



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**DISEÑO DE UN CENTRO DE MICROMAQUINADO POR  
DESBASTE ELECTROQUÍMICO.**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

PRESENTA:

**ING. OSCAR ARMANDO ALVAREZ SÁNCHEZ.**

**ASESOR:**

**M.C. MIGUEL VILLAGÓMEZ GALINDO.**

**CO ASESOR:**

**DR. MARCO ANTONIO ESPINOSA MEDINA.**

MORELIA, MICH. AGOSTO DEL 2012

---

---



**“DISEÑO DE UN CENTRO DE MICROMAQUINADO POR  
DESBASTE ELECTROQUÍMICO”**

## RESUMEN

El presente trabajo describe el diseño y la fabricación de un centro de micromaquinado por desbaste electroquímico, controlado por computadora y con interfaz a un sistema de manufactura asistida por computadora (CAM), enfocado principalmente a su aplicación en un material intermetálico Fe-Al, elegido como material de trabajo debido a las características de este tipo de materiales, como su resistencia a la corrosión, principalmente a altas temperaturas. La fundición del material Fe-Al se llevó a cabo en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH. Para el diseño y construcción del centro de micromaquinado electroquímico se tomaron en cuenta varios aspectos importantes como, por ejemplo, fabricar un centro de micromaquinado relativamente a un bajo costo en comparación con los que existen actualmente en el mercado, que nos permitiera hacer estudios de los parámetros del proceso de micromaquinado electroquímico, al brindar la posibilidad de hacer ciertas variaciones en algunos de estos parámetros como el voltaje y la frecuencia de los pulsos eléctricos. Por otro lado, se buscó que el centro de micromaquinado resultara lo más reducido posible en cuanto a dimensiones y peso para tener la posibilidad de transportarlo de un lugar a otro fácilmente. Los resultados muestran que el centro de micromaquinado cumple con las expectativas que se plantearon al principio del proyecto, ya que efectivamente permite variar ciertos parámetros del proceso de maquinado y sus dimensiones y peso son aceptables para permitir su movilidad de un lugar a otro sin mucho esfuerzo. Por otra parte se realizaron algunos estudios metalográficos al material para determinar sus características antes y después del maquinado. De este modo se lograron realizar algunas pruebas en el material antes mencionado y se determinó que el proceso de micromaquinado electroquímico en nuestro centro de maquinado funciona correctamente. Posteriormente se analizaron las muestras de material para apreciar las dimensiones y la calidad del maquinado realizado y determinar cómo afecta el proceso de micromaquinado a la superficie de las piezas.

**Palabras Clave:** Micro desbaste electroquímico, Control Numérico Computarizado, material intermetálico de base Fe-Al, Mecatrónica.

## ABSTRACT

This paper describes the design and manufacturing of a center for roughing electrochemical micromachining, computer controlled and interfaced to a computer aid manufacturing system (CAM), mainly focused on its application in a Fe-Al intermetallic material, chosen as working material due to the characteristics of such materials, such as their corrosion resistance, especially at high temperatures. The Fe-Al material cast was carried out at the Metallurgical Research Institute of UMSNH. For the design and construction of electrochemical micro-machining center we took into account several important aspects, for example, make a micromachining center at a relatively low cost compared to those currently on the market, that would allow us to study the parameters of the electrochemical micromachining process by providing the possibility of certain changes in some parameters such as voltage and frequency of electrical pulses. Furthermore, it was sought that the center of micromachining was as small as possible in terms of dimensions and weight, to be able to transport from one place to another easily. The results show that the machining center meets the expectations that were raised at the beginning of the project, because it effectively allows you to vary certain parameters of the machining process and its dimensions and weight are acceptable to allow movement from one place to another without much effort. Moreover metallographic studies were conducted to determine the material characteristics before and after machining. In this way were able to perform some tests on the material above and found that the electrochemical micromachining process in our machining center is working properly. Subsequently the material samples were analyzed to appreciate the dimensions and quality of machining performed and determine how it affects the process of micromachining to the surface of the pieces.

**Keywords:** MicroECM, Computer Numerical Control, Fe-Al intermetallic material, Mechatronics.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	3
ABSTRACT .....	4
ÍNDICE GENERAL .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
GLOSARIO .....	12
INTRODUCCIÓN .....	14
JUSTIFICACIÓN.....	16
OBJETIVO GENERAL .....	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
HIPÓTESIS .....	19
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	20
1.2 LA VERSATILIDAD DE LA TÉCNICA ECM DE HOY.....	22
1.3 ELECTRÓLISIS.....	23
1.4 MAQUINADO ELECTROQUÍMICO .....	24
1.5 APLICACIONES DEL MAQUINADO ELECTROQUÍMICO.....	27
1.5.1 <i>Rebabado</i> .....	27
1.5.2 <i>Perforado</i> .....	28
1.5.3 <i>Conformado</i> .....	29
1.6 MICROMAQUINADO ELECTROQUÍMICO .....	30
1.7 MICRO ECM PULSADO .....	31
1.8 MATERIALES INTERMETÁLICOS.....	32
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>SISTEMA DE POSICIONAMIENTO.....</b>	<b>34</b>
2.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA.....	34
2.2 ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO DE LA ESTRUCTURA .....	35

2.3 SELECCIÓN Y MONTAJE DE LOS MOTORES A PASOS .....	37
2.4 CONTROLADORES DE LOS MOTORES A PASOS .....	40
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>MICROCONTROLADOR E INTERFAZ .....</b>	<b>42</b>
3.1 MICROCONTROLADOR .....	42
3.2 INTERFAZ.....	44
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>GENERADOR DE PULSOS .....</b>	<b>46</b>
4.1 DISEÑO DEL GENERADOR DE PULSOS .....	46
4.2 SIMULACIÓN EN PROTEUS.....	48
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>RESTO DE LOS COMPONENTES.....</b>	<b>50</b>
5.1 PORTAELECTRODO .....	50
5.2 ELECTRODO .....	50
5.3 FINALES DE CARRERA .....	51
5.4 SISTEMA DE BOMBEO Y FILTRADO .....	52
5.5 TINAS DE MAQUINADO Y DE ALMACENAMIENTO .....	53
5.6 ELECTROLITO.....	55
5.7 ESTRUCTURA DEL CENTRO DE MAQUINADO .....	55
<b>CAPÍTULO VI</b>	
<b>PREPARACIÓN DEL MATERIAL INTERMETÁLICO Y PRUEBAS .....</b>	<b>59</b>
6.1 PREPARACIÓN DEL MATERIAL INTERMETÁLICO FE-AL-AG .....	59
6.2 PRUEBAS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	60
6.3 OBTENCIÓN DE IMÁGENES EN EL MICROSCOPIO ÓPTICO .....	61
6.4 MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.....	64
6.5 MICROMAQUINADO DE CRÁTERES .....	66
6.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	69
<b>CAPÍTULO VII</b>	
<b>CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>71</b>
CONCLUSIONES .....	71

TRABAJO FUTURO .....	72
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO I</b>	
ARTÍCULOS PUBLICADOS Y PRESENTACIONES EN EL MARCO DE ESTA TESIS. ....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Flujo de electrolito sobre la pieza de trabajo [3] .....	21
Figura 2 - Aplicación del ECM [3] .....	22
Figura 3 - Esquema de electrólisis [2] .....	23
Figura 4 - Circuito de maquinado electroquímico [4] .....	24
Figura 5 - Desprendimiento de iones de la pieza de trabajo [4] .....	25
Figura 6 - Principio de maquinado electroquímico [5] .....	26
Figura 7 - Conformado mediante ECM [6].....	26
Figura 8 - Rebabado electroquímico [7] .....	27
Figura 9 - Perforado electroquímico [8] .....	28
Figura 10 - Conformado electroquímico [6] .....	29
Figura 11 - Ejemplos de microECM [3].....	30
Figura 12 - Representación de la corriente pulsada respecto del tiempo [12].....	31
Figura 13 - Materiales intermetálicos [14] .....	33
Figura 14 - Diseño de la estructura en SolidWorks .....	34
Figura 15 - Análisis de esfuerzo equivalente (von-Mises) .....	35
Figura 16 - Análisis de esfuerzo normal .....	36
Figura 17 - Análisis de deformación .....	36
Figura 18 - Estructura fabricada en acrílico.....	37
Figura 19 - Motor a pasos .....	38
Figura 20 - Taladrado de la base .....	38
Figura 21 - Montaje del motor para el movimiento en Y .....	39
Figura 22 - Montaje del motor para el movimiento en X.....	39
Figura 23 - Montaje del motor para el movimiento en Z .....	40
Figura 24 - Tarjeta Easy Driver V4.4 [26] .....	41
Figura 25 - Frente del Arduino Mega 2560 [27].....	42
Figura 26 - Parte posterior Arduino Mega 2560 [27] .....	43
Figura 27 - Pantalla del programa Arduino [27].....	44
Figura 28 - Pantalla del programa RepSnapper [28] .....	45
Figura 29 - PIC 16f877a .....	46

Figura 30 - Fuente de alimentación de 400W .....	46
Figura 31 - Optoacoplador 4N32 y su diagrama eléctrico. ....	47
Figura 32 - Transistores TIP41c.....	47
Figura 33 - Circuito generador de pulsos .....	48
Figura 34 - Diferentes anchos de pulso.....	49
Figura 35 - Broquero Dremel.....	50
Figura 36 - Portaelectrodo.....	50
Figura 37 - Alambres utilizados como electrodos.....	51
Figura 38 - Interruptor de palanca .....	51
Figura 39 - Interruptor óptico .....	52
Figura 40 - Bomba y filtro .....	52
Figura 41 - Válvula y acoplamiento para la manguera de descarga.....	53
Figura 42 - Tina de maquinado .....	54
Figura 43 - Tina de almacenamiento.....	54
Figura 44 - Solución de agua y Cloruro de Sodio (NaCl) [30].....	55
Figura 45 - Circuitos electrónicos .....	56
Figura 46 - Tina de almacenamiento, bomba y filtro .....	56
Figura 47 - Fuente de alimentación.....	57
Figura 48 - Sistema de posicionamiento .....	57
Figura 49 - Portaelectrodo y tina de maquinado.....	58
Figura 50 - Centro de maquinado ECM.....	58
Figura 51 - Proceso de fundición.....	59
Figura 52 - Probeta de material intermetálico Fe-Al .....	60
Figura 53 - Gráfica del material intermetálico obtenida con el difractor de rayos X.....	61
Figura 54 - Pulidora metalográfica .....	62
Figura 55 - Proceso de pulido con paño.....	62
Figura 56 - Tamaño de grano a 100x.....	63
Figura 57 - Tamaño de grano a 500x.....	63
Figura 58 - Tamaño de grano a 1000x.....	64
Figura 59 - Imagen en el microscopio de barrido a 100x .....	65

Figura 60 - Imagen en el microscopio de barrido a 500x .....	65
Figura 61 - Imagen en el microscopio de barrido a 1000x .....	66
Figura 62 - Cráter realizado con un voltaje de 5V, prueba #1 .....	67
Figura 63 - Cráter realizado con un voltaje de 5V, prueba #2 .....	68
Figura 64 - Cráter realizado con un voltaje de 12V, prueba #3 .....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Propiedades físicas del acrílico .....	35
Tabla 2 - Carrera de los ejes X,Y y Z .....	40
Tabla 3 - Tabla de datos de la fuente de alimentación .....	47
Tabla 4 - Condiciones experimentales prueba #1 .....	67
Tabla 5 - Condiciones experimentales prueba #2 .....	67
Tabla 6 - Condiciones experimentales prueba #3 .....	68

## GLOSARIO

**Ánodo:** Es un electrodo en el cual se produce la reacción de oxidación. La polaridad del ánodo depende del tipo de dispositivo; en un dispositivo que consume energía el ánodo es positivo, y en un dispositivo que proporciona energía el ánodo es negativo.

**CAD:** Diseño Asistido por Computadora.

**CAM:** Manufactura Asistida por Computadora.

**Cátodo:** Es un electrodo en el cual se produce la reacción de reducción. Al igual que en el ánodo, la polaridad del cátodo depende del tipo de dispositivo; en un dispositivo que consume energía el cátodo es negativo, y en un dispositivo que proporciona energía el cátodo es positivo.

**Electrodeposición:** Es un proceso electroquímico en el que se usa una corriente eléctrica para reducir cationes en una solución acuosa que los contiene para propiciar la precipitación de estos, que suelen ser metales, sobre un objeto conductor que será el cátodo de la celda, creando un fino recubrimiento alrededor de este con el material reducido.

**Electrolito:** Cualquier sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico.

**Electroquímico:** Se refiere a las reacciones que se dan en la interfase de un conductor eléctrico (llamado electrodo, que puede ser un metal o un semiconductor) y un conductor iónico (el electrolito). La principal diferencia entre una reacción química y una electroquímica es que, en la electroquímica, la reducción ocurre en un electrodo y la oxidación ocurre en el otro, mientras que en la reacción química, ambas reducción y oxidación, ocurren en el mismo lugar.

**Estocástico:** Es aquél sistema que funciona, sobre todo, por el azar.

**Galvanoplastia:** Es el proceso basado en el traslado de iones metálicos desde un ánodo a un cátodo en un medio líquido, compuesto fundamentalmente por sales metálicas y ligeramente acidulado. Desde el punto de vista de la física, es la electrodeposición de un metal sobre una superficie para mejorar sus características. Con ello se consigue proporcionar dureza, duración, o ambas.

**Interfaz:** Es la conexión entre dos ordenadores o máquinas de cualquier tipo dando una comunicación entre distintos niveles.

**Ion:** Partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutra.

**Rebaba:** Materia sobrante cualquiera, que forma un resalte en los bordes de un objeto.

**Sobrepotencial:** Se llama sobrepotencial a la diferencia entre el potencial de equilibrio de un electrodo y el potencial real, medido cuando circula corriente por el mismo.

## INTRODUCCIÓN

Los avances científicos e ingenieriles en años recientes han generado demandas insólitas en la industria de maquinado de metales. Metales con propiedades altas de resistencia a la carga han sido desarrollados para servir a propósitos específicos, por ejemplo, la fabricación de herramientas, estructuras, aviones, reactores, etc. Además, han sido creadas aleaciones con propiedades mejoradas como la resistencia a la corrosión, bajo peso, resistencia mecánica a altas temperaturas, entre otras.

Mientras que la ciencia de materiales y la comunidad ingenieril han estado ocupadas desarrollando aleaciones de alto desempeño, la ingeniería en manufactura ha estado diseñando nuevos procesos cuyo objetivo es realizar la producción de componentes acomodados a las necesidades del cliente y económicamente factibles.

El maquinado electroquímico (ECM) tiene como objetivo trabajar en materiales que son difíciles de maquinar por métodos convencionales, funciona por medio del desprendimiento de iones que se logra gracias al fenómeno de electrólisis, una reacción química que ocurre cuando una corriente eléctrica pasa entre dos conductores sumergidos en una solución líquida. En el maquinado electroquímico el electrolito funciona como portador de corriente y la gran rapidez de movimiento del electrolito en el espacio entre la herramienta y la pieza, arrastra y retira los iones metálicos de la pieza (ánodo) antes de que tengan oportunidad de depositarse sobre la herramienta (cátodo).

El ECM ofrece muchas ventajas respecto a los métodos de maquinado convencionales:

- No se presenta desgaste en la herramienta.
- Es posible maquinar formas complicadas en materiales conductivos de alta dureza.
- Se producen superficies libres de tensiones o daños térmicos.
- Es posible controlar dimensiones pequeñas.
- Es adecuado para producción en masa.

Existen varios parámetros a considerar para la realización del diseño tales como: el sobrepotencial, la formación de óxidos en la superficie del electrodo, los efectos del campo eléctrico del filo en la cavidad de trabajo (el campo eléctrico acelera o desacelera el paso de electrones del sólido a la solución) y la conductividad del electrolito. Es necesaria una investigación para conocer los efectos de los parámetros del proceso en la eficiencia de la corriente y para entender el mecanismo de maquinado electroquímico por medio de pulsos.

El maquinado electroquímico (ECM) es un método no convencional de manufactura que permite el desprendimiento de material de una pieza de trabajo mediante pulsos de corriente, sin que haya contacto directo entre la herramienta y la pieza de trabajo. Este proceso está basado principalmente en la electrólisis, regida por la ley de Faraday. Existen varios parámetros que determinan el acabado superficial de las piezas maquinadas, entre ellos podemos mencionar el tipo de electrolito, la velocidad de flujo del mismo, la velocidad de avance del electrodo, la duración de los pulsos, el intervalo de tiempo entre un pulso y el siguiente, entre otros [1].

