDM (ver figura 56).

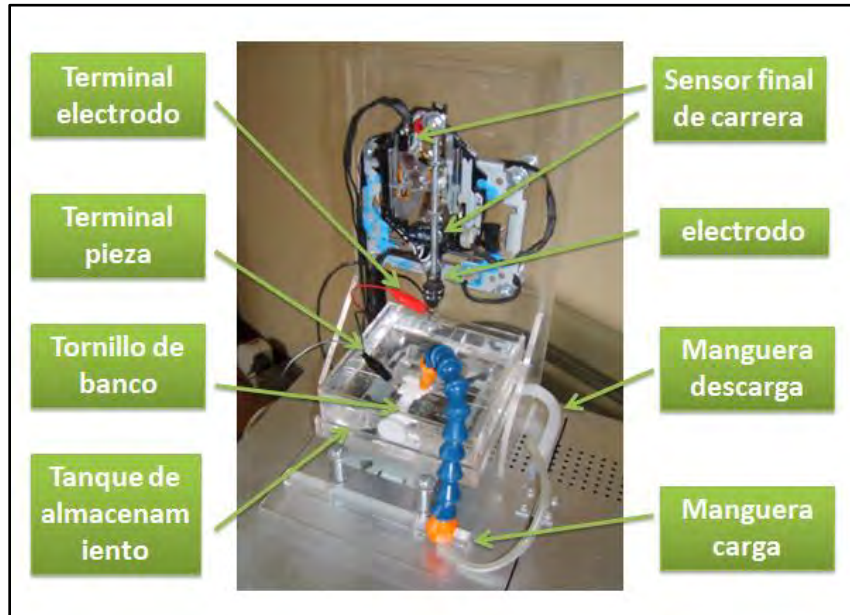


Fig 55. Montaje del sistema de circulación en el sistema de posicionamiento.

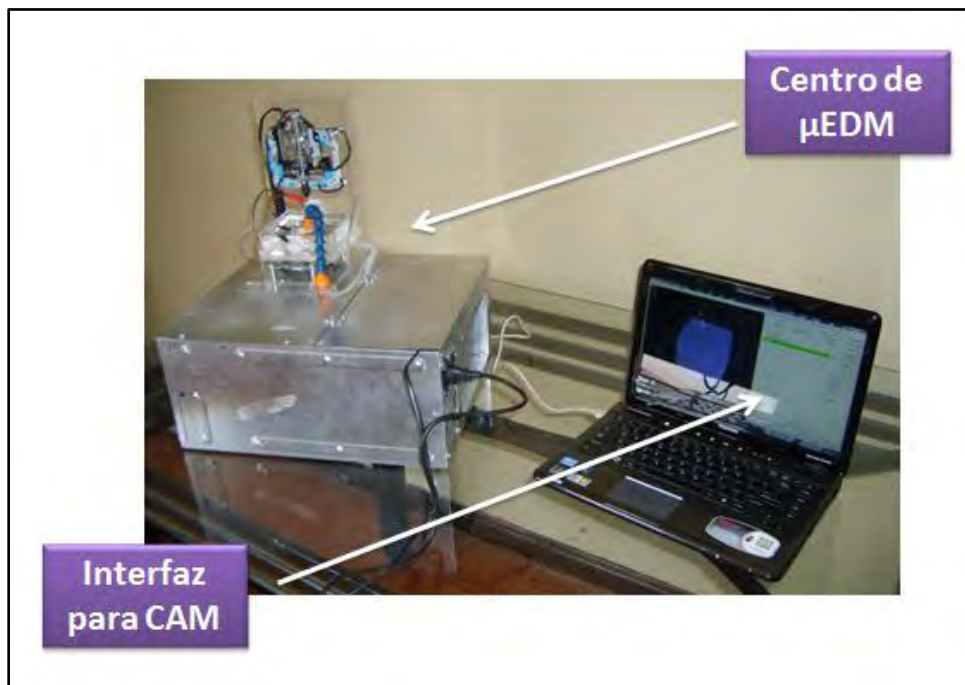


Fig 56. Configuración final del centro de micromaquinado EDM asistido por computadora.

## 5.2. MAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN MEDIANTE EL PROCESO DE MICRO-HOLE EN EL CENTRO DE MICROMAQUINADO $\mu$ EDM.

Establecida la configuración final del centro de  $\mu$ EDM, el enlace con la interfaz para CAM repsnapper para el posicionamiento del electrodo y utilizando los parámetros del generador de pulsos tales como:

- Voltaje utilizado: 24 volts
- Frecuencia de trabajo: 10  $\mu$ seg (100 KHz)
- Forma de onda: Simétrica

Se realizó el micromaquinado EDM sobre las probetas de material intermetálico Fe-Al (ver figura 57) mediante el proceso de Micro-Hole utilizando como electrodo los alambres de latón y molibdeno mostrados la tabla 3.

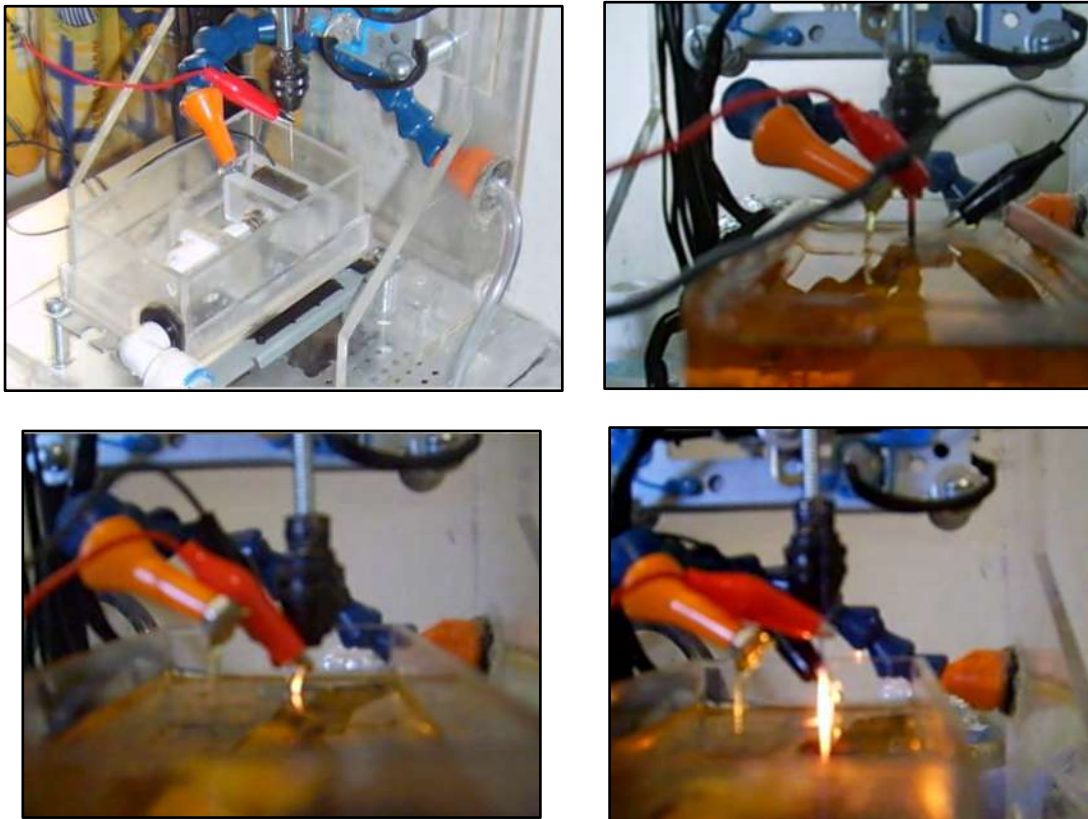


Fig 57. Proceso de maquinado por electroerosión de Micro-Hole en el centro de  $\mu$ EDM.

### 5.3. PRECISIÓN DEL CENTRO DE $\mu$ EDM.

Para tener un adecuado control del posicionamiento del electrodo se colocaron sensores de final de carrera (se pueden observar en las figuras 31 y 53) que permiten:

- Establecer un límite mínimo y máximo para cada eje, con esto se define la longitud de carrera de cada eje.
- Proporciona a la interfaz para CAM *repsnapper* una referencia que se conoce en control numérico como cero máquina que permite conocer en todo momento las coordenadas de cada posición del electrodo a lo largo de el área de trabajo del centro de micromaquinado.

En cuanto a la precisión de posicionamiento que tiene cada eje del centro de  $\mu$ EDM se determino de acuerdo a las características de 3 componentes:

- El motor a pasos del lector de Cd-Drive.
- La tarjeta controladora del motor Easy-Driver.
- La interfaz para CAM *repsnapper*.

La tarjeta Easy-Driver de acuerdo a la tabla I permite manejar desde 1 paso hasta 1/8 de paso para el movimiento de un motor de acuerdo a las combinaciones de MS1 y MS2 que se explico en el capítulo II; en el centro de maquinado  $\mu$ EDM se configuro cada Easy-Driver de cada eje con la combinación para MS1 y MS2 de 1/8 de paso, para obtener un movimiento milimétrico en los ejes X y Y y un movimiento micrométrico en el eje Z.

De acuerdo a las características del lector de cd-drive que se observan en la figura 13, la longitud de carrera de cada eje del sistema de posicionamiento es de 40 mm con una resolución de 1.3  $\mu$ m es decir que cada vuelta completa que da el motor a pasos, el tornillo micrométrico provoca que el lector de cd-drive se mueva 1.3  $\mu$ m axialmente.

En cuanto a la interfaz para CAM *repsnapper*, esta plataforma libre permite manipular el posicionamiento de cada eje de acuerdo al ambiente de programación que se presenta en la figura 58.

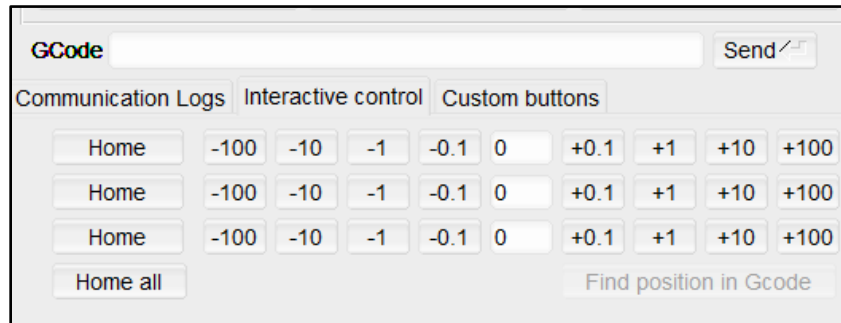


Fig 58. Ambiente de programación de la interfaz para CAM *repsnapper* para el posicionamiento del centro de  $\mu$ EDM.

Como se observa el programa *Repsnapper* manipula el posicionamiento de cada eje utilizando unidades que van desde 0.1, 1, 10 hasta 100.

Con esta configuración del programa *Repsnapper*, con la longitud de carrera de cada eje y los pasos del motor del lector de cd-drive; se programo el software *Repsnapper* para obtener la siguiente tabla.

Tabla 6. Precisión del centro de  $\mu$ EDM.

<b>Longitud de carrera de cada eje</b>	<b>40 mm</b>
<b>Tipo de paso</b>	<b>1/8</b>
<b>EJES X y Y</b>	
<b>200 unidades</b>	<b>40 mm</b>
<b>5 unidades</b>	<b>1 mm</b>
<b>0.1 unidades (mínimo)</b>	<b>100 <math>\mu</math>m</b>
<b>EJE Z</b>	
<b>260 unidades</b>	<b>40 mm</b>
<b>1 unidad</b>	<b>0.153 mm</b>
<b>0.1 unidades (mínimo)</b>	<b>15.3 <math>\mu</math>m</b>

**CAPÍTULO VI.**

**MATERIAL UTILIZADO EN EL  
CENTRO DE MICROMAQUINADO  
POR ELECTROEROSIÓN ( $\mu$ EDM).**

## **CAPÍTULO VI. MATERIAL UTILIZADO EN EL CENTRO DE MICROMAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN ( $\mu$ EDM).**

### **6.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL A MAQUINAR.**

El proceso de EDM (maquinado por electroerosión de electrodo) permite maquinar materiales de alta dureza y poca ductilidad pero que éstos sean eléctricamente conductores [30].

Debido al reciente desarrollo de los materiales intermetálicos principalmente en aplicaciones aeroespaciales y biomédicas, y buscando a un mediano plazo realizar investigaciones sobre este tipo de materiales por medio del Cuerpo Académico de Bioingeniería en el Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH, se decidió y aprobó para el maquinado de probetas en el centro de micromaquinado del presente proyecto, el uso de un material intermetálico de base Fe-Al.

Los materiales intermetálicos de base Fe-Al poseen inconvenientes al trabajarse en máquinas de arranque de viruta como: la escasa ductilidad y tenacidad a temperatura ambiente que poseen que elevan excesivamente su costo de maquinado. Por lo que aprovechando también propiedades como: una buena estabilidad estructural y buena resistencia a la oxidación a altas temperaturas; los convierten en materiales idóneos para ser maquinados en el proceso de electroerosión [31].

Para maquinar en el centro de  $\mu$ EDM del presente proyecto, se establecieron las probetas del material intermetálico Fe-Al mediante el siguiente proceso.

### **6.2. FUNDICIÓN DEL MATERIAL INTERMETÁLICO Fe-Al.**

Para establecer el material intermetálico a maquinar en el centro de  $\mu$ EDM del presente proyecto, se solicitó la asesoría del personal del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH.

En el Departamento de Metalurgia de dicho organismo se establecieron moldes de cobre (ver figura 59) para la obtención de 2 lingotes de material intermetálico.



**Fig 59. Moldes de cobre para la fundición del material intermetálico.**

Para este proyecto se utilizó el lingote donde se obtuvo un material intermetálico con 40 % de aluminio, 60 % de hierro y se adicionó un 0.5 % de plata (ver figura 60) para suavizar el tamaño de grano de la estructura cristalina del material.



**Fig 60. Fundición del material intermetálico Fe-Al.**

Una vez que se estableció el lingote de material intermetálico Fe-Al (ver figura 61) adicionado con 0.5 % de plata, se procedió a cortar probetas de 1 cm de largo y ancho.



Fig 61. Lingote obtenido en el proceso de fundición.

### 6.3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL INTERMETÁLICO DE BASE Fe-Al.

Obtenidas las probetas, estas se prepararon para realizar una caracterización y conocer la microestructura del material intermetálico Fe-Al obtenido. Las técnicas de análisis que se utilizaron para caracterizar el material obtenido fueron las siguientes.

- Análisis metalográfico por medio del microscopio electrónico de barrido.
- Microscopia óptica
- Difracción de rayos X.

De esta forma, estos estudios se realizaron para analizar el material intermetálico de base Fe-Al a un nivel microestructural, para obtener el tipo y orientación de la estructura cristalina, el tamaño de grano y su distribución; con la finalidad de conocer las características del material a maquinar bajo el proceso de electroerosión EDM de Micro-Hole.

#### 6.4. ESTUDIO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS-X

El estudio de difracción de rayos X (DRX) permite identificar las fases y estructura cristalinas de un material.

La difracción es un fenómeno característico que consiste en la dispersión de las ondas cuando interactúan con un objeto ordenado. Ocurre en todo tipo de ondas, desde las sonoras, hasta las ondas electromagnéticas como la luz, y también los rayos X.

Un experimento de difracción consiste en la irradiación con rayos X de los cristales que componen la estructura cristalina de un material, estos cristales dispersan los rayos X en unas direcciones determinadas, con intensidades que dependen de cómo se ordenan los átomos a nivel microscópico [32].

Si un haz de rayos X pasa a través de un conjunto de átomos, las cortezas electrónicas de los átomos interactúan con la onda incidente dispersándola mediante procesos elásticos e inelásticos. La mayor parte de la radiación es dispersada elásticamente formando el diagrama de difracción, cuyo estudio permite conocer la distribución de los átomos dispersores.

En general, el tipo de diagrama de difracción depende del tipo de estructura del compuesto (monoclínico, ortorrómbico, cúbico,...). Las posiciones de los máximos de difracción dependen de las distancias interplanares, es decir, de la posición de los átomos en la celda unidad y las intensidades de los máximos de difracción dependen de la naturaleza química de los átomos (o número de electrones de la corteza) [33].

Con esta información, dirección e intensidad de cada rayo, se obtiene el difractograma del material que define la estructura molecular del material.

De acuerdo a este difractograma obtenido se relacionan las propiedades de ese material con la estructura determinada.

### 6.4.1. ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS-X DEL MATERIAL INTERMETÁLICO DE BASE Fe-Al.

El difractograma del material intermetálico Fe-Al antes de maquinarse se muestra a continuación (ver figura 62).