## JUSTIFICACIÓN

Los procesos de maquinado tienen una gran importancia en la actividad productiva, tanto de forma directa para la fabricación de componentes como de forma indirecta para la fabricación de elementos auxiliares. La tecnología relacionada con el maquinado ha evolucionado mucho en los últimos años con mejoras que afectan a múltiples campos como las herramientas de desbaste, la tecnología del maquinado, los medios de producción, el CAD/CAM o la sensórica. Sin embargo, aún existe margen de mejora en los procesos de maquinado a través del aprovechamiento de las nuevas tecnologías y la optimización en base a un mayor conocimiento del proceso.

Debido a la flexibilidad de los procesos de maquinado para dar forma a los componentes mecánicos, su importancia industrial es muy elevada tanto desde un punto de vista económico como técnico. Actualmente es de suma importancia aumentar el rendimiento en los procesos de fabricación para mantener la competitividad y lograr una mejora necesaria para la fabricación de productos con mayor valor añadido que incrementan la complejidad de los procesos de maquinado (nuevos materiales, geometrías complejas, requisitos de calidad y precisión, etc.)

El empleo de materiales duros y difíciles de maquinar, debido a sus excepcionales propiedades tecnológicas, se encuentra muy extendido dentro de diversos sectores como el moldista, el aeronáutico o el médico. Debido a sus buenas propiedades y comportamiento en las aplicaciones más exigentes, su transformación y procesado presentan problemas que limitan la precisión y elevan los costos de producción. Por esta razón, en los últimos años, el maquinado de este tipo de materiales de una manera eficiente se enmarca dentro de los objetivos planteados en el campo de la innovación tecnológica, sin olvidar la obtención de procesos más ecológicos para cumplir las normativas medioambientales cada vez más estrictas.

La tecnología de maquinado electroquímico (ECM) se encuentra dentro del grupo de procesos de maquinado no convencionales. Las ventajas del proceso ECM

proporcionan una alternativa eficiente para la fabricación de una gran variedad de componentes como pueden ser álabes de turbina, implantes quirúrgicos, moldes, matrices e incluso microcomponentes. Los centros de micromaquinado ECM que existen en la actualidad en el mercado son muy costosos y representan una gran inversión, por eso se diseñó un centro de micromaquinado que nos permitirá realizar estudios e investigación de los parámetros de desbaste en materiales intermetálicos. Estos materiales son considerados en la actualidad como posibles sustitutos de las aleaciones metálicas, por ejemplo, en la industria aeroespacial. Algunas de las razones por las que aún no se ven aplicados en esta industria son la dificultad y el alto costo del maquinado. Por eso se buscó diseñar un centro de micromaquinado que nos permitiera desarrollar este proceso.

## **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un centro de micromaquinado por desbaste electroquímico controlado por computadora y con interfaz a un sistema CAM.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar el fenómeno de desbaste electroquímico para analizar el proceso y las variables que afectan al mismo y poder determinar el diseño óptimo de micromaquinado de materiales intermetálicos.
- Diseñar los componentes del centro de micromaquinado tales como: el sistema de posicionamiento de la herramienta (electrodo) en 3 ejes, el generador de pulsos eléctricos, el microprocesador (plataforma abierta Arduino) y la interfaz, que permitirán el control del centro de maquinado por medio de una computadora.
- Seleccionar el electrolito adecuado para el proceso de desbaste electroquímico así como el sistema de bombeo y filtrado para el mismo que garantice el flujo adecuado y libre de impurezas del electrolito.

## **HIPÓTESIS**

Es posible diseñar un centro de micromaquinado por desbaste electroquímico con interfaz CAM para estudiar los parámetros de desbaste en materiales intermetálicos.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Antecedentes

El maquinado electroquímico por pulsos es considerado como un proceso estocástico que incluye reacciones químicas complejas durante la disolución del metal. Debido a esto, resulta un tanto difícil comprender completamente el proceso. Sin embargo, es posible simplificarlo partiendo de procesos más simples. De esta manera, el proceso de remoción de material por medio de ECM puede ser visto como un proceso eléctrico (aplicación de un pulso de corriente), un proceso químico (reacciones químicas), un proceso térmico (calentamiento del electrolito) y un proceso hidrodinámico (remoción de productos del maquinado) [1].

Cuando el pulso de corriente es aplicado a dos electrodos que están sumergidos en un electrolito, se produce el intercambio de iones y átomos debido a la adición de electrones del circuito externo. Las reacciones químicas dependen tanto del material de la pieza de trabajo (peso atómico y carga iónica), como del tipo de electrolito, una solución electrolítica concentrada tiene las ventajas de una mejor conductividad y por lo tanto una tasa de penetración mayor y mayor precisión, por otro lado, una solución diluida es menos probable que se cristalice y da una superficie más suave. La energía externa suministrada acelera las reacciones químicas al proveer electrones extra que viajan al electrolito, los electrones liberan hidrógeno y crean una base. Los hidróxidos y el material de la pieza de trabajo reaccionan para crear un precipitado insoluble que cae al fondo. La disolución electroquímica ocurre durante el tiempo de activación del pulso y el electrolito se calienta (debido a la resistencia que presenta al paso de la corriente) al convertir trabajo eléctrico en calor. El flujo de electrolito retira los productos de la disolución (escoria, burbujas de gas y calor) del orificio entre el electrodo y la pieza de trabajo durante el tiempo de desactivación del pulso. En el proceso de maquinado por ECM, la acumulación de productos del maquinado dificulta el maquinado óptimo.

Para remover esos productos, el flujo de electrolito (Fig. 1) podría inducir turbulencia y de esa manera incrementar la conductividad del mismo [2].



**Figura 1 - Flujo de electrolito sobre la pieza de trabajo [3]**

El maquinado electroquímico es una técnica relativamente antigua cuyas bases fueron puestas tiempo atrás durante el siglo XIX. Michael Faraday (1791-1867) descubrió los principios del maquinado anódico de metal. Este descubrimiento de Faraday también ha establecido fundamentos para conocer mejor las técnicas de galvanoplastia y pulido electrolítico, comúnmente aplicadas hoy en la industria a nivel mundial [3].

1920-1960

En 1929 el investigador ruso W. Gussef desarrolló un proceso para maquinar metal anódicamente. Muchos años más tarde, en 1941, Burgess apareció con una publicación (Electrochemical Machining) en Electrochemical Society. En el otoño de 1959 Anocut Engineering Company estableció la técnica de maquinado

anódico de metal como una técnica comercialmente conveniente. SIFCO (Steel Improvement and Forge Company) siguió con una aplicación comercial un año después.

1960-1970

La técnica fue aplicada de muchas formas como una técnica de maquinado en los 60's y 70's. En particular, la industria de turbinas de gas usó la técnica frecuentemente. El maquinado por descarga eléctrica también estuvo en desarrollo profundamente durante este periodo, durante esa época fue una técnica más exacta y fue preferida sobre la técnica ECM, la cual era en ese entonces menos exacta y cuyos residuos creaban problemas al ambiente. Por otro lado, el maquinado electroquímico era capaz de alcanzar velocidades de maquinado mucho más altas.

## 1.2 La versatilidad de la técnica ECM de hoy

Hoy en día varias compañías utilizan la técnica ECM, una técnica que puede ser apenas comparada con la técnica de maquinado anódico que una vez fue. Donde alguna vez en el pasado la técnica perdía en exactitud y daño ambiental, hoy la técnica ECM ha sido enormemente optimizada usando lo último en desarrollo tecnológico. La técnica puede ser aplicada a una variedad de productos de metal en la industria automotriz, aeroespacial, medica, joyera, industria de impresión, textil, energética y varios otros sectores. La técnica también es frecuentemente utilizada para micro aplicaciones muy específicas como los álabes de una turbina que se muestran en la figura 2.



Figura 2 - Aplicación del ECM [3]

El maquinado electroquímico remueve material de una pieza de trabajo eléctricamente conductiva. La base de este proceso es la electrólisis, la cual es gobernada por las leyes establecidas por Faraday [3].

### 1.3 Electrólisis

La electrólisis es la reacción química que ocurre cuando una corriente eléctrica se hace pasar entre dos conductores sumergidos en una solución líquida. La solución líquida conduce la corriente a través del flujo iónico, ya que de otra forma el circuito estaría incompleto. En la figura 3 aparece un esquema de una celda electrolítica utilizando sulfato de cobre como electrolito y alambre de cobre como electrodos [2].

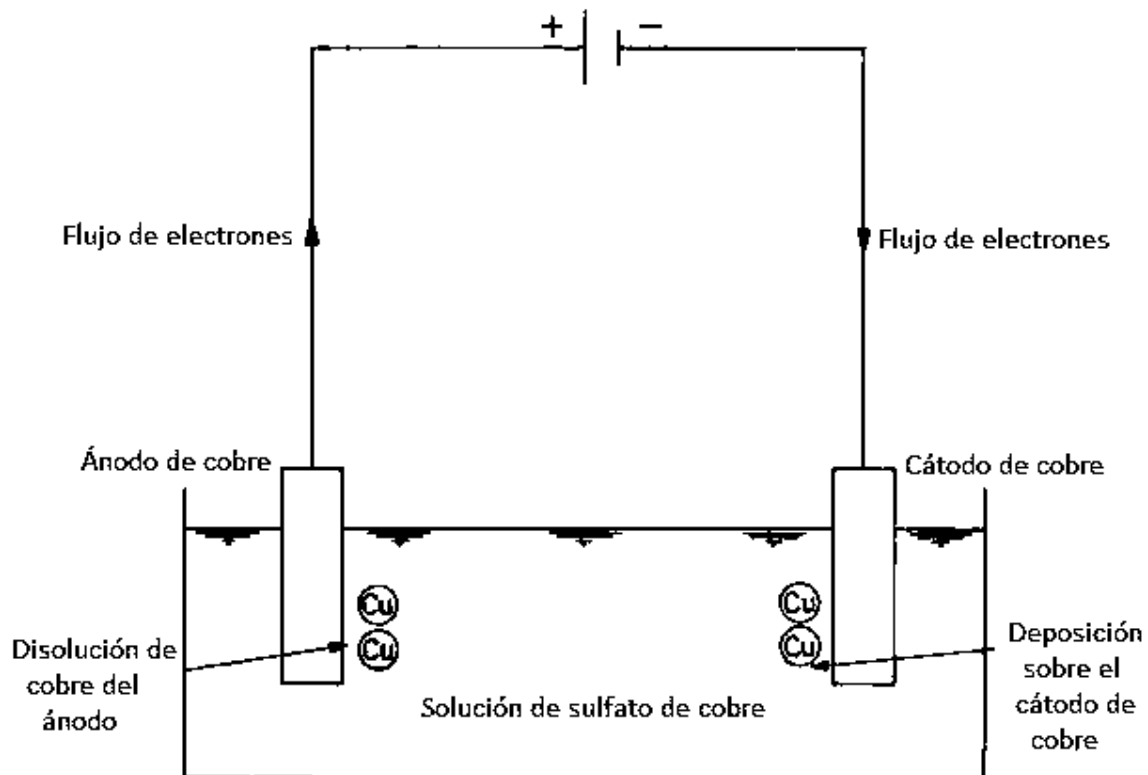


Figura 3 - Esquema de electrólisis [2]

Las reacciones químicas son llamadas reacciones anódicas o reacciones catódicas dependiendo de si éstas ocurren en el ánodo o en el cátodo, respectivamente. La principal diferencia entre los electrolitos y los conductores metálicos de electricidad es que la corriente es transportada por electrones en los metales mientras que en los electrolitos es transportada por iones. Los iones no son sino átomos que tienen tanto electrones perdidos como ganados y de ese modo adquieren una carga positiva o negativa. Cada electrodo mantiene atraídos a los iones de carga opuesta. Los iones cargados positivamente son atraídos hacia el cátodo y los iones cargados negativamente son atraídos hacia el ánodo. Ya que el electrolito debe ser neutro, debe haber un balance entre la carga positiva total y la carga negativa.

#### 1.4 Maquinado Electroquímico

El maquinado electroquímico es un proceso de remoción de material similar al electro-pulido. En este proceso, la pieza de trabajo a ser maquinada forma el ánodo y la herramienta forma el cátodo (Fig. 4) de una celda electrolítica con una solución salina que es usada como electrolito. La herramienta está hecha normalmente de cobre, bronce o acero inoxidable. La herramienta y la pieza de trabajo son posicionadas de forma tal que exista una separación de 0.1mm. a 0.6mm. entre ambos. La herramienta es diseñada de forma tal que sea el inverso exacto de la característica a ser maquinada.

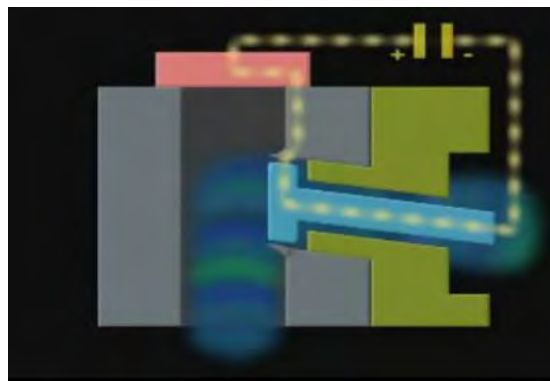


Figura 4 - Circuito de maquinado electroquímico [4]

Al aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos y subsecuentemente cuando la energía eléctrica adecuada está disponible entre la herramienta y la pieza de trabajo, iones de metal positivos se liberan de la pieza de trabajo. Puesto que son removidos electrones de la pieza de trabajo, una reacción de oxidación ocurre en el ánodo. El electrolito acepta esos electrones resultando en una reacción de reducción. Por lo tanto, los iones positivos del metal reaccionan con los iones negativos del electrolito formando hidróxidos y así el metal es disuelto formando un precipitado como se muestra en la figura 5.



**Figura 5 - Desprendimiento de iones de la pieza de trabajo [4]**

El electrolito es bombeado constantemente en la abertura entre la herramienta y la pieza de trabajo para remover los productos del maquinado no deseados, los cuales de otro modo ayudarían a crear un corto circuito entre los electrodos. El electrolito también se lleva consigo el calor y las burbujas de hidrógeno. La herramienta avanza dentro de la pieza de trabajo para ayudar en la remoción de material [2]. En la figura 6 se muestra un esquema del principio de maquinado electroquímico.

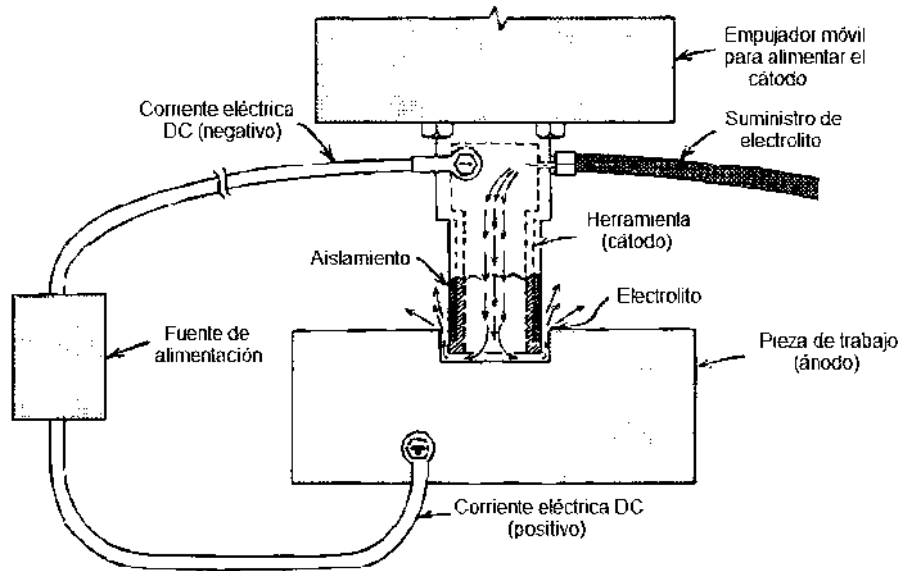


Figura 6 - Principio de maquinado electroquímico [5]

Un sistema de bombeo debe filtrar el electrolito y hacerlo circular debido a que el electrolito transporta los desperdicios del maquinado. En la figura 7 se muestra cómo se lleva a cabo el proceso de conformado de las piezas y se indica el sentido de la alimentación del electrodo y el flujo del electrolito.