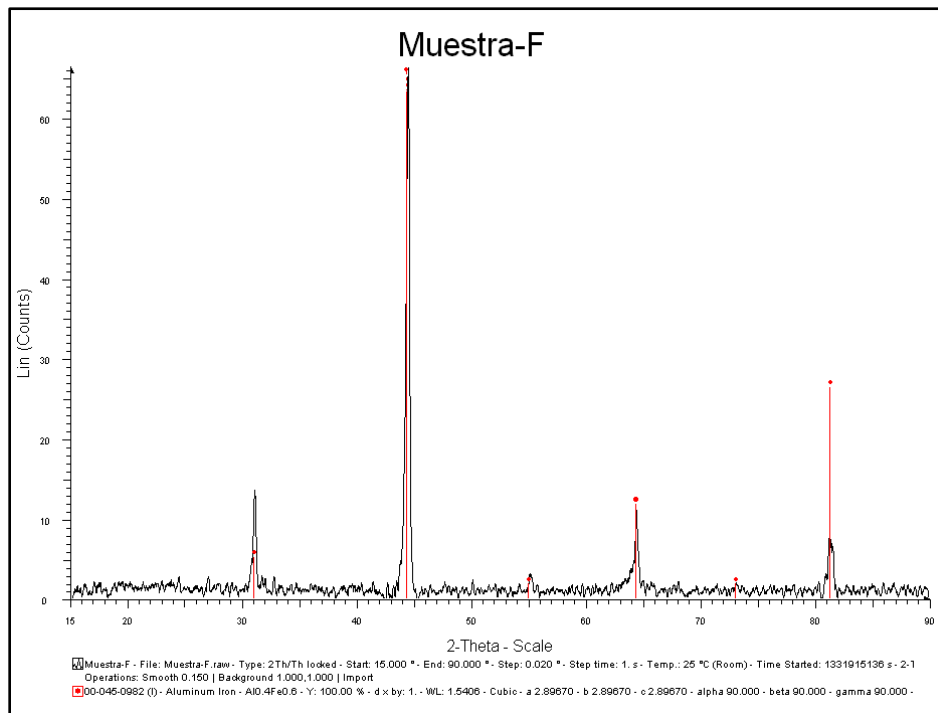


Fig 62. Difractograma del material intermetálico Fe-Al antes de maquinarse en el centro de  $\mu$ EDM

Las conclusiones más importantes de este análisis para el material intermetálico antes de maquinarse son:

- ✚ El material intermetálico tiene una estructura cristalina cúbica.
- ✚ Los picos de la gráfica junto con el eje de las abscisas  $2\theta$  muestran la ubicación de la orientación de la estructura cristalina del material intermetálico.
- ✚ El análisis muestra que el material intermetálico tiene una composición de 0.4 Al y 0.6 de Fe.

## **6.5. ANÁLISIS METALOGRÁFICO POR MEDIO DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.**

El objetivo de la preparación de una muestra de metalografía es la revelación de la estructura verdadera, que es aquella que no tiene deformaciones, rayas, arranques de material, elementos extraños, aplastamientos, relieves, bordes redondeados y daños térmicos. Esto se logra con la realización de un método sistemático de preparación.

### **6.5.1. MÉTODO DE PREPARACIÓN DE LA PROBETA.**

El método de preparación de las probetas para el análisis metalográfico tiene las siguientes etapas.

- ✓ Selección y extracción
- ✓ Esmerilado grueso - fino
- ✓ Pulido final.
- ✓ Ataque químico

#### Selección Y Extracción:

Hay veces que una vez recibido el material es necesario seccionarlo o cortarlo en una forma determinada. Se trata de lograr superficies planas con la menor deformación posible, en este caso se cortaron probetas cuadradas de 1 cm<sup>2</sup>.

#### Esmerilado Grueso:

Su objetivo es eliminar la superficie de la muestra que fue deformada por el proceso anterior y lograr un solo plano de pulido para las etapas posteriores. Se utilizan abrasivos de grano grueso (80 - 320), discos o papeles abrasivos al agua (ver figura 63).



Fig 63. Papel para esmerilado manual.

### Esmerilado Fino:

Es la etapa final del esmerilado. El procedimiento es igual al anterior pero con papeles (400 a 1200) o diamante en pasta desde 3 a 0,25 micrones.

### Pulido Mecánico:

Se utiliza para lograr una eliminación efectiva y rápida de material. Se obtienen los mejores resultados en cuanto a planitud. Se realiza en paños especiales colocados en platos giratorios (ver figura 64). Se debe utilizar lubricante (etilenglicol).

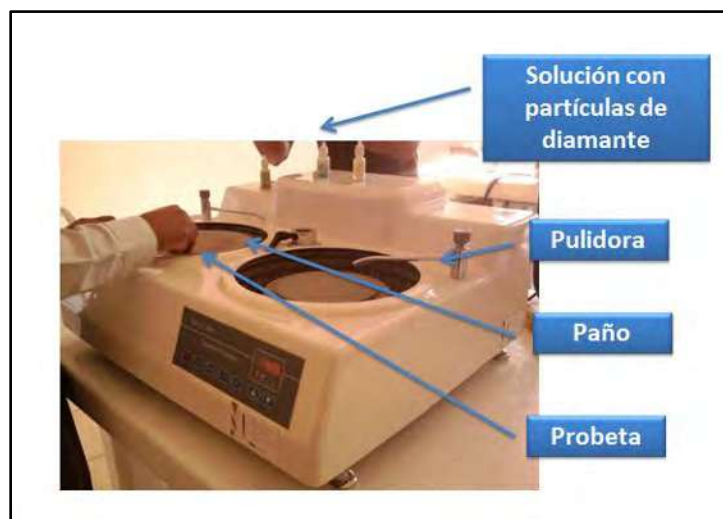


Fig 64. Proceso de pulido.

### 6.5.2. ATAQUE QUÍMICO DE LA PROBETA.

Todo el material distorsionado resultante de los pasos de la preparación debe ser completamente removido de la superficie antes de observar la muestra bajo el microscopio electrónico de barrido.

El ataque se realiza sumergiendo la muestra metálica pulida en una solución ácida o básica débil que ataca a la superficie a una velocidad que varía con la orientación cristalina de la misma.

Como los cristales de un metal tienen usualmente distintas orientaciones, los cristales adyacentes se disuelven por la solución de ataque a diferentes profundidades, produciendo el efecto de altiplano.

Después del ataque las interacciones de los límites de grano atacados en la superficie, quedan marcados por una red de escarpaduras poco profundas.

El reactivo utilizado para el ataque químico de la probeta de material intermetálico fue un compuesto llamado Keller con la siguiente composición química:

- 0.3 ml de HF
- 0.6 ml de HCl
- 0.75 ml de HNO<sub>3</sub>
- 28.5 ml de agua

La probeta utilizada para esta prueba se observa en la figura 65. Esta probeta se analizó antes y después del mecanizado EDM en el microscopio electrónico de barrido del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH.



Fig 65. Probeta atacada de material intermetálico Fe-Al. Dimensiones 1 X 1 cm.

### 6.5.3. ANÁLISIS METALGRÁFICO DEL MATERIAL INTERMETÁLICO DE BASE Fe-Al.

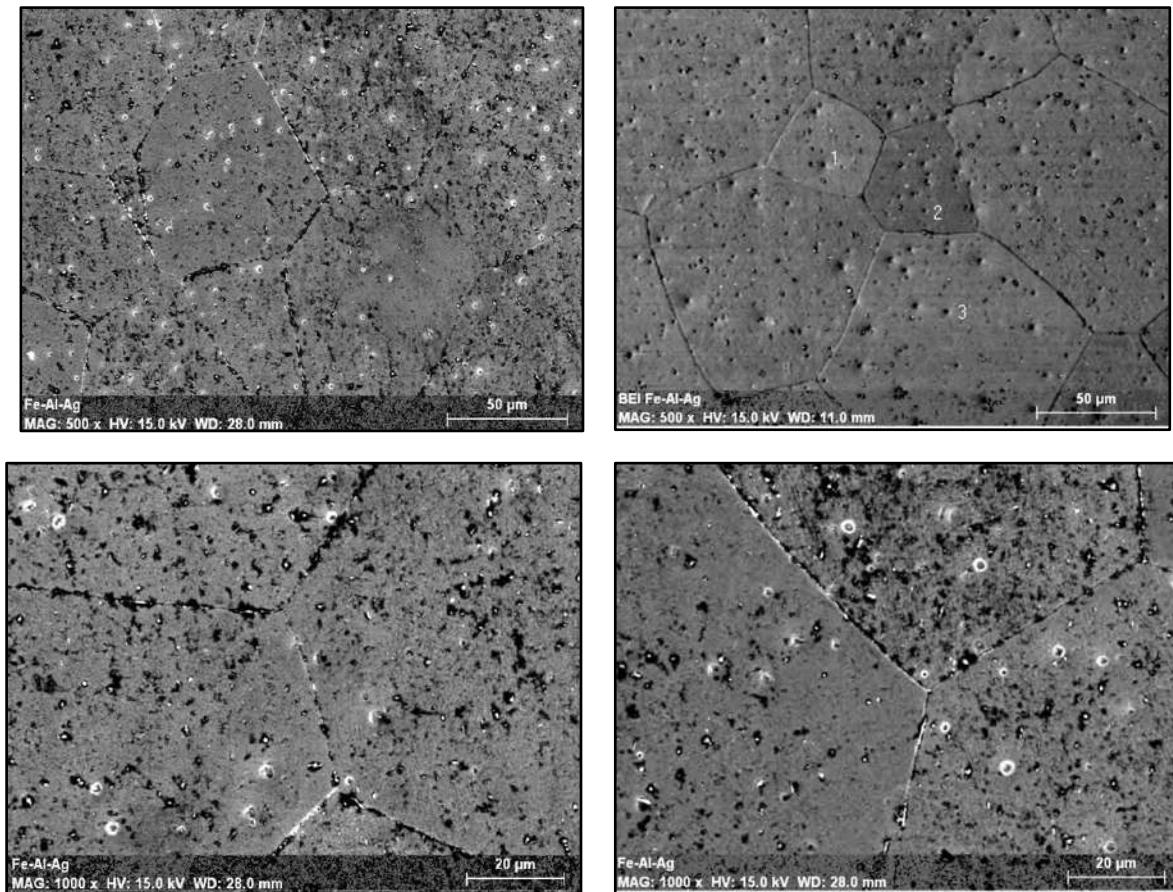


Fig 66. Imágenes del material intermetálico obtenidas en el microscopio electrónico de barrido.