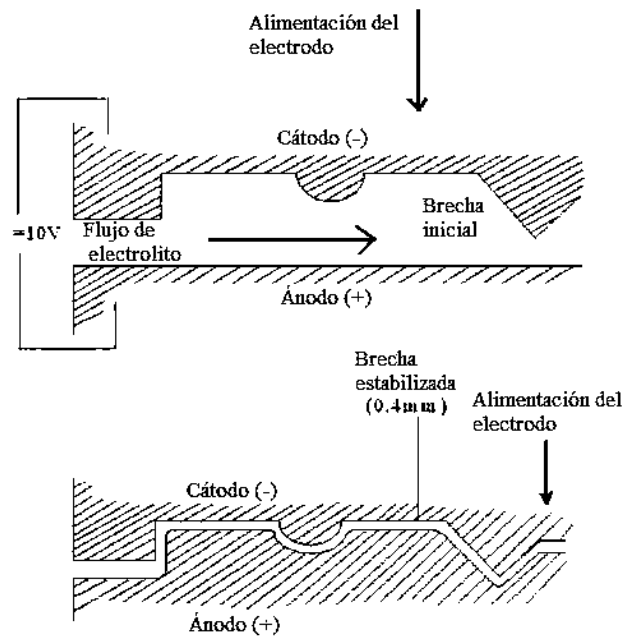


Figura 7 - Conformado mediante ECM [6]

## 1.5 Aplicaciones del Maquinado Electroquímico

El maquinado electroquímico encuentra la mayoría de sus aplicaciones en el rebabado, perforado y conformado.

### 1.5.1 Rebabado

Las rebabas son indeseables en cualquier pieza maquinada pero son al mismo tiempo inevitables. El rebabado manual de las piezas es un proceso que lleva tiempo y no es efectivo. El maquinado electroquímico con sus ventajas inherentes es una elección adecuada para el rebabado. Una herramienta de cara plana es usada para remover las asperezas en la pieza de trabajo (Fig. 8). Como la pieza se mueve lentamente hacia la superficie de la pieza de trabajo, ésta encuentra las rebabas primero. Dado que la herramienta es relativamente grande en comparación a las rebabas y las densidades de corriente son altas en los picos de las rebabas, éstas son maquinadas primero. Este es un proceso rápido y fácil de controlar.

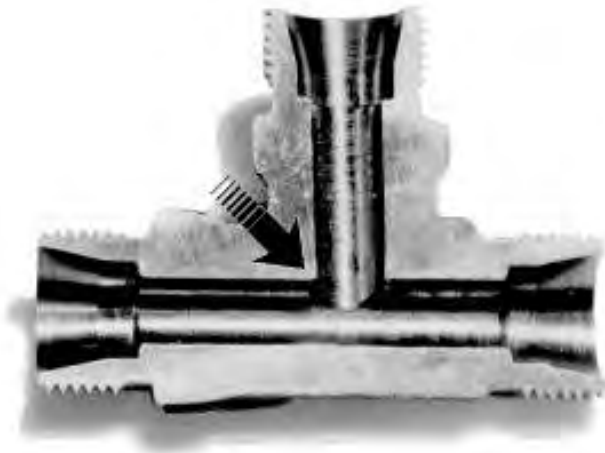


Figura 8 - Rebabado electroquímico [7]

### 1.5.2 Perforado

El maquinado electroquímico puede ser usado tanto para maquinar desde un solo agujero o series de agujeros con las mismas características (Fig. 9). La herramienta es diseñada de forma tal que existe flujo de electrolito tanto alrededor como a lo largo del electrodo o a través de un agujero en el interior del mismo para que los precipitados fluyan. La remoción de los precipitados es crucial en el perforado ya que de otra manera el material removido se acumularía y formaría un corto circuito. La mayor parte del material es removido en la abertura entre la base de la herramienta y la pieza de trabajo; sin embargo las altas densidades de corriente en la punta del cátodo remueven un poco de material a los lados del cátodo conforme la herramienta avanza dentro de la pieza de trabajo. Esto agranda el agujero porque se desprende más material mientras la herramienta avanza. Esto puede ser evitado recubriendo los lados de la herramienta con un material aislante para que el maquinado ocurra sólo en la base o punta de la herramienta.

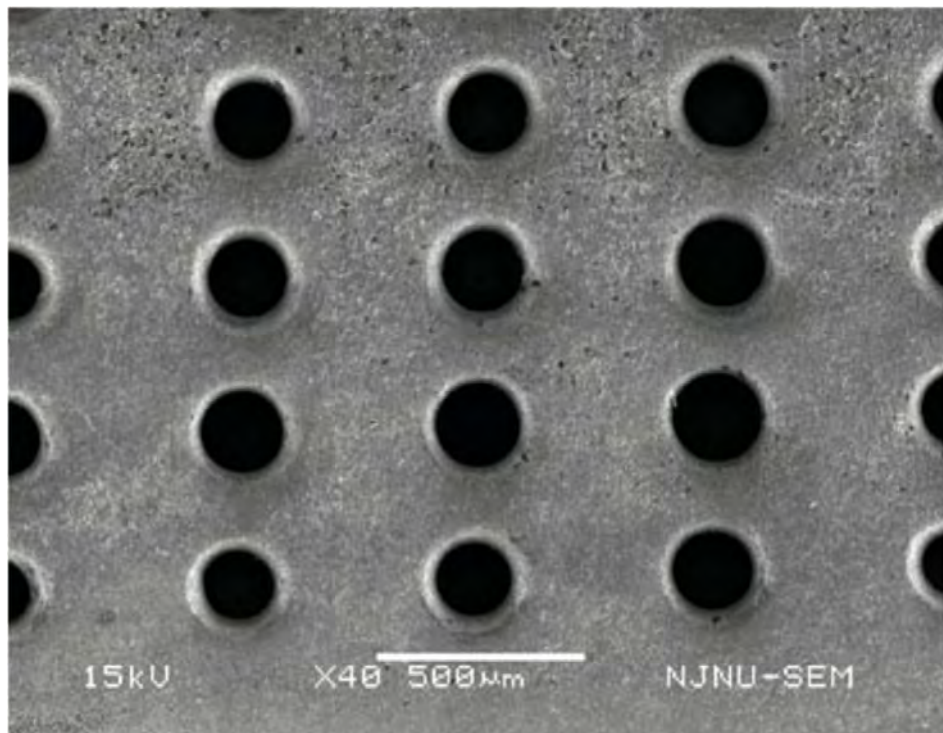


Figura 9 - Perforado electroquímico [8]

### 1.5.3 Conformado

En este proceso, se mantiene una abertura constante entre la herramienta y la pieza de trabajo, mientras la herramienta avanza dentro de la pieza de trabajo. En contraste con otros procesos, el flujo de electrolito se lleva a cabo por toda la pieza de trabajo. Este proceso es principalmente utilizado para manufacturar álabes de turbina ya que los álabes se pueden colocar cerca unos de otros como se muestra en la figura 10, incrementando la eficiencia de las turbinas.



Figura 10 - Conformado electroquímico [6]

## 1.6 Micromaquinado Electroquímico

El término micromaquinado se refiere a la remoción de material de pequeñas dimensiones en el rango de 1-999  $\mu\text{m}$  [9]. La fabricación de características de tamaño micro o de partes usando ECM es conocido como micromaquinado electroquímico (micro ECM). Hay una gran aplicación del micro ECM en la industria de los semiconductores, biomédica, automotriz, cosmética y de pinturas. Implica principalmente el uso de herramientas de tamaño micro con una brecha inter-electrodo pequeña del orden de 5-50  $\mu\text{m}$  en presencia de una fuente de alimentación pulsada y el uso de una solución electrolítica bombeada para remover los posibles productos reactivos [9]. La remoción de material de la superficie de la pieza de trabajo ocurre átomo por átomo. La industria de los semiconductores requiere el maquinado de componentes de forma compleja en aleaciones de alta resistencia. El micromaquinado electroquímico es la llave tecnológica para la tecnología de semi-conductores, electro comunicaciones, óptica, medicina, biotecnología, industria automotriz, aeronáutica y maquinaria de ultra-precisión. La figura 11 muestra algunos ejemplos de elementos logrados gracias al microECM.

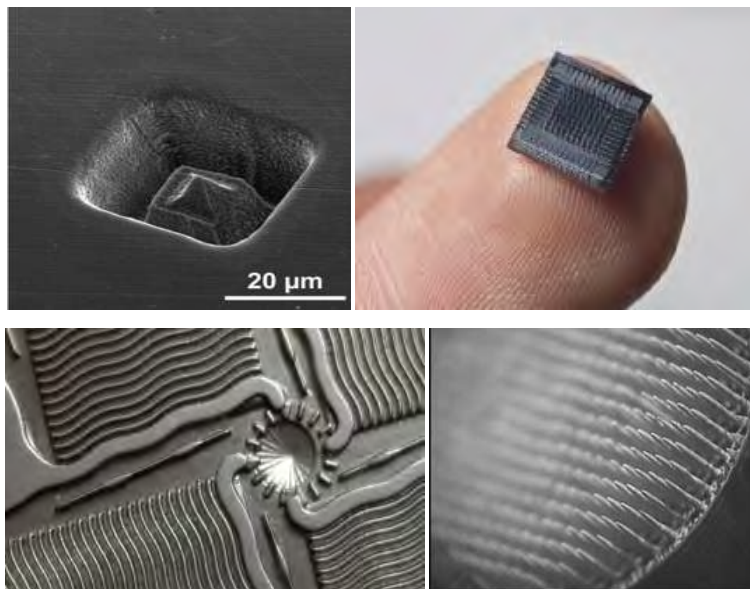


Figura 11 - Ejemplos de microECM [3]

## 1.7 Micro ECM pulsado

Un aspecto importante en el uso exitoso del micromaquinado electroquímico es el uso de una alimentación pulsada. Una corriente pulsada puede ser definida como una corriente instantánea de alta densidad seguida por un tiempo de apagado durante el cual no fluye corriente [10]. Esta serie de pulsos se repite con diferentes magnitudes de pulsos de encendido y apagado dependiendo de los requerimientos. La figura 12 muestra una representación de la corriente pulsada a 0.25A, un pulso positivo en el tiempo de encendido de 5 ms y uno invertido de 5 ms, así como un tiempo de apagado de 5 ms entre un pulso y el siguiente. La aplicación de voltaje pulsado se requiere para evitar problemas de disolución no uniforme de la pieza de trabajo y aumento de la temperatura [11]. El uso de corriente pulsada también permite la recuperación de la brecha entre el electrodo y la pieza de trabajo durante el pulso del tiempo de apagado, brindando así una disolución, precisión y acabado superficial mejorados en comparación con la corriente continua [9].

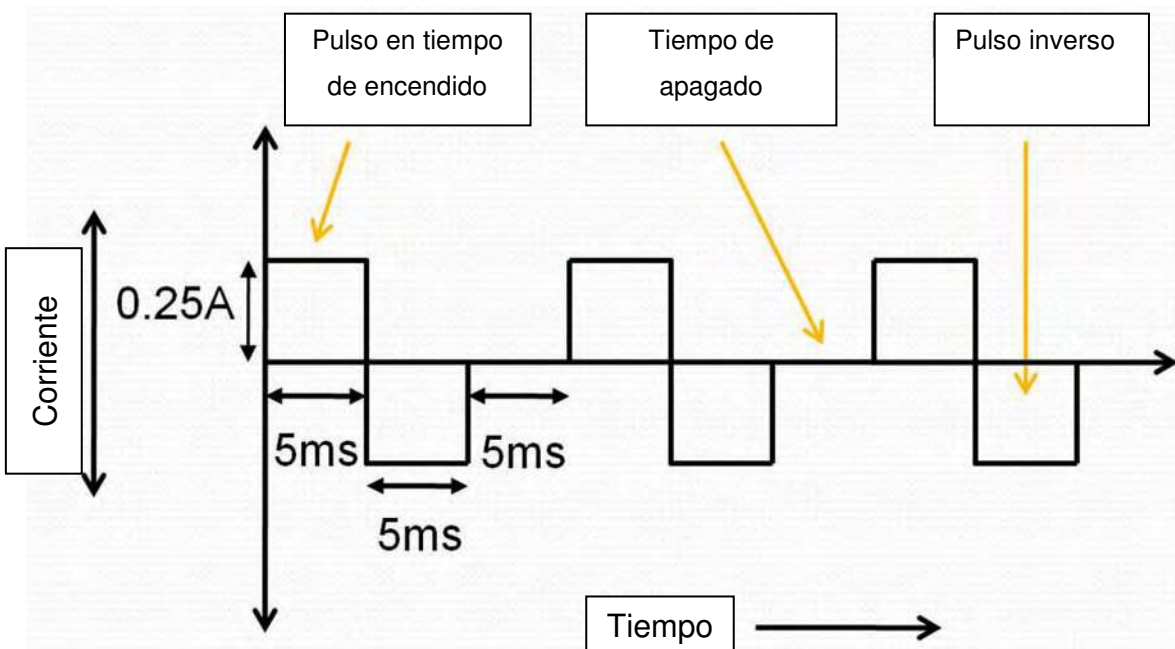


Figura 12 - Representación de la corriente pulsada respecto del tiempo [12]

## 1.8 Materiales Intermetálicos

Los primeros estudios sobre materiales intermetálicos se deben a Kurnakov y col. (1916) y se refieren a un estudio de compuestos intermetálicos del sistema Au-Cu. Pero realmente la actividad científica en este campo se inició a principios de los años 50's, aunque se produjo un importante declive a finales de los 60's por el problema de la gran fragilidad que presentaban estos materiales a temperatura ambiente. Aunque los estudios que se habían realizado hasta ese momento habían sido fundamentalmente de carácter básico, quedaba implícita la idea de sus posibles aplicaciones estructurales. A principios de los 80's, tras el descubrimiento por parte de Aoki e Izumi que pequeñas adiciones de B ductilizaban el Ni<sub>3</sub>Al, se produce un resurgimiento del interés por estos materiales y de sus posibles aplicaciones. En los últimos años la investigación y el desarrollo de los materiales intermetálicos para aplicaciones estructurales a altas temperaturas se han visto favorecidas por las demandas de la industria aeroespacial, de materiales alternativos a las superaleaciones con el objetivo de desarrollar materiales más ligeros, más resistentes y con una temperatura de trabajo superior. Estados Unidos y Japón son los países que más activamente han trabajado en la investigación y desarrollo de este tipo de materiales siendo la actividad en Europa comparativamente muy baja. La actividad desarrollada es tal que están identificados en la literatura una enorme cantidad de intermetálicos monofásicos (en algunos casos polifásicos) aunque sólo unos pocos se han considerado potencialmente candidatos para aplicaciones estructurales a intermedias y elevadas temperaturas. Los materiales intermetálicos son fases o compuestos con relaciones atómicas enteras y bien definidas con un intervalo muy limitado de composiciones posibles. Poseen una estructura cristalográfica con orden de largo alcance que en unos compuestos puede mantenerse hasta la temperatura de fusión y en otros puede desordenarse a una temperatura característica más baja. Esta estructura ordenada hace que los coeficientes de autodifusión sean menores que en una aleación desordenada, proporcionándoles una mayor estabilidad estructural a altas temperaturas y buena resistencia a la

fluencia. Combinan, además, propiedades como baja densidad, elevada resistencia mecánica a altas temperaturas y buena resistencia a la oxidación. Los principales inconvenientes son la escasa ductilidad y tenacidad a temperatura ambiente. Las propiedades mecánicas se explican por estructuras de superdislocaciones complejas que impiden el deslizamiento mediante diferentes procesos. En unos casos se forman configuraciones de núcleos de dislocaciones extendidas que producen elevadas fuerzas de fricción. También las superdislocaciones se disocian produciendo configuraciones de dislocaciones inmóviles o deslizamiento plano, lo que en definitiva provoca aumentos del límite elástico, de la velocidad de endurecimiento y de la fragilidad. Otra causa de la escasa ductilidad de policristales de estos materiales es la debilidad de las fronteras de grano [14].

Los materiales intermetálicos (Fig.13) Fe-Al han sido estudiados con interés debido a su excelente resistencia a la corrosión, principalmente a altas temperaturas, sin embargo el uso de estos materiales se ha limitado por sus bajas propiedades mecánicas a temperatura ambiente, resultando principalmente en fragilización al hidrógeno y baja coalescencia entre granos. Afortunadamente se han obtenido mejoramientos en las propiedades mecánicas mediante la modificación de la microestructura (tamaño de grano), así como la cantidad de Al en la aleación como una dependencia directa, la cual impacta también en las propiedades de la resistencia a la corrosión [15].