En las imágenes mostradas anteriormente se observa la distribución del tamaño de grano del material intermetálico antes de maquinar, estas imágenes nos aportan algunas características del material intermetálico de base Fe-Al usado.

- ✚ La distribución del tamaño de grano es equiaxial, es decir que el grano del material intermetálico mantiene un tamaño uniforme a lo largo de toda la distribución.
- ✚ El tamaño de grano en promedio es de aproximadamente 200 micras a lo largo de la distribución.
- ✚ Los brillos que presenta la imagen pueden tratarse de precipitados de plata, ya que fue el último material en agregarse en la fundición; lo que nos da como

conclusión que este elemento pasó a formar parte de la estructura cristalina del material obteniéndose un material intermetálico de base Fe-Al-Ag

La adición de la plata permitió obtener una mayor uniformidad en la distribución del tamaño de grano, como se tenía previsto, ya que se compararon con imágenes de otro lingote donde no se utilizó plata y se obtuvo un tamaño de grano más grande y no tan uniforme.

## 6.6. ANÁLISIS MEDIANTE EL MICROSCOPIO ÓPTICO DE LAS PROBETAS MAQUINADAS EN EL CENTRO DE $\mu$ EDM.

El análisis de las características físicas de los cráteres obtenidos en el centro de  $\mu$ EDM se realizó utilizando un microscopio óptico (ver figura 67).

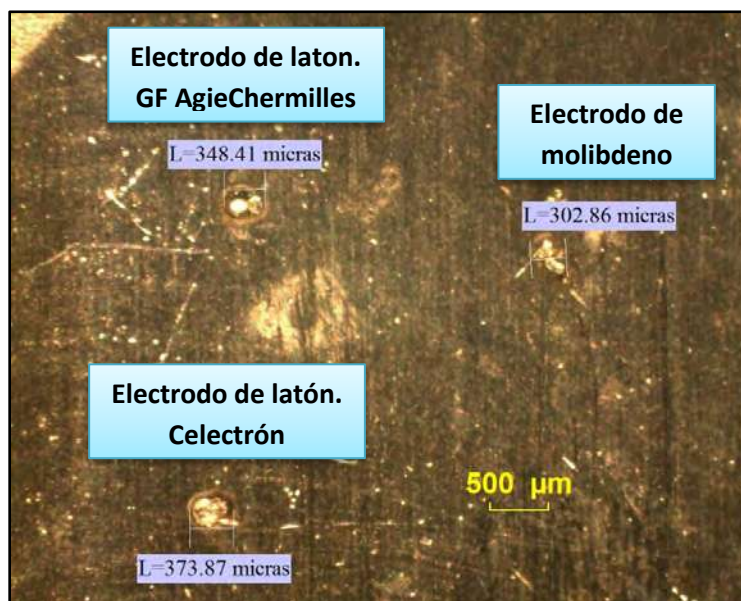
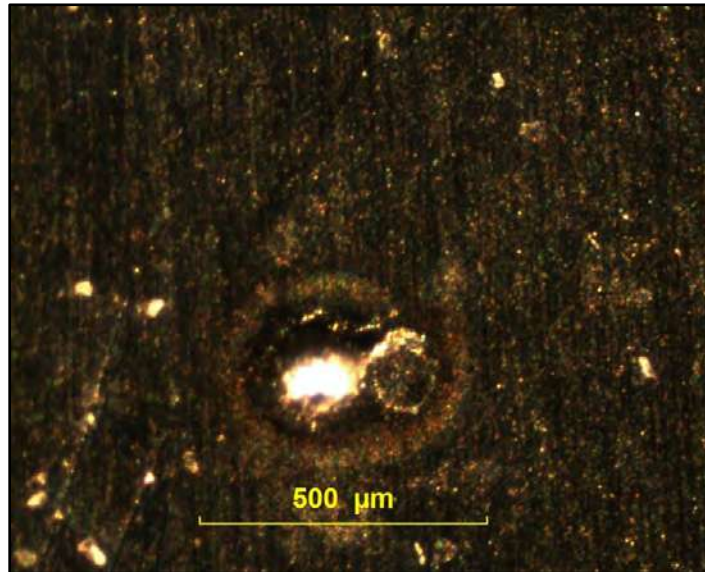


Fig 67. Imagen obtenida en el microscopio óptico de los cráteres hechos por los electrodos de latón y molibdeno en el centro de  $\mu$ EDM.

En la imagen mostrada se observan los cráteres producidos por los electrodos utilizados en el centro de  $\mu$ EDM (ver tabla 3) estos cráteres se realizaron con una separación entre ellos de 3000  $\mu$ m (3 mm).

Como se observa los cráteres obtenidos presentan una forma uniforme o regular (ver figura 68).



**Fig 68. Crater producido por el electrodo de laton de la marca GF Agie Chermilles.**

El electrodo que se utilizó para obtener el micro-hole o cráter de la figura 65 fue el de latón de la marca GF Agie Chermilles, este electrodo tiene un diámetro de 250  $\mu\text{m}$ ; como se observa en la figura 64 el diámetro del micro-hole producido por este electrodo es de 348.41  $\mu\text{m}$  esta variación entre el diámetro del electrodo y el micro-hole obtenido es debido al desgaste o erosión provocado por el proceso de EDM del centro de micromaquinado, de acuerdo a esto se observa que hay pérdida de precisión en centro de  $\mu\text{EDM}$  debido principalmente a la falta de control del GAP (distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo en el proceso de electroerosión) quedando esto como trabajo a desarrollar para el perfeccionamiento de la precisión en el maquinado  $\mu\text{EDM}$ .

# **CAPÍTULO VII**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 7.1. CONCLUSIONES.

De acuerdo a lo que se discutió en los capítulos anteriores y a los resultados del proyecto se establecieron las siguientes conclusiones:

- 1) Se obtuvo un primer prototipo de este centro de micromaquinado EDM conjuntado 5 elementos: El generador de pulsos, el sistema de posicionamiento, el sistema de circulación del medio dieléctrico, el porta-electrodo y la interfaz para CAM
- 2) Se realizó el enlace del centro de micromaquinado EDM con la interfaz para CAM *Repsnapper*, de esta manera, obtener la precisión que se requería para obtener el proceso de electroerosión de electrodo EDM.
- 3) El centro de micromaquinado EDM presentado cumplió con el objetivo principal que era realizar u obtener el maquinado por electroerosión de electrodo bajo el proceso de micro-hole sobre un material eléctricamente conductor.
- 4) El proceso de electroerosión de electrodo de este centro de maquinado funcionó con los parámetros que se definieron en este proyecto tales como: la corriente de trabajo, el voltaje de trabajo y la frecuencia de generación de pulsos.
- 5) Con el proceso de electroerosión obtenido bajo los parámetros que se mencionaron se obtuvieron cráteres o agujeros sobre un material intermetálico de base Fe-Al; para iniciar la fase de investigación sobre el comportamiento que sufren este tipo de materiales bajo este tipo de maquinados a un nivel microestructural.

## 7.2. APORTACIONES AL CONOCIMIENTO.

Las aportaciones que realiza este proyecto al conocimiento se recapitulan a continuación:

- 1) Con este centro de  $\mu$ EDM se pudo entender, conocer y manipular el proceso de electroerosión de electrodo para divulgarlo a nivel nacional mediante la publicación de artículos y asistencia a congresos, ya que el proceso de electroerosión en los últimos años está sustituyendo a los procesos de maquinado convencionales como el fresado o el torneado debido a que permite maquinar de forma más rápida y eficiente materiales de alta fragilidad, poca ductilidad y alta dureza en algunas regiones del planeta (USA, Europa).
- 2) Es posible diseñar y configurar un centro de maquinado que utilice un proceso de maquinado no convencional como el proceso de electroerosión que permita realizar maquinados con una precisión de micras; la aportación en este caso es a un nivel regional, ya que en la zona no existen máquinas que permitan obtener maquinados con este nivel de precisión.
- 3) Utilizando software libre como el software *repsnapper*, *Arduino* y desarrollos electrónicos como *Easy-Driver* y *Arduino* se puede obtener con un bajo costo el control de máquinas que posteriormente pueden configurarse como fresadoras, cortadoras laser, de inyección de plástico o como en nuestro caso máquinas de electroerosión.
- 4) Con el centro de micromaquinado EDM se establece que el proceso de micromaquinado de electroerosión puede obtener geometrías o probetas (utilizando como piezas de trabajo materiales eléctricamente conductores) que pueden posteriormente ser usadas en estudios de biomecánica del Cuerpo Académico de Bioingeniería de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH.
- 5) Establecer una fase inicial en el conocimiento de un material intermetálico; en este proyecto la fase inicial consiste en el conocimiento de un material intermetálico de base Fe-Al a un nivel microestructural. Ya que en el estado del arte en los últimos años se ha intensificado el conocer las propiedades y el

comportamiento de este material debido a que están siendo ampliamente usados en el área aeroespacial y de bioingeniería, por lo que con este centro de  $\mu$ EDM la UMSNH a través del Cuerpo Académico de Bioingeniería de la Facultad de Ingeniería Mecánica realizará investigaciones y estudios en este tipo de materiales en esta zona del país.