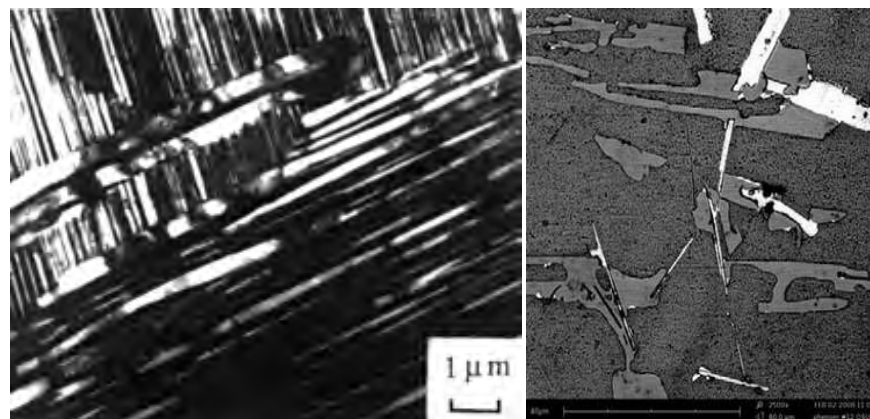


Figura 13 - Materiales intermetálicos [14]

## CAPÍTULO II

### SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

#### 2.1 Diseño de la estructura

Para diseñar el sistema de posicionamiento se tomaron en cuenta varias opciones de diseño, para fabricar la estructura donde van montados los motores a pasos, buscando que fuera funcional, práctica y acorde con las necesidades del sistema a fabricar. Se realizó el diseño que se muestra en la figura 14, mediante el programa SolidWorks.

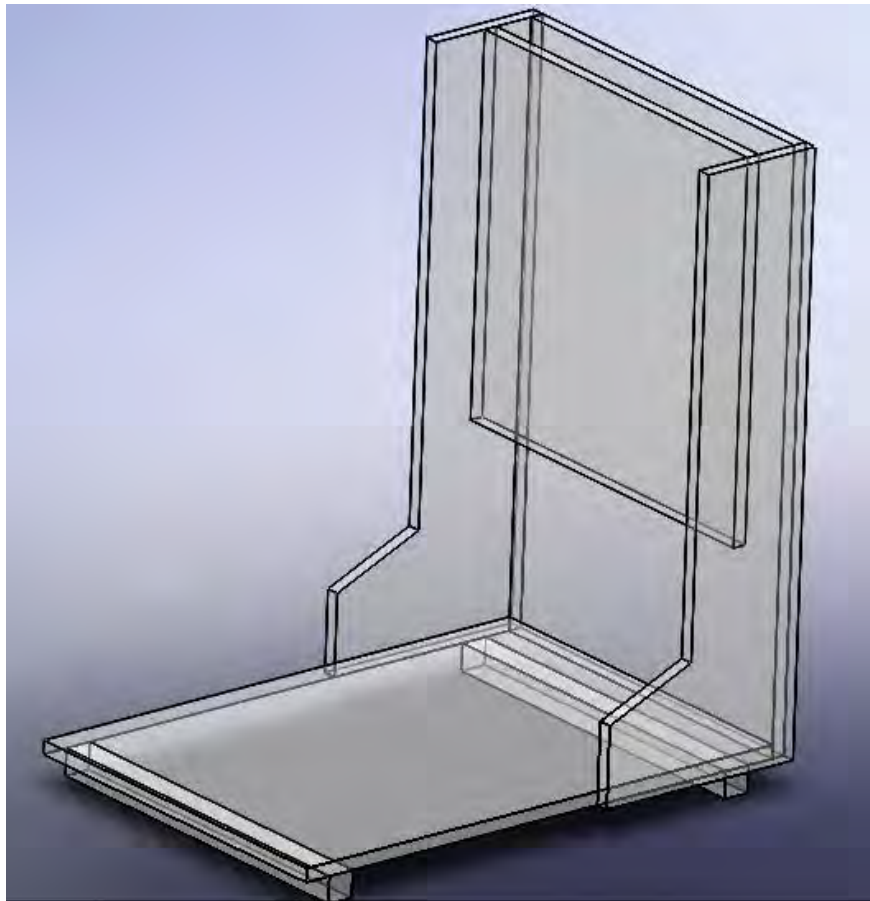


Figura 14 - Diseño de la estructura en SolidWorks

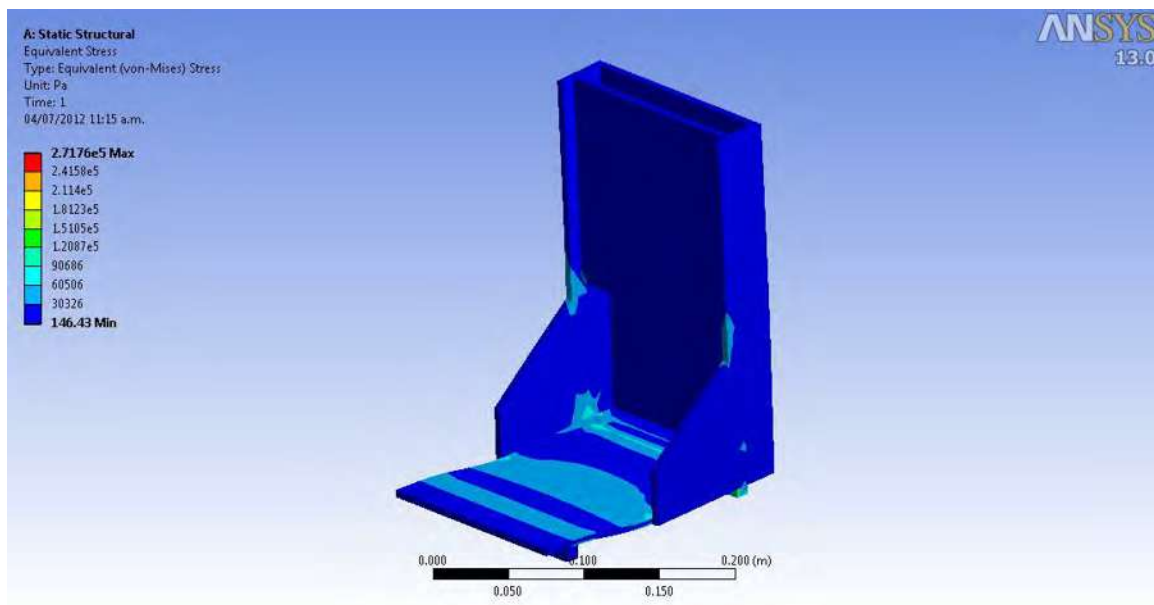
La pieza se fabricó de acrílico debido a que es un material ligero, resistente y fácil de trabajar. Las propiedades físicas del acrílico se muestran en la tabla 1.

Propiedad	Valor
Densidad	1190 Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	3.2 GPa
Coeficiente de Poisson	0.35
Resistencia a la tracción	69 MPa
Resistencia a la compresión	124 MPa

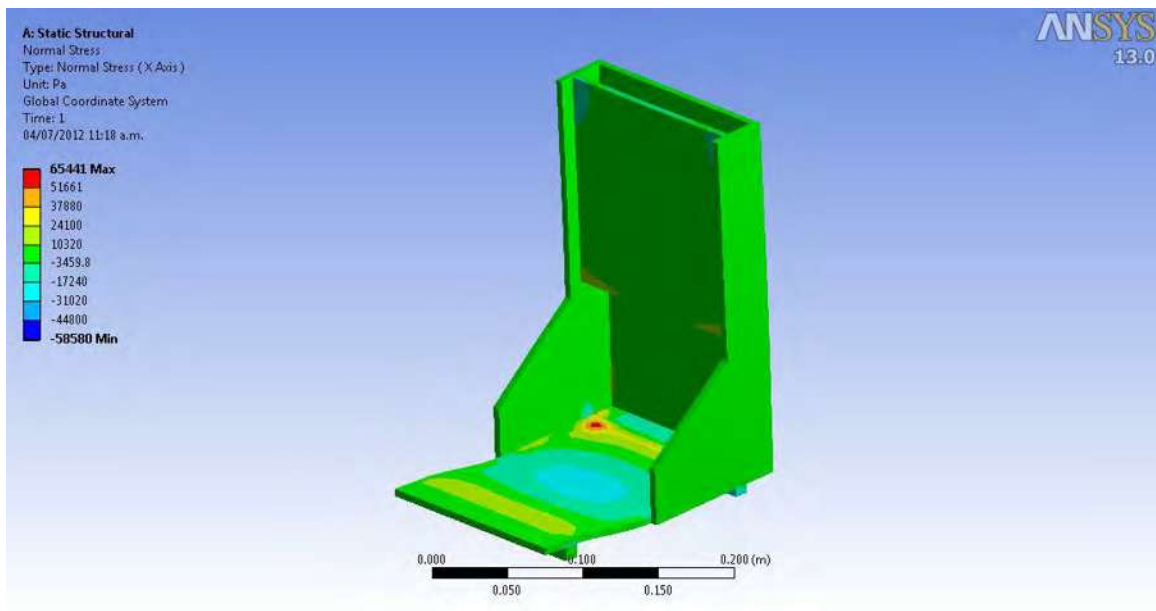
**Tabla 1 – Propiedades físicas del acrílico**

## 2.2 Análisis de elemento finito de la estructura

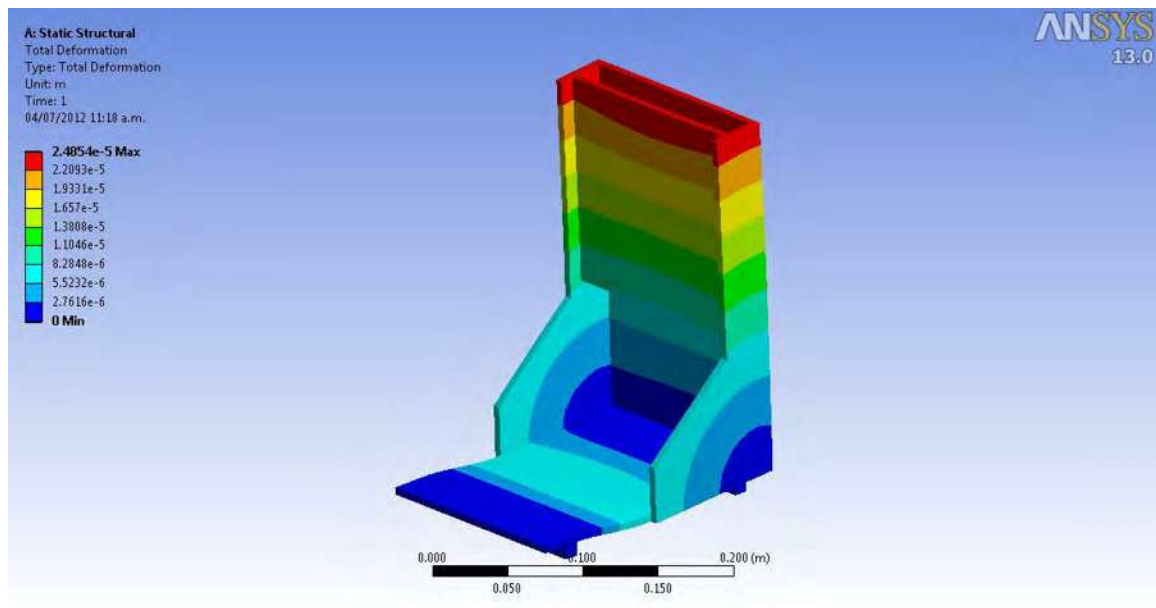
Se realizó un estudio de elementos finitos para determinar la distribución de esfuerzos en la estructura, se analizó el esfuerzo equivalente o de von Mises (Fig. 15), el esfuerzo normal (Fig. 16) y la deformación de la estructura (Fig. 17) con el peso de los mecanismos montados.



**Figura 15 - Análisis de esfuerzo equivalente (von-Mises)**



**Figura 16 - Análisis de esfuerzo normal**



**Figura 17 - Análisis de deformación**

Después de realizar estos análisis se llegó a la conclusión de que la estructura fabricada en acrílico resistía perfectamente el peso de los mecanismos que serían

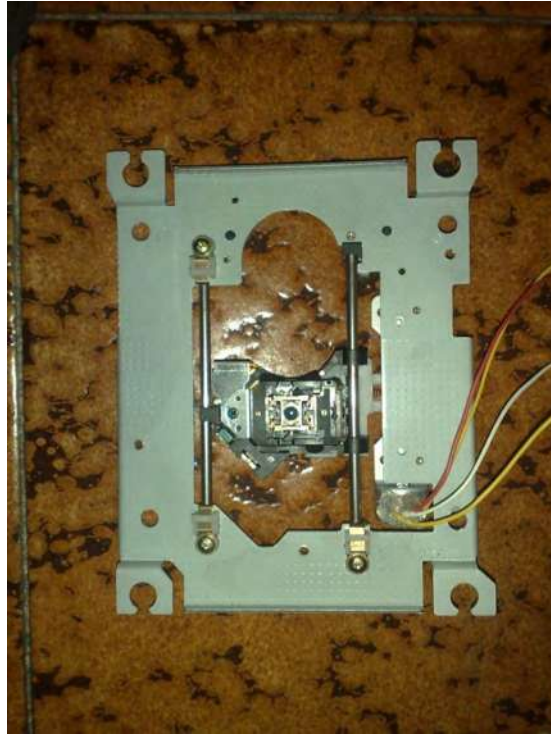
montados en ella y se procedió a su fabricación. En la figura 18 se muestra la estructura terminada.



**Figura 18 - Estructura fabricada en acrílico**

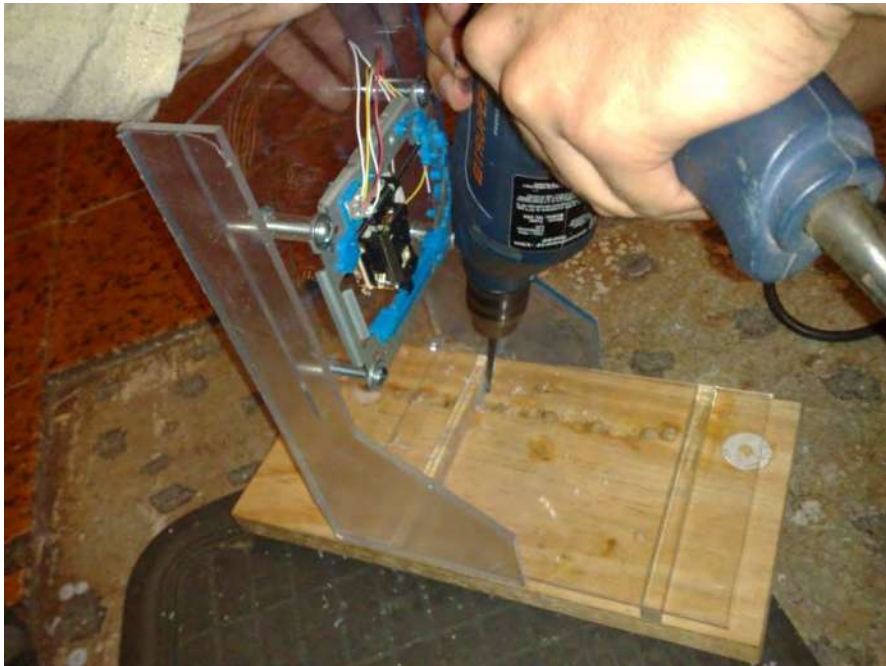
### **2.3 Selección y montaje de los motores a pasos**

Después se procedió a la selección de los motores para lograr el movimiento micrométrico en los tres ejes, se decidió usar motores a pasos acoplados a un mecanismo de tornillo sinfín que brinda una precisión aproximada de  $1.6 \mu\text{m}$  en movimiento lineal, que es aceptable para los requerimientos del sistema. A continuación, en la figura 19, se muestra una imagen de los motores y el mecanismo a utilizarse.



**Figura 19 - Motor a pasos**

En las figuras 20, 21, 22 y 23 se muestra el montaje de los motores a la base.