### **7.3. RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTURO.**

El presente proyecto es la fase inicial de una línea de investigación que tiene como finalidad establecer equipo de laboratorio en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH, utilizando software libre y plataformas de bajo costo como Arduino, Easy Driver, para configurar centros de micromaquinado utilizando el proceso electroquímico (ECM), el proceso de electroerosión de hilo (WEDM) o el presente proyecto el proceso de electroerosión de electrodo (EDM).

Las recomendaciones para trabajo futuro se presentan a continuación:

- 1) Utilizar el proceso de electroerosión para el maquinado es un área que se conoce muy poco en el país y que ofrece algunas ventajas en comparación con los procesos de arranque de viruta (fresado, torneado), por lo que con este centro de  $\mu$ EDM se continuará con una línea de investigación en la Facultad de Ingeniería Mecánica para ir perfeccionando este centro de micromaquinado hasta el objetivo final que es el poder producir geometrías sobre materiales metálicos como aluminios, aleaciones de acero, titanio, materiales intermetálicos o cualquier material eléctricamente conductor.
- 2) Debido a que este centro de micromaquinado EDM puede realizar maquinados a un nivel de micras, se puede tener un nicho de mercado para ir mejorando este centro de maquinado y ofrecer servicios a las empresas que requieran maquinados sobre materiales eléctricamente conductores, como aluminios, aleaciones de acero, titanio entre otros ya que en la zona realizar maquinados con este tipo de dimensiones es muy escaso y es un servicio que no está al alcance y con tanta disponibilidad para las empresas de la región.

- 3) La finalidad de realizar estudios e investigar un material intermetálico es que se busca realizar un vínculo con el área aeroespacial de la región ya que estos materiales se están utilizando ampliamente debido a las ventajas que ofrece y el objetivo es enfocarse en cómo se comporta con el proceso de electroerosión de electrodo y obtener geometrías con el acabado superficial que se requiere para el área aeroespacial.
- 4) Continuar con el perfeccionamiento del centro de  $\mu$ EDM en cada uno de los elementos que lo integran: generador de pulsos, sistema de circulación del medio dieléctrico, sistema de posicionamiento, el envío de códigos G de la interfaz para CAM, el porta-eléctrodo, para obtener geometrías que se requieran en estudios del Cuerpo Académico de Bioingeniería de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH.
- 5) Establecer un sistema de control para el control del GAP (distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo) que permita prevenir corto circuitos cuando el electrodo hace contacto con la pieza de trabajo y obtener un proceso de electroerosión más eficiente en el centro de  $\mu$ EDM.
- 6) Realizar un estudio de las temperaturas que se alcanzan en el proceso de electroerosión de electrodo para conocer el gradiente y el flujo de calor que se obtiene en el aceite dieléctrico cuando se genera el arco de plasma entre la pieza de trabajo y el electrodo cuando se establecen los pulsos eléctricos del proceso de electroerosión.
- 7) Realizar un estudio del porcentaje de desgaste que se tiene en el electrodo en la superficie lateral comparada con la cara del mismo conforme se desarrolla el proceso de electroerosión y el maquinado de la pieza de trabajo, y si esto influye en la precisión del maquinado  $\mu$ EDM.

## BIBLIOGRAFÍA.

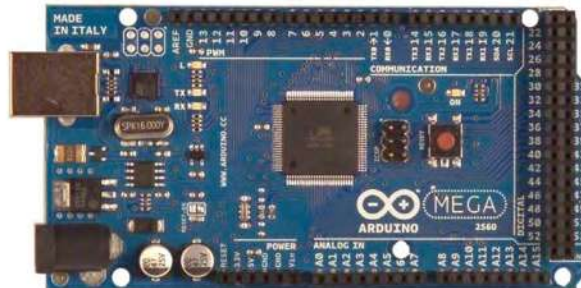
- [1] [http://www.acerosuddeholm.com/spanish/files/Mecanizado\\_electroerosion\\_spanish.pdf](http://www.acerosuddeholm.com/spanish/files/Mecanizado_electroerosion_spanish.pdf) - Noviembre 2010
- [2] <http://www.charmilles.ch> – Diciembre 2010
- [3] C.C. Kao, Albert J. Shih, “Sub-nanosecond monitoring of micro-hole electrical discharge machining pulses and modeling of discharge ringing”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, No 46, 2006.
- [4] B. M. Schumacher, After 60 years of EDM the discharge proces remains still disputed, *J. Mater. Process Technol*, 2004 (149,376-381).
- [5] J. Priestley, Experiments on the circular sports made on pieces of metal by large electrical explosions, in *The history and present state of electricity with original experiments*, vol II, 3er ed, London (1775)
- [6] B. Dibner, Galvani – Volta, A controversy that led to the discovery of useful electricity, *Noruega* (1952).
- [7] B. R. Lazarenko, About the inversion of metal erosion and methods to fight ravage of electric contacts, WEI-Institut, *Moscu* (1943).
- [8] L. H. Gerner y F.E. Haworth, Erosion of electrical contacts on make, *J. Appl. Phys*, 20(11), 1085-1109 (1949)
- [9] A. Descoedre, Characterization of electrical discharge machining plasmas, *École Polytechnique Fédérale De Lausanne*, 2006, (1-8).
- [10] <http://www.tecnun.es/asignaturas/labfabricacion/LCSF/pdfs/Electroerosion.pdf> - Noviembre 2010
- [11] Xizhi Sun, An integrated framework for developing generic modular reconfigurable platforms for micro manufacturing and its implementation, *Brunel University*, 2009 (13-26).
- [12] K. H. Ho and S. T. Newman, "State of the art electrical discharge machining (EDM)", *Int. J. Mach. Tools and Manufacture*, 43(13), 1287-1300 (2003).
- [13] J. Fleischer, T. Masuzawa, J. Schmidt, and M. Knoll, "New applications for micro EDM", *J. Mater. Process. Technol.*, 149, 246-249 (2004).
- [14] B. Lauwers, J.-P. Kruth, W. Liu, W. Eeraerts, B. Schacht, and P. Bleys, "Investigation of material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials", *J. Mater. Process. Technol.*, 149, 347-352 (2004).
- [15] I. Beltrami, C. Joseph, R. Clavel, J.-P. Bacher, and S. Bottinelli, "Micro- and nano-electric discharge machining", *J. Mater. Process. Technol.*, 149, 263-265 (2004).
- [16] H. Takezawa, H. Hamamatsu, N. Mohri, and N. Saito, "Development of micro-EDM-center with rapidly sharpened electrode", *J. Mater. Process. Technol.*, 149, 112-116.
- [17] S. Kumar Saha, Experimental investigation of the dry electric discharge machining (dry EDM) process, *Indian Institute of Technology Kanpur*, 2008, (12-16).
- [18] Chaides O, Ahuett H, Flores A, Caballero A, Ruiz L. “Diseño y Prueba de un Sistema de Control de Espaciamento y Potencia para Micro-EDM”, *Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo*. Vol 3, 2, 37-45, 2009.