**Figura 20 - Taladrado de la base**

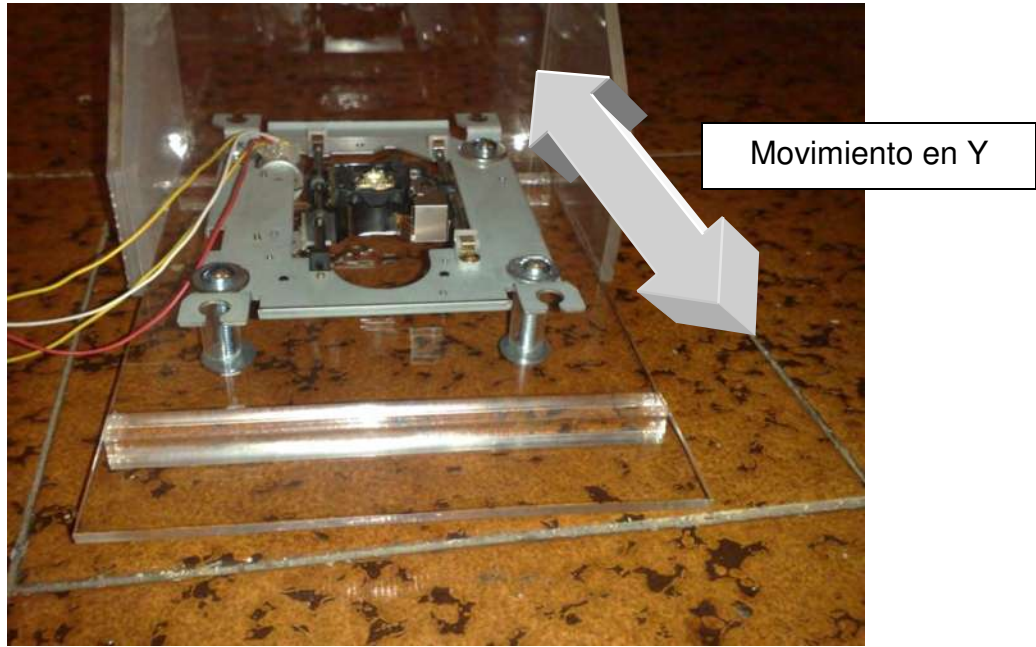


Figura 21 - Montaje del motor para el movimiento en Y

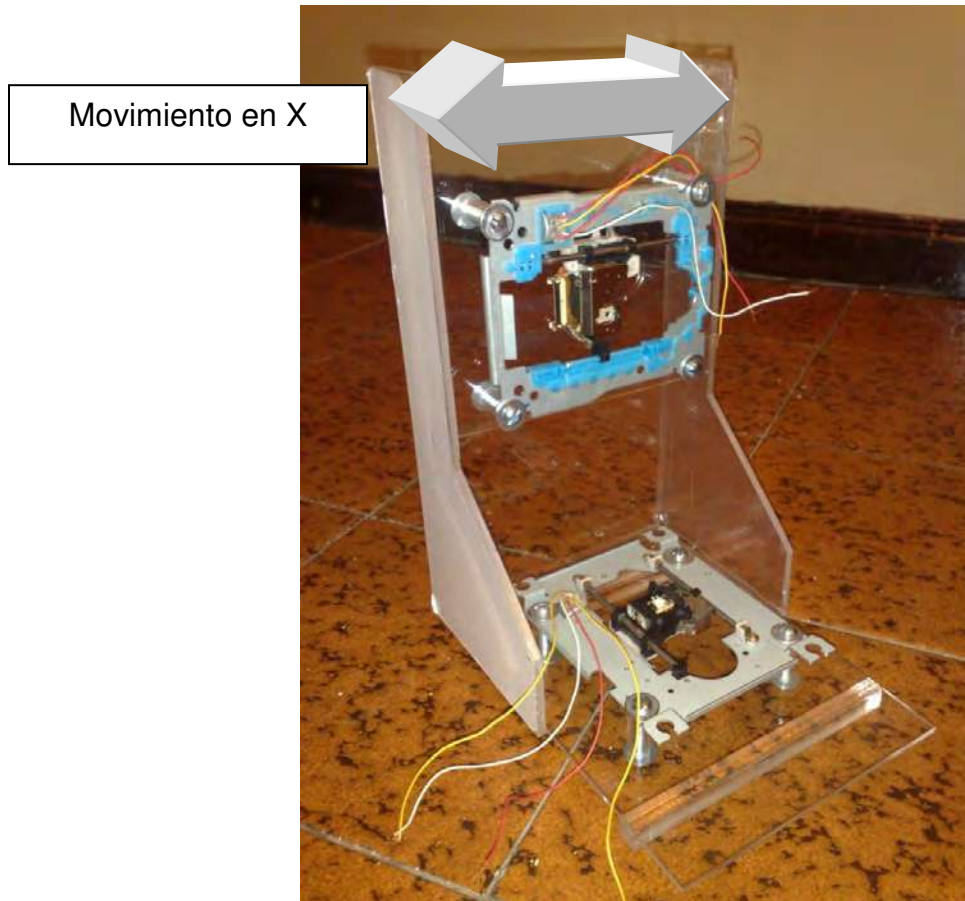
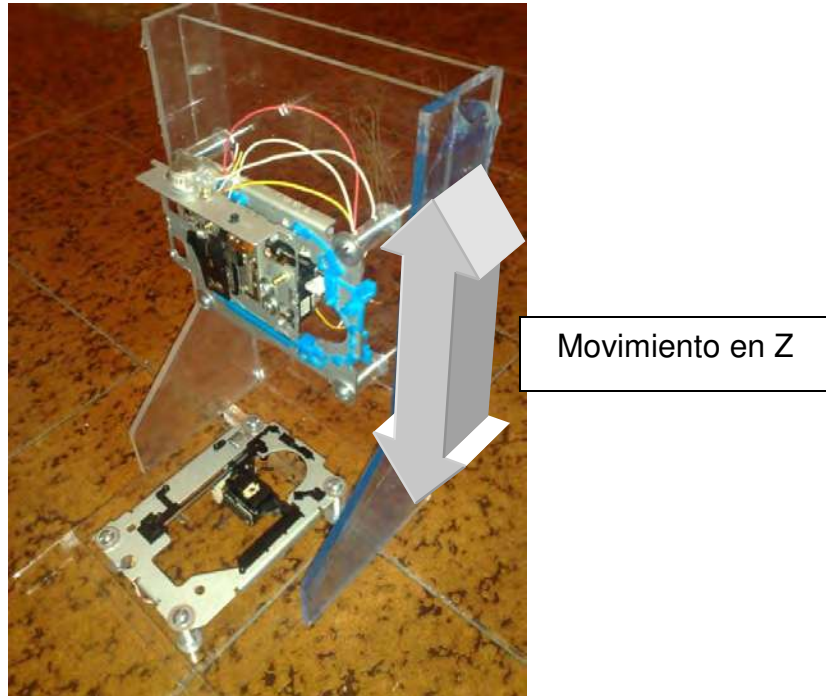


Figura 22 - Montaje del motor para el movimiento en X



**Figura 23 - Montaje del motor para el movimiento en Z**

Las dimensiones de la carrera de cada eje se muestran a continuación. Cabe mencionar que la carrera de cada uno de los ejes está delimitada por los sensores de final de carrera.

	Eje X	Eje Y	Eje Z
Carrera	45 mm	45 mm	45 mm

**Tabla 2 - Carrera de los ejes X,Y y Z**

## 2.4 Controladores de los motores a pasos

Para controlar los motores a pasos se utilizaron tarjetas Easy Driver V4.4, que son controladores para motores a pasos bipolares. Este controlador funciona para motores a pasos de 4, 6 u 8 cables, de 150 mA/fase a 750 mA/fase aproximadamente. El valor predeterminado es de 5V para Vcc, configurable a 3.3V

[26]. A continuación en la figura 24 se muestra un Easy Driver como el que se utilizó.



**Figura 24 - Tarjeta Easy Driver V4.4 [26]**

## CAPÍTULO III

### MICROCONTROLADOR E INTERFAZ

#### 3.1 Microcontrolador

Para el control del centro de maquinado se seleccionó una tarjeta Arduino Mega 2560, esta tarjeta está basada en una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos, basada en hardware y software flexible. Esta tarjeta cuenta con 54 pines de entrada/salida digital (de los cuales 14 pueden ser usados como salidas analógicas), 16 entradas analógicas, 4 puertos seriales, un cristal oscilador de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un puerto ICSP y un botón de reset [27]. Las figuras 25 y 26 muestran una tarjeta Arduino como la que se utilizó en el centro de maquinado.



Figura 25 - Frente del Arduino Mega 2560 [27]

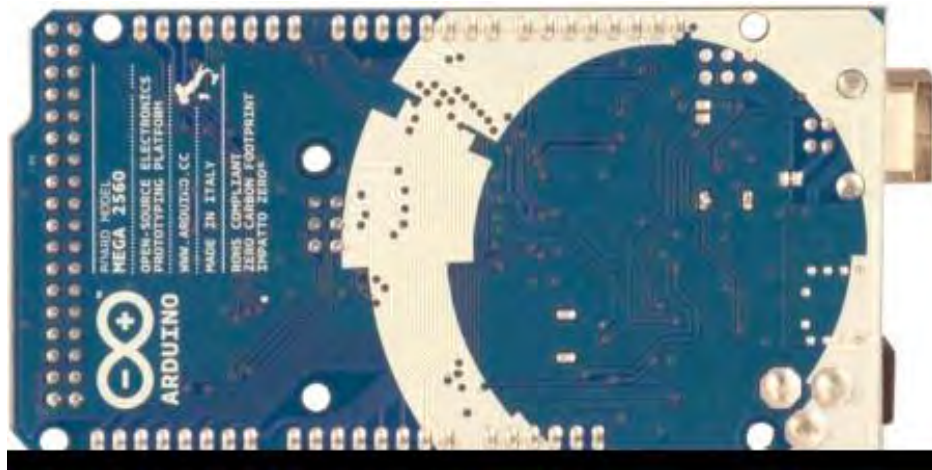


Figura 26 - Parte posterior Arduino Mega 2560 [27]

El voltaje de operación de la tarjeta Arduino Mega 2560 es de 5V, trabaja con una corriente de 40 a 50 mA y cuenta con una memoria Flash de 256 KB. El Arduino Mega puede ser alimentado mediante conexión USB o con una fuente de alimentación externa. El origen de la alimentación se selecciona automáticamente [27].

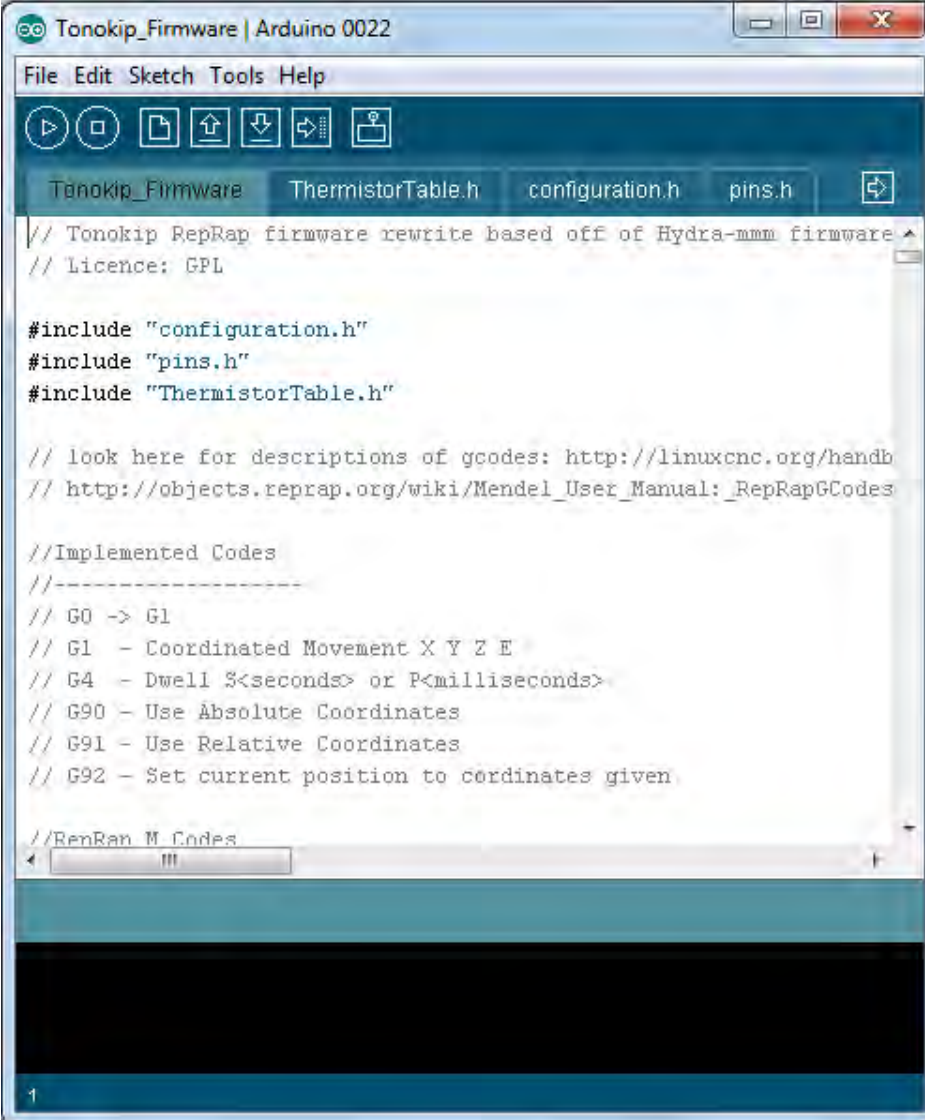
La plataforma Arduino se programa mediante el uso de un lenguaje propio basado en el popular lenguaje de programación de alto nivel Processing. Sin embargo, es posible utilizar otros lenguajes de programación y aplicaciones populares en Arduino. Algunos ejemplos son:

- Java
- Flash
- C++
- Mathematica
- MatLab
- Visual Basic.NET

Mediante la tarjeta Arduino se controla el posicionamiento del electrodo sobre la pieza de trabajo y el generador de pulsos para controlar el encendido y apagado de los mismos.

## 3.2 Interfaz

En cuanto al software de control se cuenta con el programa de Arduino y la rutina para maquinado, que vincula a la plataforma Arduino con un Software llamado RepSnapper también de código abierto, éste ayuda a convertir archivos en formato STL para pasar directamente del diseño de la pieza a su manufactura por medio de códigos G (funciones de movimiento de la máquina), como los que se utilizan en CNC. En las figuras 27 y 28 se muestran las pantallas del programa Arduino y RepSnapper respectivamente.



The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The window title is "Tonokip\_Firmware | Arduino 0022". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". Below the menu bar is a toolbar with icons for running, stopping, saving, and other functions. The main text area displays the following code:

```
// Tonokip RepRap firmware rewrite based off of Hydra-mmm firmware
// Licence: GPL

#include "configuration.h"
#include "pins.h"
#include "ThermistorTable.h"

// look here for descriptions of gcodes: http://linuxcnc.org/handb
// http://objects.reprap.org/wiki/Mendel_User_Manual:_RepRapGCodes

//Implemented Codes
//-----
// G0 -> G1
// G1 - Coordinated Movement X Y Z E
// G4 - Dwell S<seconds> or P<milliseconds>
// G90 - Use Absolute Coordinates
// G91 - Use Relative Coordinates
// G92 - Set current position to coordinates given

//RepRap M Codes
<input type="text" value="M" />
```

Figura 27 - Pantalla del programa Arduino [27]

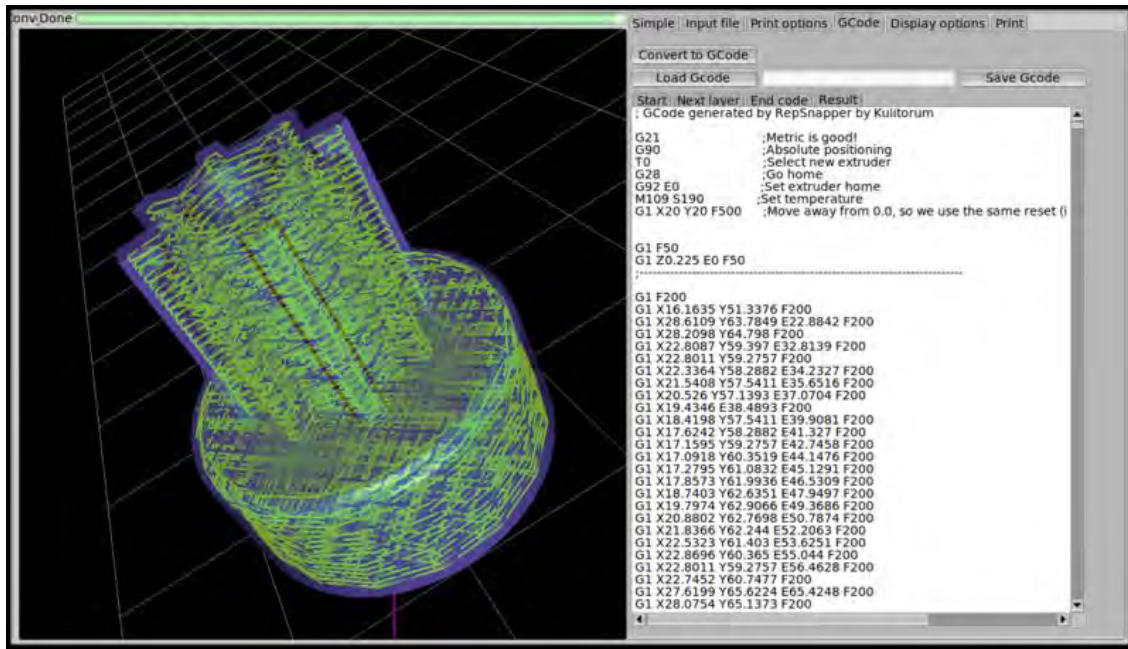


Figura 28 - Pantalla del programa RepSnapper [28]

También es posible mediante este programa realizar movimientos de los ejes paso a paso de forma manual o ingresando códigos G directamente.

Por medio del mismo programa se controla el encendido y apagado del generador de pulsos, que trabaja de manera independiente al programa Arduino.

## CAPÍTULO IV

### GENERADOR DE PULSOS

#### 4.1 Diseño del generador de pulsos

Se decidió utilizar un circuito integrado programable 16f877a (Fig. 29) para generar los pulsos independientemente a la tarjeta Arduino, éste nos brinda la facilidad de programar de una manera sencilla la frecuencia de los pulsos que necesitamos en nuestro centro de maquinado (0.1 milisegundos aprox.). También se controla el encendido y apagado de los pulsos desde la computadora y se decidió trabajar con los diferentes voltajes que brinda la fuente de alimentación de 400 W (Fig. 30) con la que se cuenta que son de 3.3, 5 y 12 Volts.



Figura 29 - PIC 16f877a



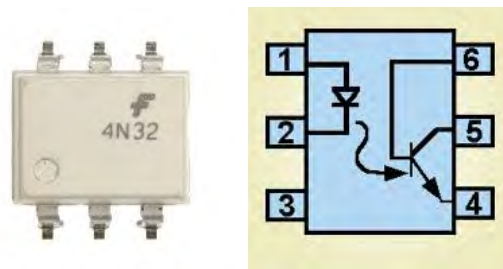
Figura 30 - Fuente de alimentación de 400W

La fuente de alimentación brinda varios niveles de voltaje y amperaje mostrados en la tabla 3.

SALIDA		+3.3V	+5V	+12V	-12V
WATTS	230	14A	15A	15A	0.3A
	250	16A	15A	16A	0.3A
	300	21A	15A	19A	0.3A
	350	21A	15A	25A	0.3A
	400	24A	15A	31A	0.3A

**Tabla 3 - Tabla de datos de la fuente de alimentación**

Con la intención de proteger nuestros circuitos y principalmente el microprocesador, se trabaja con un optoacoplador 4N32 (Fig. 31) que permite aislar los dos circuitos por medio de un acoplamiento óptico y además se trabaja con un transistor de alta velocidad TIP41c (Fig. 32) para la fase de potencia.



**Figura 31 - Optoacoplador 4N32 y su diagrama eléctrico.**



**Figura 32 - Transistores TIP41c**

## 4.2 Simulación en Proteus

Con la ayuda del programa Proteus se construyeron circuitos para simular la aplicación de la tarjeta Arduino Mega 2560 que generará los pulsos.

En la figura 33 se muestra el circuito que incluye la tarjeta Arduino Mega 2560 y el circuito integrado 16f877a. Este circuito genera los pulsos con el voltaje determinado, de acuerdo a la programación del mismo y a la capacidad del cristal de cuarzo utilizado.

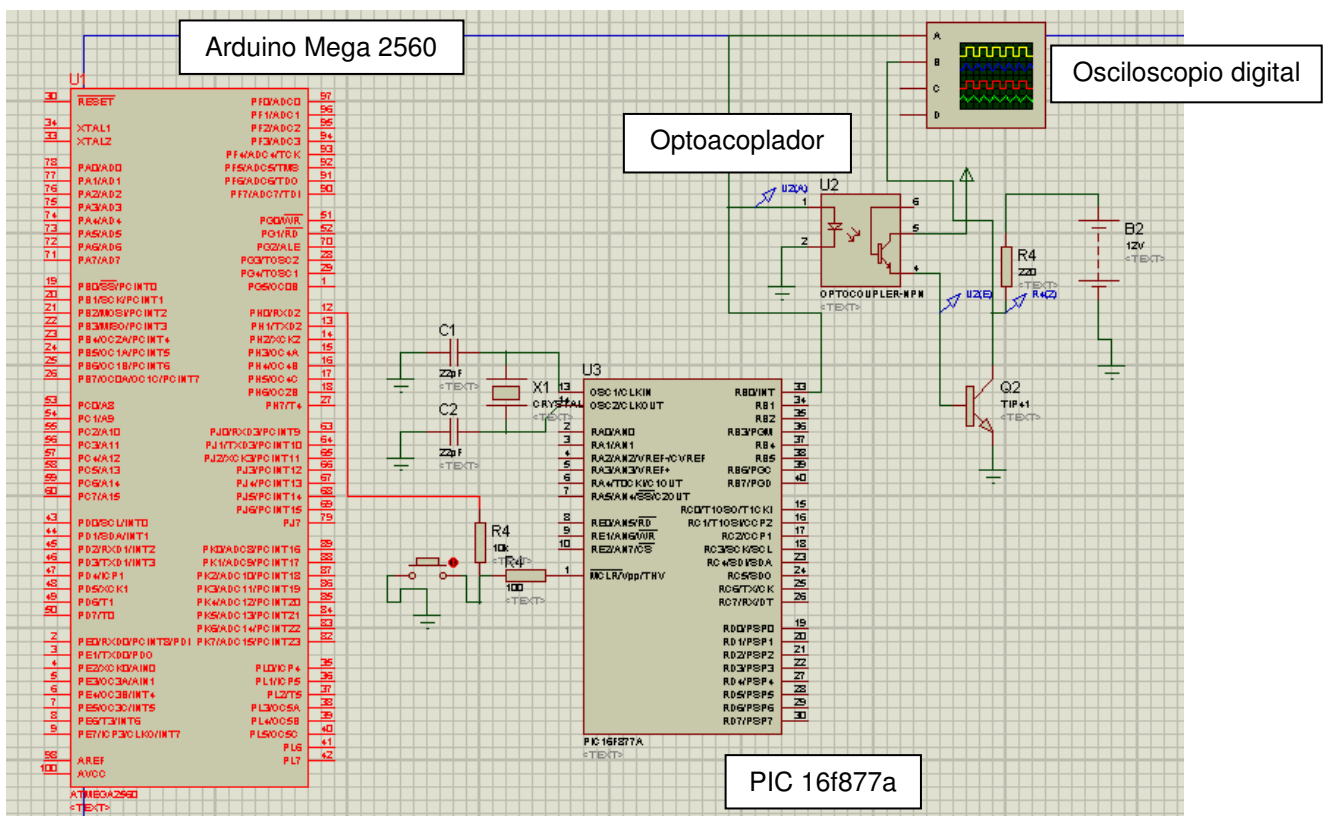


Figura 33 - Circuito generador de pulsos

En el programa Proteus se cuenta con la opción de tener un osciloscopio digital conectado al circuito, con la ayuda de éste se obtuvieron algunas imágenes de diferentes anchos de pulso. En la figura 34 se muestra la obtención de dos anchos de pulso diferentes como se observan en la pantalla del programa.

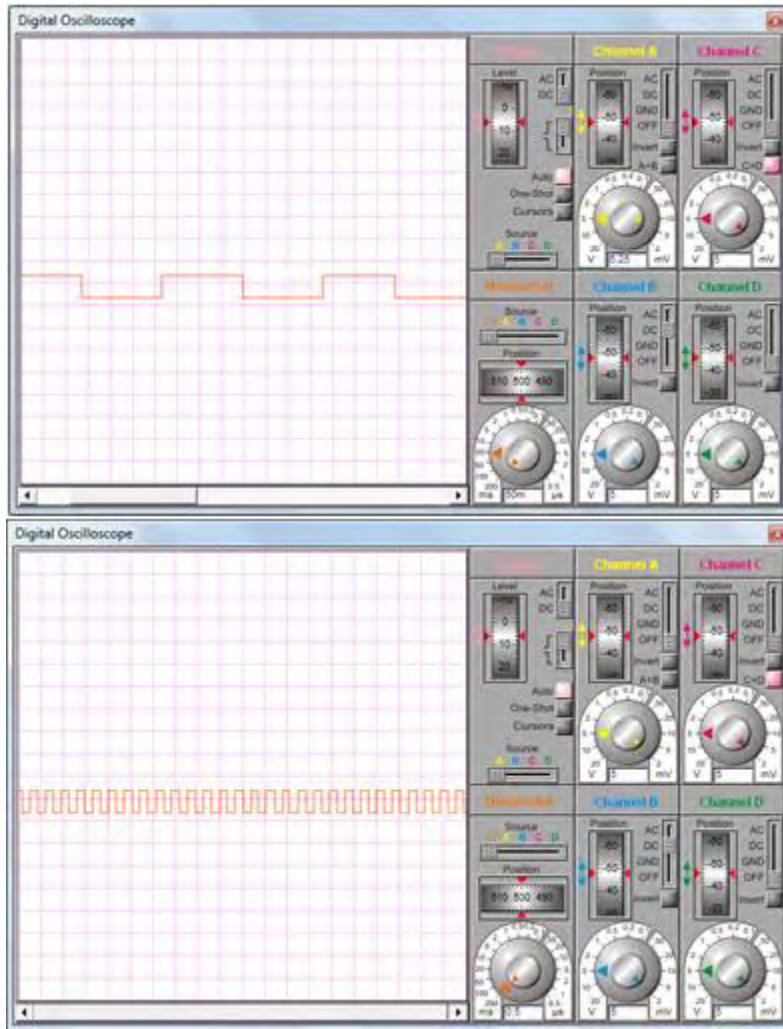


Figura 34 - Diferentes anchos de pulso

## CAPÍTULO V

### RESTO DE LOS COMPONENTES

#### 5.1 Portaelectrodo

En cuanto al portaelectrodo se seleccionó un broquero de la marca Dremel (Fig. 35) que tiene la ventaja de sujetar electrodos muy delgados (desde 0.8 mm) y es fácil de maniobrar. Por medio de soldadura se fijó a un espárrago que nos permite colocarlo a diferentes alturas con respecto al eje X brindando la posibilidad de trabajar con electrodos de diferentes longitudes (Fig. 36).



Figura 35 - Broquero Dremel



Figura 36 - Portaelectrodo

#### 5.2 Electrodo

Como electrodos se utilizaron alambres de diferentes calibres hechos de molibdeno (Fig. 37) y de latón para observar los resultados con ambos materiales.

El electrodo debe estar aislado eléctricamente para que sólo conduzca la corriente por la superficie inferior que será la que esté más próxima a la pieza de trabajo y es la que brinda la forma deseada de maquinado, por lo tanto se utiliza resina epóxica para aislarlo.



Alambre de latón, fabricado por GF Agie Charmilles Asia, 0.25 mm. de diámetro, 900 N/mm<sup>2</sup>



Alambre de latón, fabricado por Celectro, 0.25 mm. de diámetro, 970 N/mm<sup>2</sup>



Alambre de molibdeno, fabricado por Changkai Industrial, 0.18 mm. de diámetro.

**Figura 37 - Alambres utilizados como electrodos**

### 5.3 Finales de carrera

Se utilizan con la finalidad de delimitar la carrera total de cada uno de los ejes de la máquina; cada uno de los ejes cuenta con dos sensores que determinan el inicio y el final de la carrera del motor. Una vez que el motor activa cualquiera de los dos sensores, éste deja de moverse en esa dirección, además el sensor de inicio de carrera nos ayuda a mandar la máquina a su posición de inicio o “Home”. Para éstos se utilizaron interruptores de palanca (Fig. 38) y ópticos (Fig. 39).



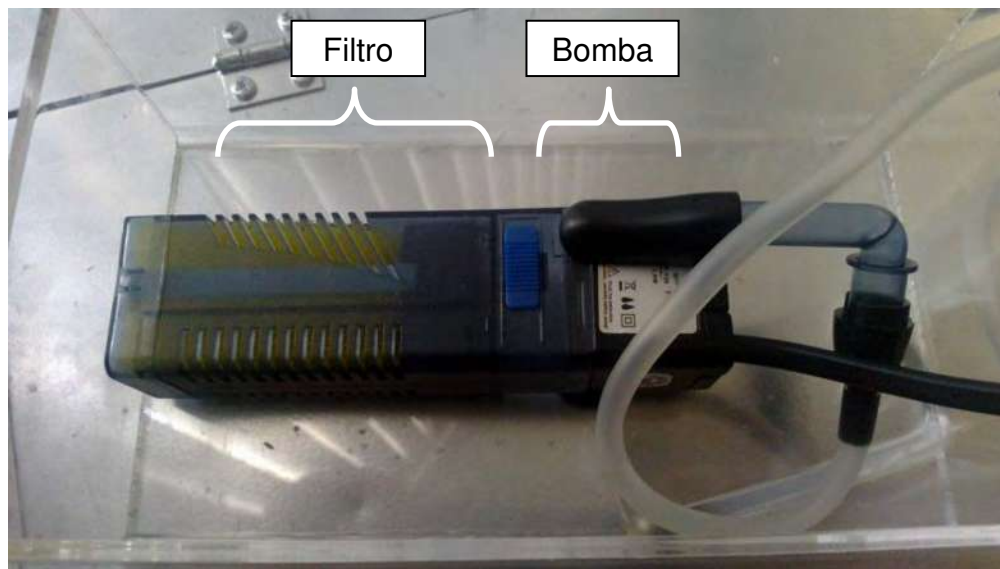
**Figura 38 - Interruptor de palanca**



**Figura 39 - Interruptor óptico**

#### **5.4 Sistema de bombeo y filtrado**

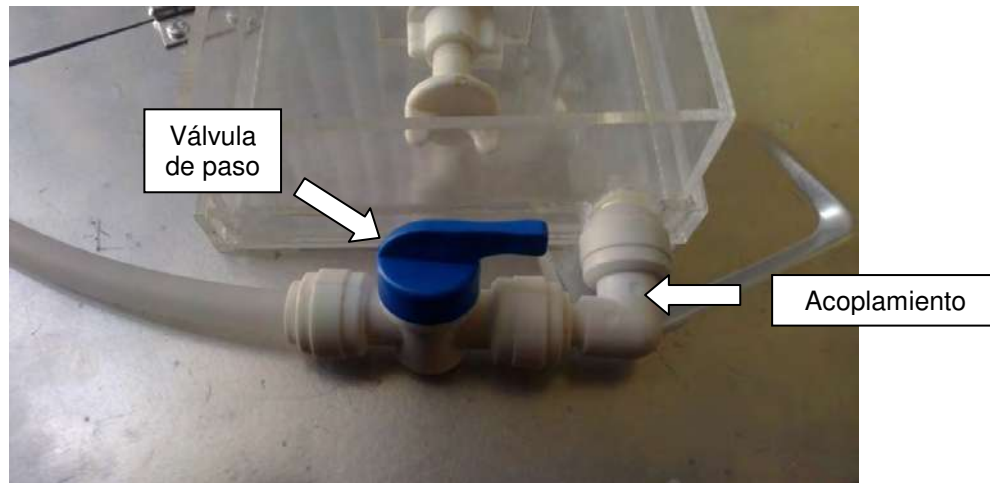
Para el sistema de bombeo y filtrado se decidió utilizar una bomba que cuenta con un filtro integrado. El motor es completamente sumergible, trabaja con un eje de cerámica de alta duración y brinda la ventaja de trabajar con agua que contenga sales disueltas, la misma brinda un caudal de 150 litros/hora. En la figura 40 se muestra la imagen de la bomba utilizada.