- [19] Hyun-Seok T, Chang-Seung H, Dong-Hyun K, Ho-Jun L, Hae-June L, Myung-Chang K. “Comparative study on discharge conditions in micro-hole electrical discharge machining of tungsten carbide (WC-Co) material”, Transactions on Nonferrous Metals Society of China. Ed. Elsevier, 19, 114 – 118, 2009.
- [20] <http://www.schmalzhaus.com/EasyDriver/>
- [21] <http://www.arduino.cc/es/>
- [22] <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MC34063A.pdf> - marzo 2012
- [23] Srinivas S. “Development of Electrochemical Micro Machining”, USA, 2008.
- [24] Diver C, Atkinson J, Helml H, Lib L. “Micro-EDM drilling of tapered holes for industrial applications”, *Journal of Materials Processing Technology*. Ed. Elsevier, 149, 296-303, 2004.
- [25] Kremer D, “Usinage par electroeroation”, *École National des Arts et Matiers*, 3 – 8.
- [26] Oelheld Technologies. “La electroeroation par enfocage: Ce qu’il faut savoir ”. *Journal of HUTECH*.
- [27] <http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarollo/edm/4-materiales/4-3-fluido-dielectrico> - Marzo 2012.
- [28] <http://www.oelheld.fr/produits/huiles-pour-lusinage-des-metaux/fluides-dielectrique.html>- Febrero 2012.
- [29] [http://regrap.org/wiki/RepSnapper\\_Manual:Introduction](http://regrap.org/wiki/RepSnapper_Manual:Introduction)
- [30] <http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarollo/edm-eng/6-differences-between-macro-and-micro-edm/> - Febrero 2012.
- [31] Giraudi J B, Altini C. “Apuntes de clase: Electroerosión”, *Universidad de Buenos Aires*, Facultad de Ingeniería, 2005.
- [32] <http://www.unizar.es/icma/divulgacion/pdf/pdfdifraccionrayos.pdf> - mayo de 2012
- [33] A. Mazuelas Esteban, “Caracterización por difracción de rayos X de heteroestructuras de semiconductores III-V. Aplicación al diseño de superredes tensadas para epitaxias de GaAs/Si”, *Universidad Complutense de Madrid*, Centro Nacional de Microelectrónica CSIC, 25 - 27, 1992.
- [34] [http://robots-argentina.com.ar/MotorPP\\_basico.htm](http://robots-argentina.com.ar/MotorPP_basico.htm) - junio de 2012
- [35] [http://www.lubricantesparamotor.com/boletines/lubricantes\\_industriales/dielectrico-aceite.pdf](http://www.lubricantesparamotor.com/boletines/lubricantes_industriales/dielectrico-aceite.pdf) - mayo 2012

# APÉNDICES.

## APÉNDICE I. PLATAFORMA ABIERTA ARDUINO MEGA 2560.

Arduino Mega 2560 es un microcontrolador electrónico Atmega2560.



Lleva 54 entradas/salidas digitales y 14 de estas pueden utilizarse para salidas PWM. Además lleva 16 entradas analógicas, UARTs (puerto serie), un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un header ICSP y un pulsador para el reset. La placa lleva todo lo necesario para soportar el microprocesador. Para empezar a utilizar la placa sólo es necesario conectarla al ordenador a través de un cable USB, o alimentarla con un adaptador de corriente AC/DC. También, para empezar, puede alimentarse sencillamente con una batería.

Una de las características principales de la MEGA 2560 es que no utiliza el convertidor USB-serial FTDI, sino que utiliza el microprocesador Atmega8U2 programado como convertidor USB-serial.

La placa Arduino MEGA2560 es compatible con la mayoría de los shield soportados por las placas Duemilanove y UNO.

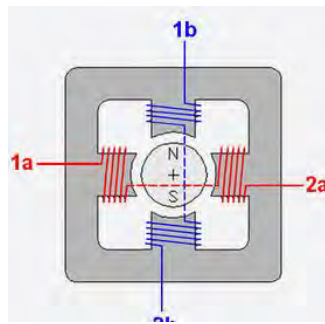
- Microprocesador ATmega2560
- Tensión operativa 5V
- Tensión de alimentación (recomendado) 7-12V
- Tensión de alimentación (limites) 6-20V
- 54 Entradas/Salidas Digitales (14 de estas se pueden utiliza para salidas PWM)
- 16 Entradas Analógicas
- Maxima corriente continua para las entradas: 40 mA
- Maxima corriente continua para los pins 3.3V: 50 mA
- Flash Memory 256 KB (el bootloader usa 8 KB).
- SRAM 8 KB
- EEPROM 4 KB
- Velocidad del Clock 16 MHz

## APÉNDICE II. MOTOR A PASOS BIPOLAR.

Los motores a pasos se deben manejar de manera externa con un controlador electrónico y, típicamente, los motores y sus controladores se diseñan de manera que el motor se pueda mantener en una posición fija y también para que se lo pueda hacer girar en un sentido y en el otro.

Hacer girar un motor paso a paso no es tan simple como hacerlo con un motor de corriente continua, al que se le entrega una corriente y listo. Se requiere un circuito de control, que será el responsable de convertir las señales de avance de un paso y sentido de giro en la necesaria secuencia de energización de los bobinados.

Los motores a pasos bipolares tienen cuatro cables de salida. Para ser controlados, requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento.



Distribución del bobinado de un motor bipolar

La configuración de los motores bipolares requiere que las bobinas reciban corriente en uno y otro sentido, y no solamente un encendido-apagado como en los unipolares. Esto hace necesario el uso de un Puente H o un controlador Easy Driver.

ROTACIÓN HORARIA →

	1	2	3	4	5	6	7	8
1a	+	-	-	-	+	-	-	-
1b	-	+	-	-	-	+	-	-
2a	-	-	+	-	-	-	+	-
2b	-	-	-	+	-	-	-	+

Secuencia de pulsos para un motor bipolar

## APÉNDICE III. CARACTERÍSTICAS MECANICAS DEL FLUIDO DIELECTRICO UTILIZADO EN TRANSFORMADORES [35].

### **Descripción**

---

Los aceites **DIELECTRICOS** se obtienen a partir de bases nafténicas de bajo punto de fluidez, libres de ceras y sometidas a proceso de refinación de extracción por solventes y de tratamiento con hidrógeno.

### **Propiedades**

---

- ✳ Buenas propiedades como aislante, las cuales dependen en su totalidad de la ausencia de impurezas, tales como suciedad, materias extrañas y agua: los cuales aún en pequeñas cantidades pueden disminuir operacionalmente la rigidez dieléctrica. Los aceites **DIELECTRICOS** son cuidadosamente secados y filtrados, en el momento de su envasado.
- ✳ Los aceites **DIELECTRICOS** poseen una alta resistencia a la oxidación, lo que permite funcionar por largos periodos, tanto en transformadores de potencia y de distribución como en interruptores.
- ✳ Poseen alta estabilidad química.
- ✳ Poseen buenas propiedades refrigerantes debido a su baja viscosidad, lo cual le facilita la transferencia del calor generado en el transformador.

### **Especificaciones**

---

Los aceites **DIELECTRICOS**, cumplen con las normas ASTM D-3487 y NTC 1465. Estas normas contemplan dos clases de aceites Tipo I y II.

### **Aplicaciones**

---

Los aceites **DIELECTRICOS** pueden utilizarse en:

- ✳ Transformadores de potencia y de distribución.
- ✳ Interruptores de Potencia en baños de aceite.
- ✳ Condensadores.
- ✳ Como medio aislante en las bobinas de arranque de automóviles.
- ✳ Como aceite dieléctrico en general.

## Características

PRUEBAS	Método ASTM	Valor	
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>			
Gravedad Específica a 15/15 °C	D-1298	0.91	
Viscosidad cinemática a 40 °C cSt.	D-445	12	
Viscosidad a 100 °C cSt.	D-445	3	
Calor máximo	D-1500	0.5	
Punto de Inflamación °C (min)	D-92	145	
Punto de Fluidez °C	D-97	-30	
Tensión interfacial a 25°C, Dinas/cm (min)	D-971	40	
<b>PROPIEDADES QUÍMICAS</b>			
Azúfre corrosivo	D-1275	No corrosivo	
Agua (ppm) máximo	D-1533	35	
Valor de neutralización en mgr KOH/g de aceite, máximo	D-4739	0.03	
Estabilidad a la oxidación A las 72 horas	D-2440	<b>DIELECTRICO</b>	
		<b>R</b>	<b>BX</b>
- Lodos, % peso máximo		0.15	0.1
- Acidez mg KOH/g de aceite, máx.		0.5	0.3
A las 168 horas			
- Lodos, % peso máximo		0.30	0.20
- Acidez mg KOH/g de aceite, máx.		0.6	0.4
<b>PROPIEDADES ELÉCTRICAS</b>			
Rigidez dieléctrica, kV (min)	D-1816	56	56
Factor de potencia a 60 Hz máx.	D-924		
25°C		0.05	0.05
100°C		0.03	0.03
Punto de anilina °C m)	D-611		84
Exámen visual	D-1524	Claro brillante	

Las cifras físicas representan un valor promedio de los resultados obtenidos en el laboratorio y son dadas como referencia y no como límites exactos de una especificación.

## APÉNDICE IV. PUBLICACIONES.

### PRESENTACION DEL PROYECTO BAJO LA MODALIDAD DE CONFERENCIA EN EL DECIMO CONGRESO NACIONAL DE MECATRÓNICA.

#### 10º Congreso Nacional de Mecatrónica

Centro Internacional de Convenciones  
Puerto Vallarta, Jalisco. 3-4 de Noviembre, 2011.