**Figura 40 - Bomba y filtro**

También se cuenta con mangueras de 1/8" para la alimentación hacia la tina donde se lleva a cabo el maquinado, otra manguera de 3/8" para la descarga del

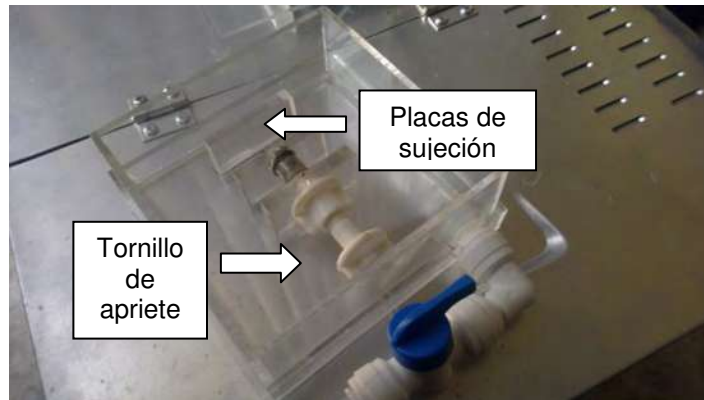
electrolito desde la tina de maquinado hasta la de almacenamiento, un cople y una válvula para regular la descarga de la tina de maquinado (Fig. 41) y así garantizar que en la tina de maquinado se mantenga un mismo nivel de electrolito ya que es necesario que la pieza de trabajo esté siempre sumergida en el electrolito para lograr el maquinado.



**Figura 41 - Válvula y acoplamiento para la manguera de descarga**

### **5.5 Tinajas de maquinado y de almacenamiento**

Para que el proceso de maquinado electroquímico sea llevado a cabo es necesario que la pieza de trabajo esté sumergida en el electrolito, para lo cual se diseñó una tina en la que se colocó un sistema de sujeción para las probetas con las que se trabajó. La tina se fabricó de acrílico transparente para poder observar el proceso de maquinado sin problemas. Para el sistema de sujeción se utilizó un tornillo de plástico para evitar cualquier tipo de conductividad no deseada en el proceso y unas placas pequeñas de acrílico para presionar la pieza de trabajo y mantenerla fija durante el proceso (Fig. 42).



**Figura 42 - Tina de maquinado**

Por otro lado para garantizar el abasto de electrolito libre de residuos de maquinado y llevar a cabo la recirculación del mismo, se construyó una tina de almacenamiento de electrolito en la cual se colocó la bomba junto con el filtro (Fig. 43). Desde esta tina se bombea el electrolito filtrado y libre de impurezas hacia la tina de maquinado y después por gravedad, el electrolito regresa a la tina de almacenamiento para ser filtrado nuevamente y así completar el circuito.



**Figura 43 - Tina de almacenamiento**

## 5.6 Electrolito

Se trabajó con una solución de agua destilada y Cloruro de Sodio al 10% como electrolito (Fig. 44). Su conductividad es de  $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ , que equivale a cerca de 0.6 mg de NaCl por kg de agua a  $25^\circ\text{C}$ .

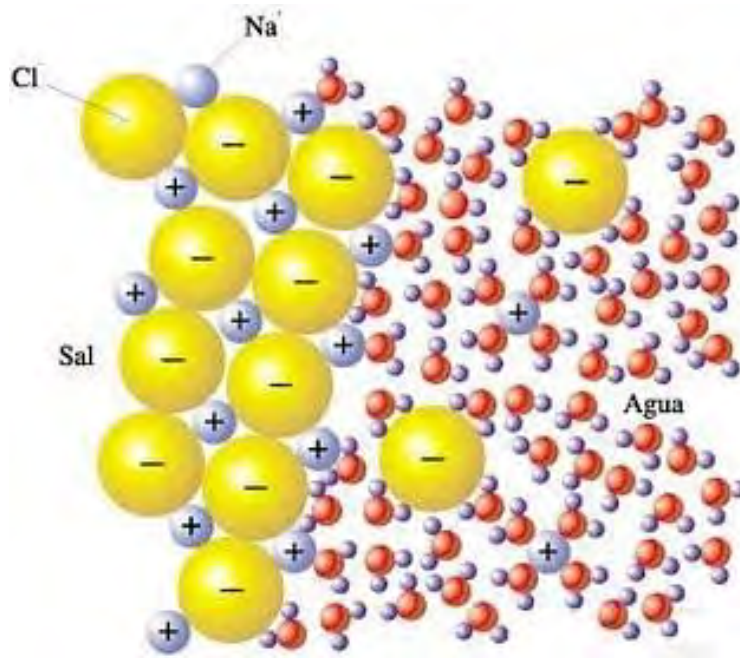
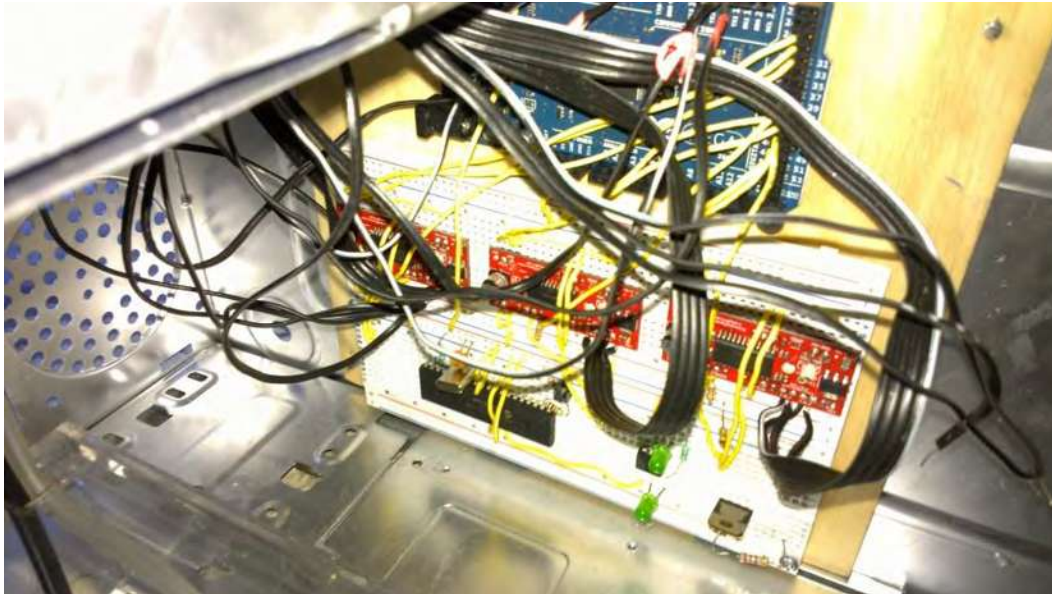


Figura 44 - Solución de agua y Cloruro de Sodio (NaCl) [30]

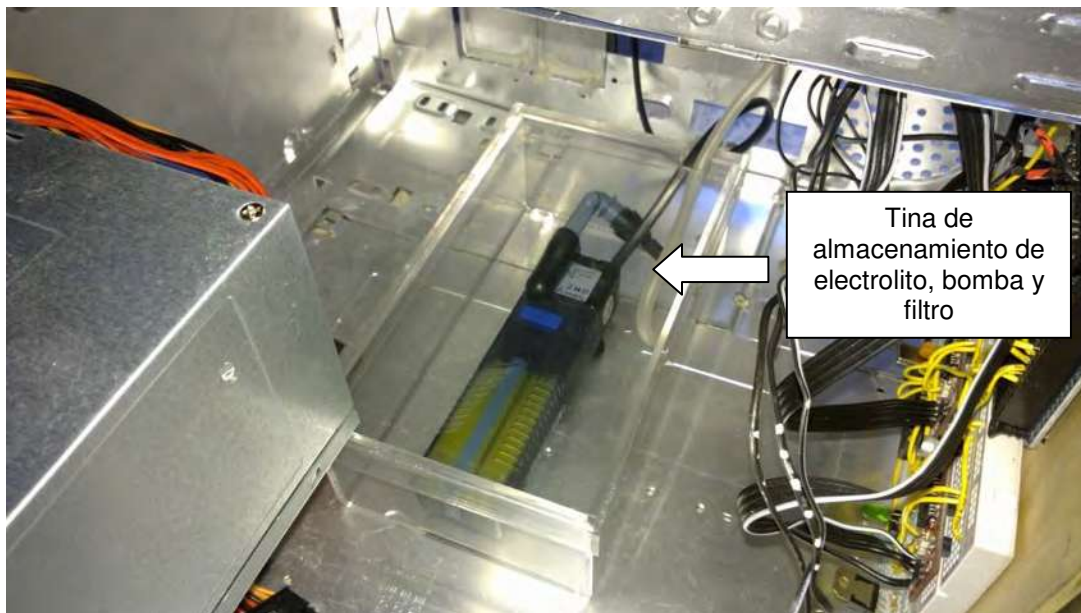
## 5.7 Estructura del centro de maquinado

Debido a que se cuenta con varios componentes en el centro de maquinado, se buscó la forma de integrarlos juntos para hacer la máquina más práctica y fácil de manejar y brindar seguridad al operador de la misma, además de hacerla fácil de transportar, para esto se adaptó un gabinete donde se montaron todos los componentes. En su interior se colocaron los circuitos electrónicos (fig. 45), la tina de almacenamiento, la bomba con el filtro (fig. 46) y la fuente de alimentación (fig. 47). En su parte superior se montó el sistema de posicionamiento de la máquina (fig. 48) que a su vez sostiene al portaelectrodo y al electrodo, la tina de

maquinado y por consiguiente a la pieza de trabajo (fig. 49). De esta forma queda integrado el centro de maquinado ECM (fig. 50).



**Figura 45 - Circuitos electrónicos**



Tina de almacenamiento de electrolito, bomba y filtro

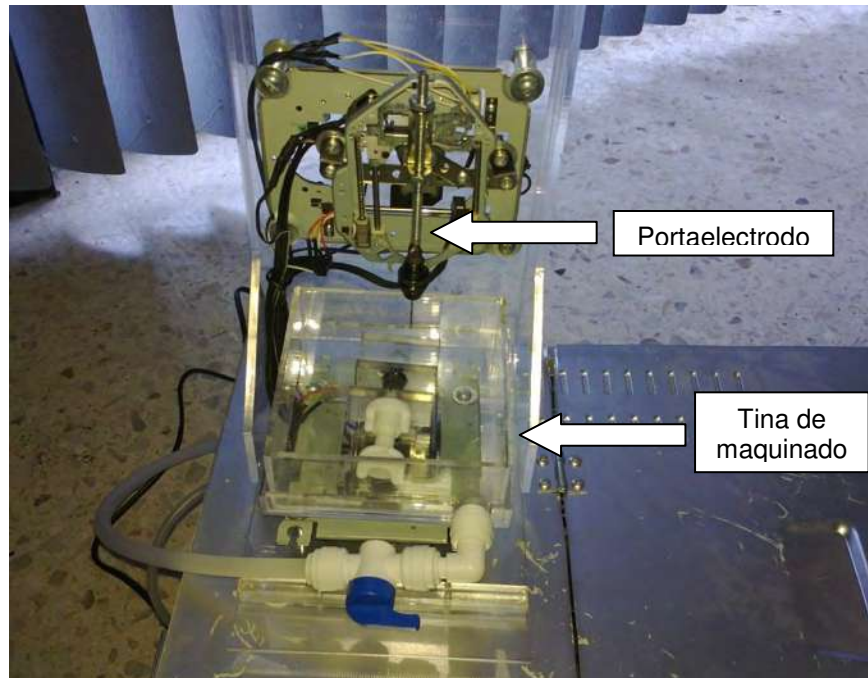
**Figura 46 - Tina de almacenamiento, bomba y filtro**



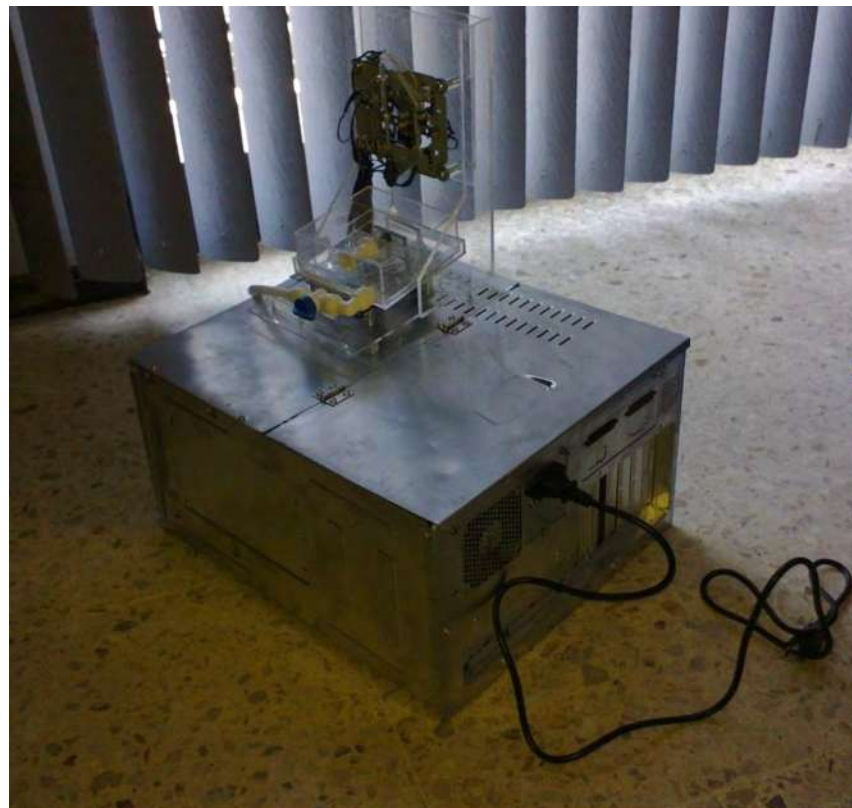
**Figura 47 - Fuente de alimentación**



**Figura 48 - Sistema de posicionamiento**



**Figura 49 - Portaelectrodo y tina de maquinado**



**Figura 50 - Centro de maquinado ECM**

## CAPÍTULO VI

### PREPARACIÓN DEL MATERIAL INTERMETÁLICO Y PRUEBAS

#### 6.1 Preparación del Material Intermetálico Fe-Al

Para la preparación del material de trabajo, que es un material intermetálico Fe-Al al cuál se adicionó un 0.5% de plata, se realizó una fundición en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH, a continuación en la figura 51 se observan algunas imágenes del proceso de fundición y moldeo. Se llevó a cabo la fundición con un 60% de hierro y un 40% de aluminio, posteriormente se agregó un pequeño porcentaje de plata, con esto se busca mejorar las características físicas del material al disminuir el tamaño de grano respecto de una aleación sin plata, el material fundido se vació en moldes de cobre y de esta forma se obtuvieron lingotes del material intermetálico como el que se muestra en la parte inferior derecha de la figura.



Figura 51 - Proceso de fundición

## 6.2 Pruebas de Difracción de Rayos X

Una vez obtenido el material se cortaron algunas muestras pequeñas (Fig. 52), después se lijaron para obtener una superficie plana y se llevaron a cabo algunas pruebas en el difractómetro de rayos X para comprobar que las fases obtenidas coincidieran con los resultados esperados.



**Figura 52 - Probeta de material intermetálico Fe-Al**

Por medio del difractómetro de rayos X se obtuvo la siguiente gráfica (Fig. 53), en la cual se muestra que las fases coinciden con un material  $\text{Al}_{0.4}\text{-Fe}_{0.6}$  y a pesar de que se le agregó un porcentaje pequeño de plata, ésta no aparece en el gráfico, lo que nos indica que pasó a formar parte de la estructura cristalina junto con los otros materiales. Los picos de la gráfica nos indican las posiciones de las reflexiones, es decir, los valores de  $2\theta$  a los que se producen las reflexiones de los rayos X y que varían dependiendo de la composición de cada material que se analiza [31].