Ing. Luis Salvador López Flores.  
Facultad de Ingeniería Mecánica,  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.  
**PRESENTE**

Esperando que sus actividades se desarrollen exitosamente, me es grato informarle que su artículo titulado:

**Diseño de una Plataforma para Micromaquinado por Electroerosión (EDM) y/o Electroquímico (ECM).**


Ha sido aceptado por el comité técnico para ser presentado en la modalidad de: Conferencia Magna. Muchas felicidades. Muestro a usted la resolución del Comité Técnico del Congreso:

Trabajo aceptado con modificaciones mínimas. Se solicita incluir al menos un correo electrónico de los autores. Se solicita incluir información sobre la metodología de diseño realizada.

Le agradeceré me envíe la versión corregida de acuerdo a estas observaciones a la brevedad posible en formato Word de Microsoft.

Así mismo, le agradeceré realizar el pago de su inscripción de acuerdo a la convocatoria a fin de lograr los tiempos requeridos de la edición del libro de memorias con ISBN y CD.

Con un cordial saludo,

  
Dr. José Emilio Vargas Soto  
Presidente  
Comité Técnico del Congreso

## ARTICULO ENVIADO

# DESIGN OF A PLATFORM FOR MICROMACHINING BY SINKER ELECTROEROTION (EDM) AND/OR ELECTROCHEMICAL (ECM).

Miguel Villagómez Galindo, Marco Antonio Espinosa Medina, Oscar Álvarez Sánchez, Luis Salvador López Flores.

División de estudios de posgrado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

[miguel\\_villagomez\\_galindo@hotmail.com](mailto:miguel_villagomez_galindo@hotmail.com), [marespmed@gmail.com](mailto:marespmed@gmail.com),  
[alvarezoscar\\_1@hotmail.com](mailto:alvarezoscar_1@hotmail.com), [lopez1365@hotmail.com](mailto:lopez1365@hotmail.com)

## ABSTRACT

*This paper presents the design of a platform for micromachining, either through the process of **Electrical Discharge Machining** (sinker EDM) or the Electrochemical Machining (ECM). In this project it is stated that with the platform you have the possibility to choose any of the two machining processes adapting certain parameters according to the selected process (EDM or ECM).*

*For example: voltage, amperage, generation frequency of pulses, pulse duration, circulating fluid and gap.*

**Key Words:** Micromachining, EDM, ECM, electrical discharge machining, electrochemical machining.

## 1. Introduction.

Within the processes of manufacturing non-conventional that offer greater precision of three-dimensional manufacture in conducting materials of high resistance, are the manufacturing processes by EDM (electrical discharge machining) and ECM (electrochemical machining).

### 1.1 Sinker electrical discharge machining.

The principle of the EDM takes advantage of the effect of erosion caused by a series of shocks controlled that generate an electric spark between an electrode and the workpiece. The sparks are generated in a dielectric fluid, between the working material (cathode) and the electrode (anode) usually made of graphite or copper, which can be considered as the cutting tool [1].

There is no mechanical contact between the electrodes during the entire process. Since erosion is produced by electrical discharges between the electrode and the object, which must be electrically conductive. Thus, the machining process consists in the elimination of successive small volumes of material from the workpiece (see figure 1). This small volume is melted or vaporized during each spark. So this basic process is done repeatedly under a certain frequency.

The main function of the dielectric is to create an environment that facilitates the conduction, in addition to functioning as a refrigerant and as a fluid that removes the wear material during the manufacturing process.

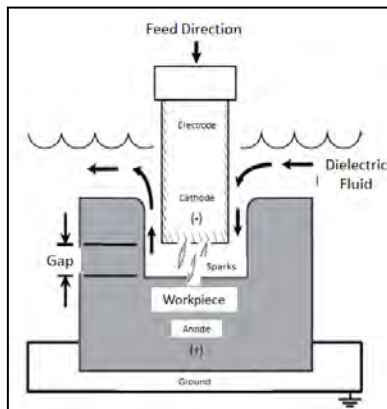


Figure 1. Electrical discharge machining (EDM) [2].

### 1.2 Electrochemical machining.

The electrochemical machining (ECM) has the objective of working on materials that are difficult to contrive by conventional methods (mill, lathe, drill, etc), it works by means of the detachment of ions that is achieved thanks to the phenomenon of electrolysis, a chemical reaction that occurs when an electric current passes between two conductors immersed in a liquid solution.

In the electrochemical machining, when the pulse of current is applied to two electrodes that are immersed in an electrolyte, it produces the ion and atoms exchange due to the addition of electrons from the external circuit.

The chemical reactions depend on both the material from the workpiece (atomic weight and burden ionic), as of the type of electrolyte, a concentrated electrolytic solution has the advantages of a better conductivity, and on the other hand, a dilute solution is less likely to crystallize and gives a smoother surface [3].

In figure 2 appears a schema of an electrolytic cell using copper sulfate as electrolyte and copper wire as electrode.

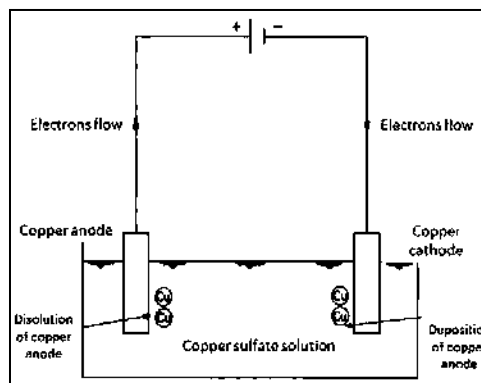


Figure 2. Schema of electrolysis [4].

## 2. Design methodology.

To establish the design of the center for micromachining the project development it is divided into the following stages:

1. Bibliographic review.
2. Design of the platform base of the center for micromachining.
3. Design and/or selection of the devices necessary to achieve both EDM and ECM process.
4. Programming of the center for micromachining.
5. Bringing the parameters of the two processes to the machining of the selected material.
6. Analysis and validation of the results.

## 3. Design of the structure of the center for micromachining.

The most important parts to the design of the base platform are:

- The structure of the positioning system.
- The pulse generator.
- The interface.

### 3.1 Structure of the positioning system.

The platform base is designed with three degrees of freedom in rectangular coordinates (see figure 3), with the purpose of establishing the parameters that define each of the processes of roughing (EDM or ECM).

The structural design was performed with the help of the CAD software SolidWorks 2011.

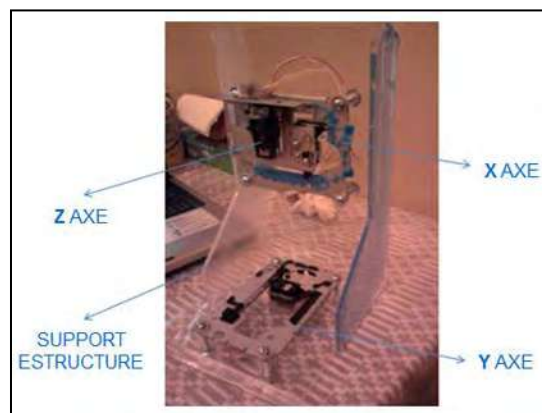


Figure 3. Design of the base platform.

The presented design was defined to ensure the rigidity and stability necessary when the machining process is carried out.

### 3.2 Forward movement mechanism of each axe.

To ensure the precision that is needed for each one of the processes of roughing it is important that the linear motion of each axe it is through the implementation of a micrometric adjustment mechanism such as the one shown in figure 4.

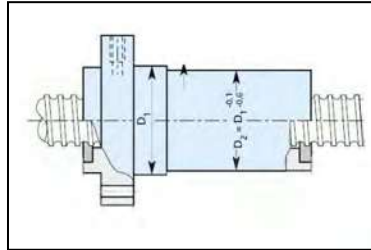


Figure 4. Forward movement mechanism of each axe.

By coupling the mechanism shown to a bipolar steps motor gets the progress of the electrode.

The micrometric accuracy is obtained by means of the step on the thread.

In carrying out the documentary research this type of mechanism is used in the CD-ROM drivers of the PC, so the settings for each axis is defined as shown in the figure below.



Figure 5. Mechanism used in each axe of the positioning system.

For the control of each of the axes of the center for micromachining was established the following electronic configuration (figure 6).

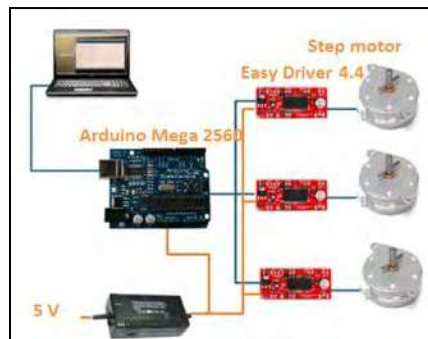


Figure 6. Electronic configuration in the base platform.

This control system consists of an Arduino 2560 platform, the stepper motor driver v4.4 and the stepper motor itself.

The driver of the motor (Easy-Driver v4.4) allow us to manipulate and give us the correct sequence to the stages of the stepper motor (see figure 7).

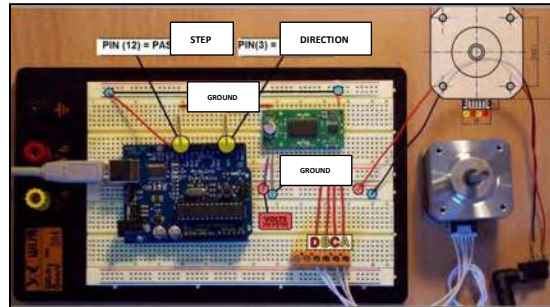


Figure 7. Electronics for the stepper motor control [5].

### 3.3 Pulse generator.

For a process of micromachining a decrease in the amount of material removed by each discharge, requires an increase in the number of pulses applied per unit of time, in such a way that does not significantly decrease the Speed of Removal of Material SRM [6].

By the foregoing will be used a pulse generator whose control will be through a Programmable Integrated Circuit (PIC), as you can see in Figure 8.

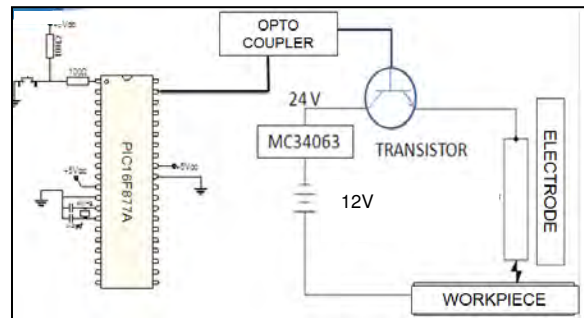


Figure 8. Pulse generator to the two processes.

### 3.4 Interface.

With the implementation of the CAM interface, we link the computer with the arduino platform and finally we get the process control both EDM and ECM of the base platform (see figure 9).



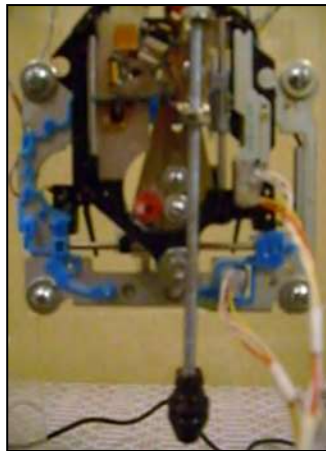
For our process control, first we need to sketch the geometry in the SolidWorks 2011 CAD software; after this we save the archive with an extension *.stl*, and the Repsnapper software allows you to view the work piece.

From the desired geometry made in CAD the Repsnapper software generates G machining code of the workpiece, for that finally these codes are sent to the arduino and the card start the process of EDM or ECM.

### ***3.5 Assembly to configure the center of machining.***

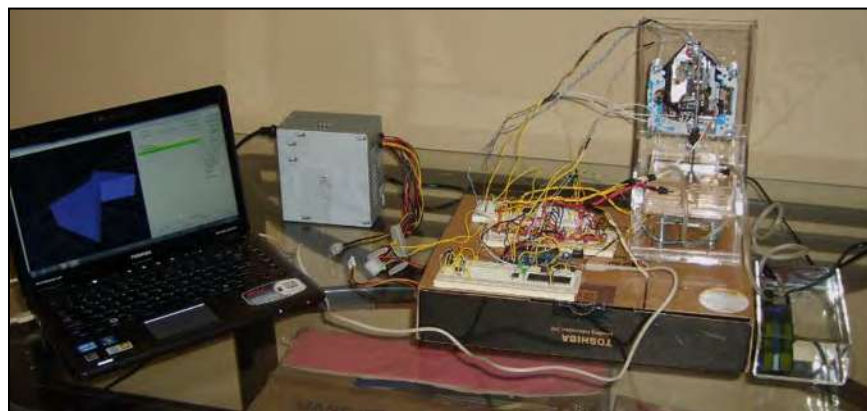
With the positioning system, the pulse generator and the CAM interface it was configured the center of machining.

To assure the machining of the two processes, it needed to be established the port-electrode (see figure 12) and how handle the workfluid (dielectric fluid in EDM process and electrolyte in ECM process) through a circulating system.



**Figure 12. Port-electrode configuration.**

This system was achieved with the manufacture of two acrylic tanks, one to house the circulation pump and another to place the workpiece and with this, get the platform base for the two processes (see the figure 13).



**Figure 13. Center of machining configuration.**

#### 4. Determination of the parameters of the process.

Determination of the process parameters (see figure 14) it may make the cycle of machining for the 2 methods of roughing, ECM and EDM.

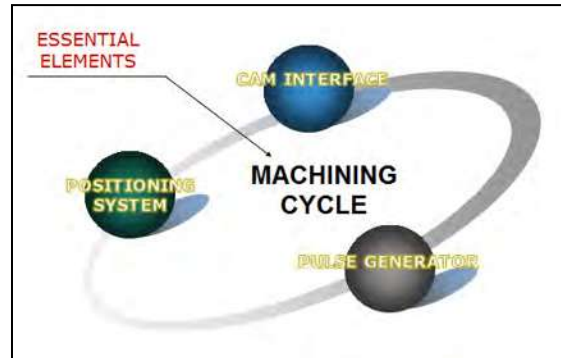


Figure 14. Parameters needed to establish the cycle of roughing.

With the purpose of studying both the ECM process as the EDM process, it is considered that each of them has important variants and that these have to be considered to have the possibility to use any of the two processes.

According to the working fluid used, the EDM process requires a dielectric medium to the electric spark is generated consistently and controlled, in addition to that performs the function of cleaning the material eroded from the workpiece [7]; on the other hand, the ECM process requires an electrolyte, which has the function of carrying the ions that are arising from the workpiece; because of this should take into account that after a certain number of work's cycles the electrolyte is saturated by the ions emitted in the process and it is need to be replaced.

The accuracy to have a bulk micromachining is a very important feature since it to achieve the cycle of roughing, both the process EDM as of the ECM, it is necessary to maintain a constant distance between the electrode and the workpiece (gap) and the feed of the electrode must be constant in accordance with the voltage between the electrode and the workpiece [8].

In the case of the pulse generator the most important parameters to regulate are the voltage, the amperage and the frequency applied according to the process chosen.

The material of the working electrode for both processes will be the copper; the geometry of the same will be that of a wire to do both in the EDM process as in the ECM, the process of micro-hole.

#### 5. Conclusions.

The platform for micromachining presented in this project is in development, have been defined in separately, the positioning system, the interface CAM and the pulse generator, to finally be able to perform the assemblage of these 3 elements and be able to set the machine for micromachining for EDM and/or ECM.

As future work for this project there are several possibilities such as:

- Fix all electronic components through PCB cards; improve the connections and the visualization or aesthetics of this configuration.
- Establish the differences between the EDM and the ECM process through the surface finishes that offer us each one of them.
- Analyze machined workpieces at a metallography level and X-ray diffraction studies with the objective of establishing what crystalline structure is obtained and other physics characteristics.
- Establish the feasibility of obtain pieces with aerospace or biomedical degree those require high precision, since it has the objective of establishing a link with the aerospace industry to continue improving this platform for micromachining.
- Establish new lab equipment at the UMSNH university.

### References.

- [1] Jong H, Won T. “*Optimization of EDM process for multiple performance characteristics using Taguchi method and Grey relational analysis*”, *Journal of Mechanical Science and Technology*. Ed. Springer, 24 (5), 1083 – 1090, 2009.
- [2] Chaides O, Ahuett H, Flores A, Caballero A, Ruiz L. “*Diseño y Prueba de un Sistema de Control de Espaciamento y Potencia para Micro-EDM*”, *Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo*. Vol 3, 2, 37-45, 2009.
- [3] Srinivas S. “*Development of Electrochemical Micro Machining*”, USA, 2008.
- [4] Adaptada de Srinivas S. “*Development of Electrochemical Micro Machining*”, USA, 2008.
- [5] Adaptada de <http://www.electrochem.cwru.edu/ed/encycl/> y <http://www.artificialtourism.com/arduino-workshop/>. Última visita 22/08/2011.
- [6] Diver C, Atkinson J, Helml H, Lib L. “*Micro-EDM drilling of tapered holes for industrial applications*”, *Journal of Materials Processing Technology*. Ed. Elsevier, 149, 296-303, 2004.
- [7] Hyun-Seok T, Chang-Seung H, Dong-Hyun K, Ho-Jun L, Hae-June L, Myung-Chang K. “*Comparative study on discharge conditions in micro-hole electrical discharge machining of tungsten carbide (WC-Co) material*”, *Transactions on Nonferrous Metals Society of China*. Ed. Elsevier, 19, 114 – 118, 2009.
- [8] Xizhi Sun. “*An Integrated Framework for Developing Generic Modular Reconfigurable Platforms for Micro Manufacturing and its Implementation*”, Brunel University, 2009.
- [9] <http://www.arduino.cc/es/>
- [10] <http://www.schmalzhaus.com/EasyDriver/>
- [11] <http://www.solidworks.com/>