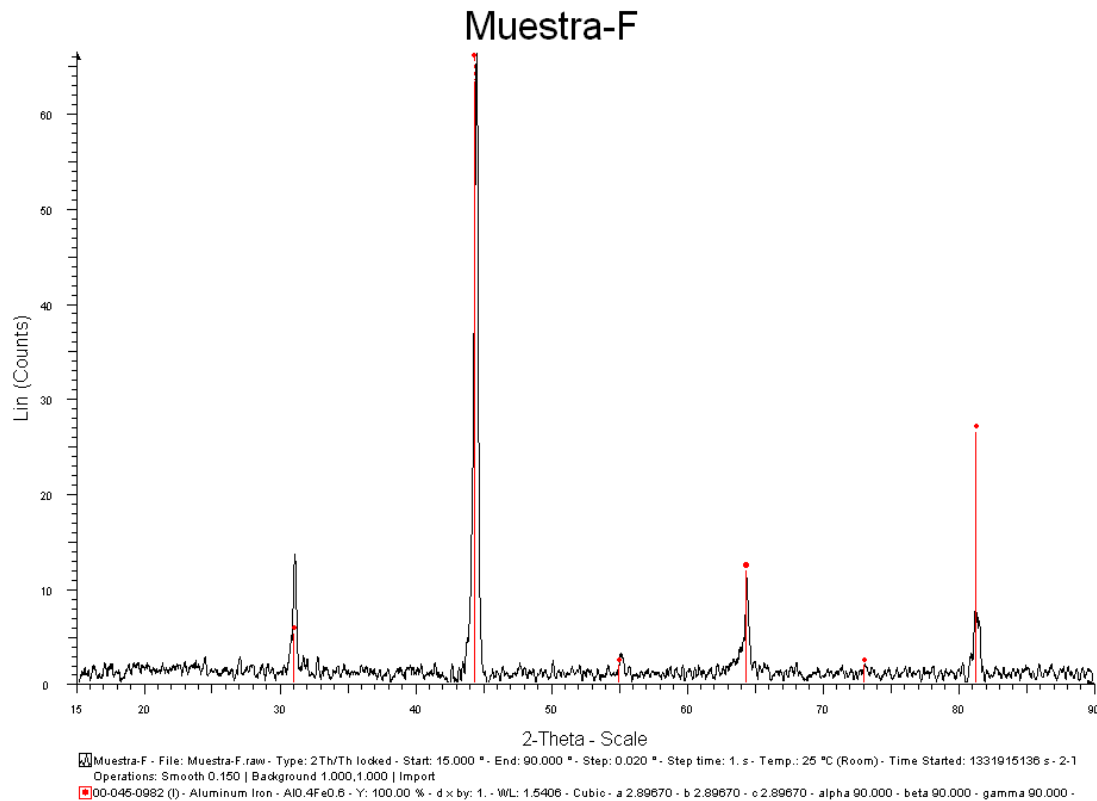


Figura 53 - Gráfica del material intermetálico obtenida con el difractómetro de rayos X

### 6.3 Obtención de imágenes en el microscopio óptico

Con el fin de observar el tamaño de grano del material intermetálico obtenido, se llevó a cabo una preparación de las probetas mediante el pulido por medio de paños y una pasta abrasiva diamantada con lo cual se logra un acabado espejo del material (Fig. 54 y 55). Enseguida se atacó el material por medio de un compuesto denominado Keller hecho a base de agua, ácido nítrico, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico.

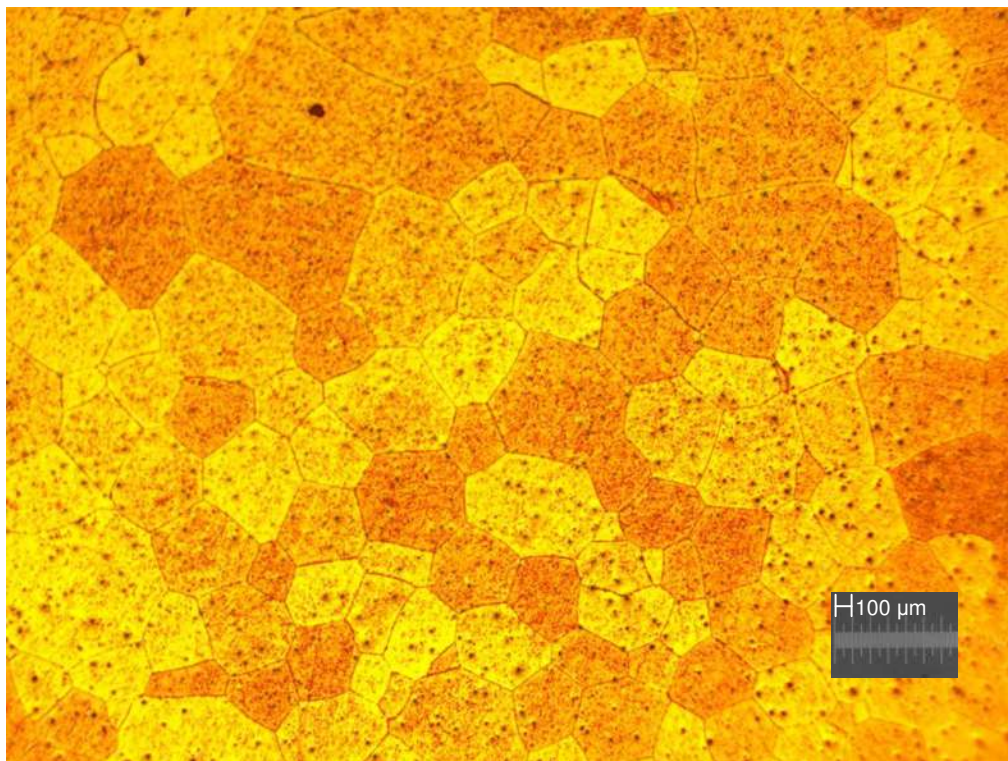


**Figura 54 - Pulidora metalográfica**

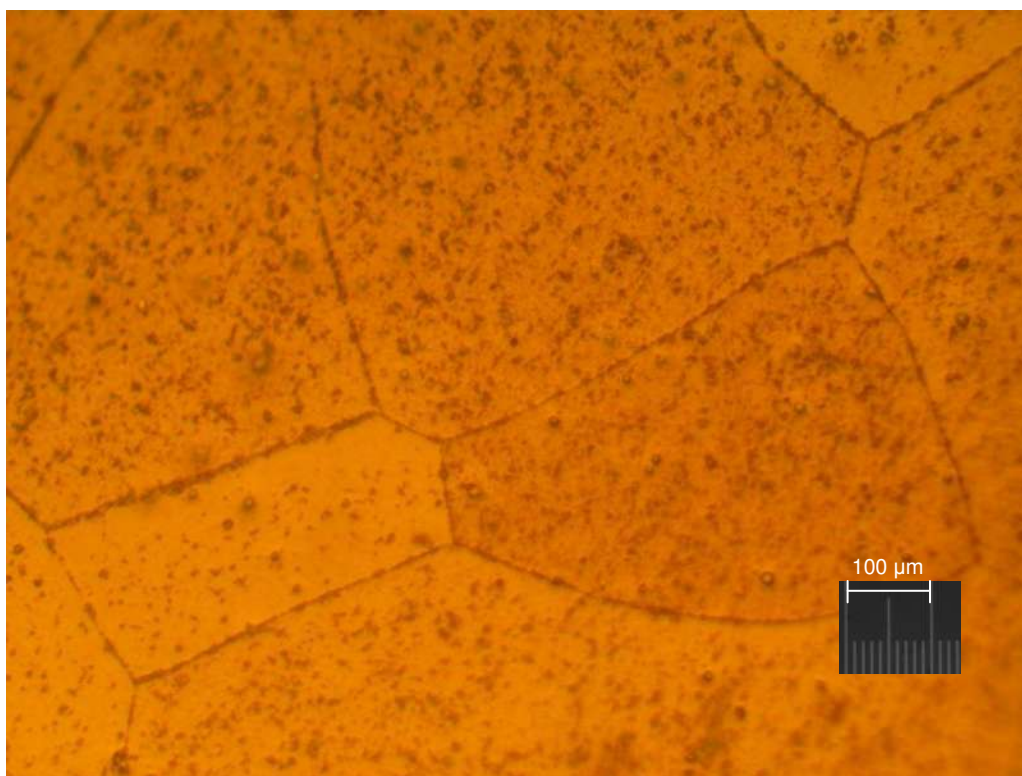


**Figura 55 - Proceso de pulido con paño**

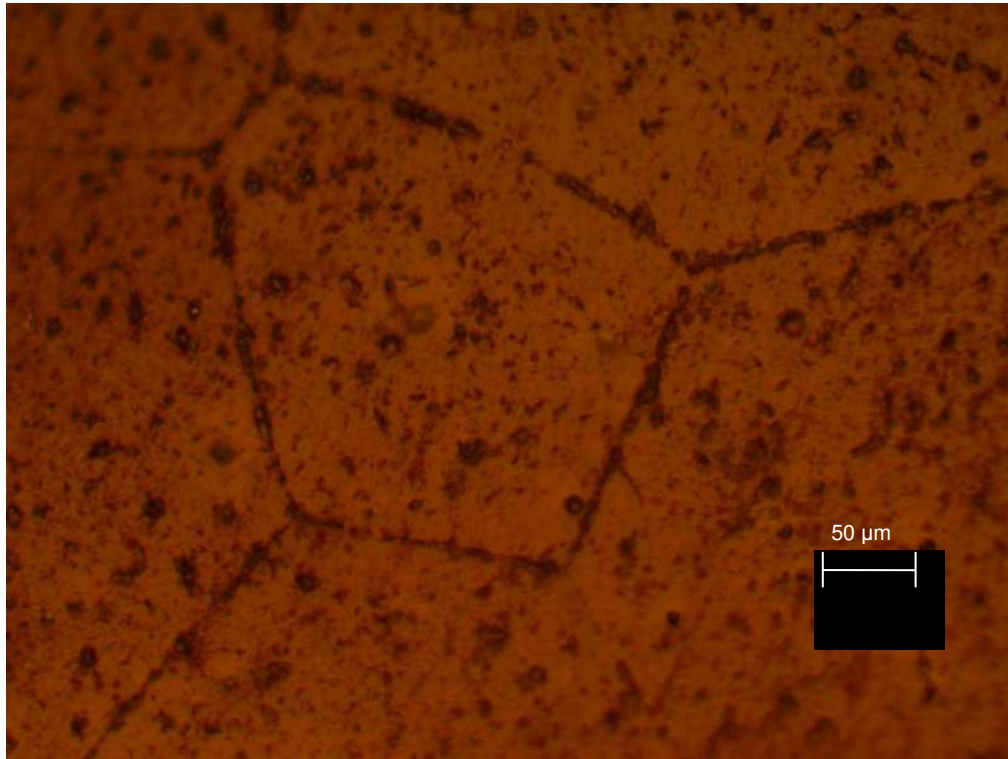
Después de ser atacadas, las probetas se observaron mediante el microscopio óptico con diferentes aumentos, a continuación se muestran algunas de las imágenes obtenidas a diferentes escalas: 100x, 500x y 1000x (fig. 56, 57 y 58).



**Figura 56 - Tamaño de grano a 100x**



**Figura 57 - Tamaño de grano a 500x**



**Figura 58 - Tamaño de grano a 1000x**

#### **6.4 Microscopía electrónica de barrido**

Con el objetivo de realizar una caracterización microestructural del material intermetálico, así como determinar la composición en la superficie y el tamaño de grano, se realizaron algunas observaciones en el microscopio electrónico de barrido, a través del cual se obtuvieron algunas imágenes como las que se muestran en las figuras 59, 60 y 61 donde se puede observar a detalle el tamaño de grano de la muestra y la forma del mismo. El tamaño de grano que se observa es más pequeño en comparación con un material intermetálico Fe-Al al que no se le adicionó Ag, esto es importante ya que se espera que a menor tamaño de grano las características físicas del material sean mejores.

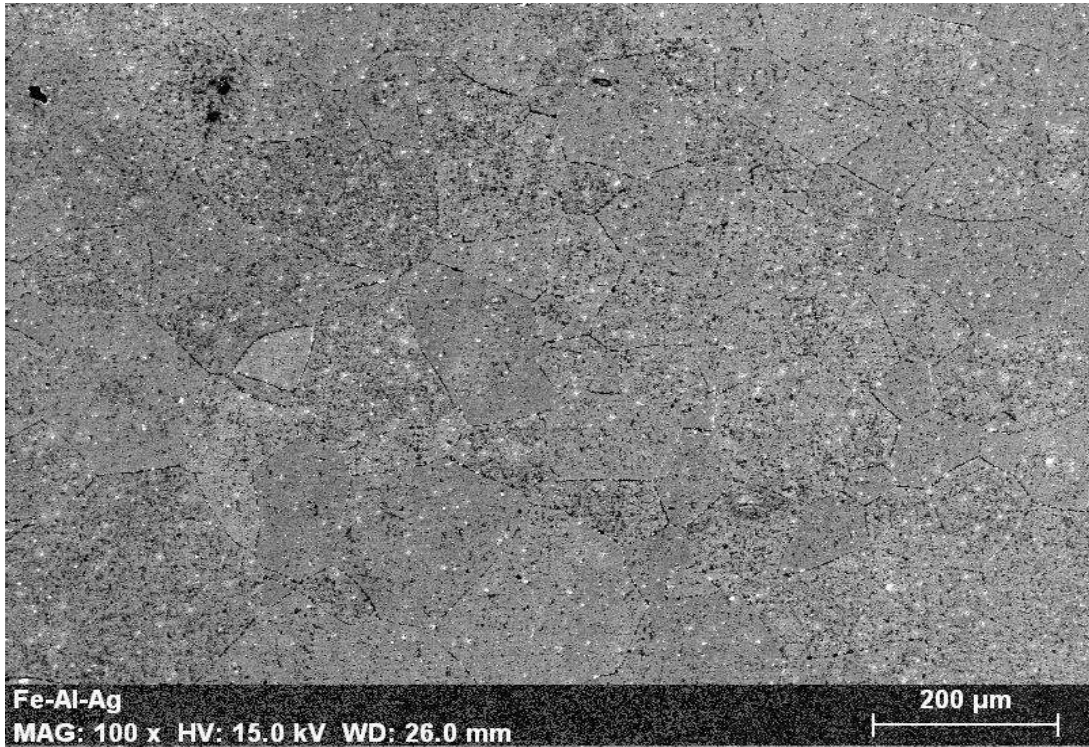


Figura 59 - Imagen en el microscopio de barrido a 100x

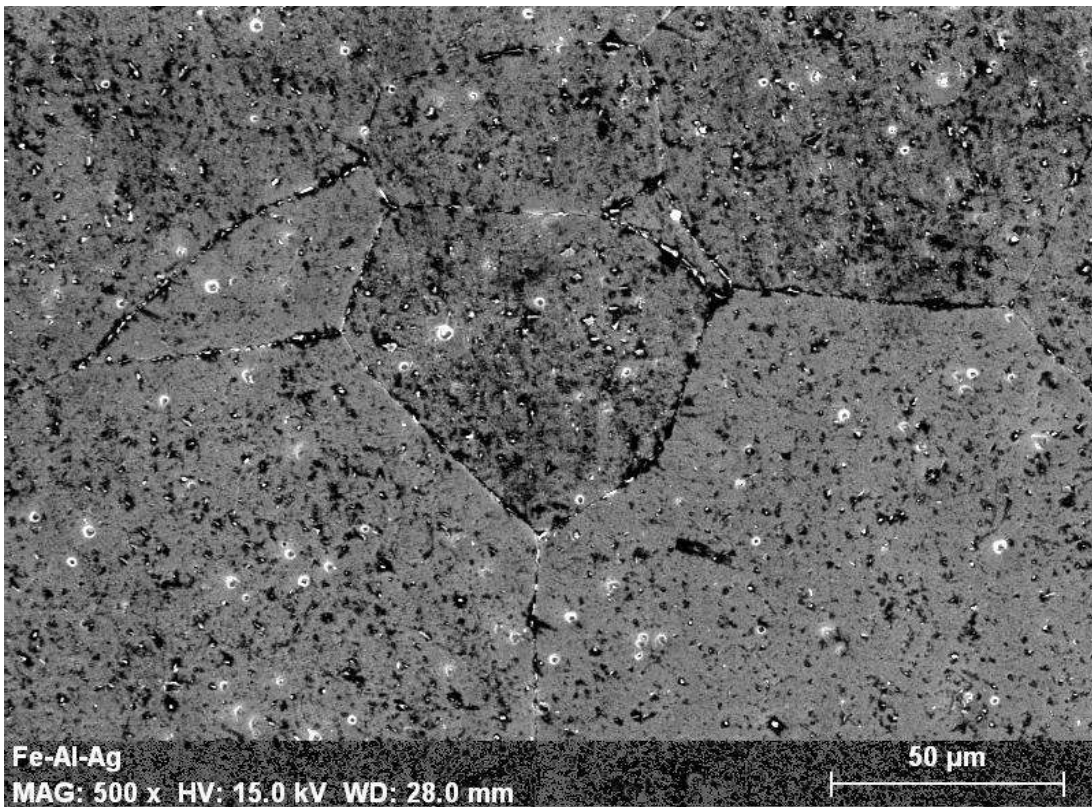


Figura 60 - Imagen en el microscopio de barrido a 500x

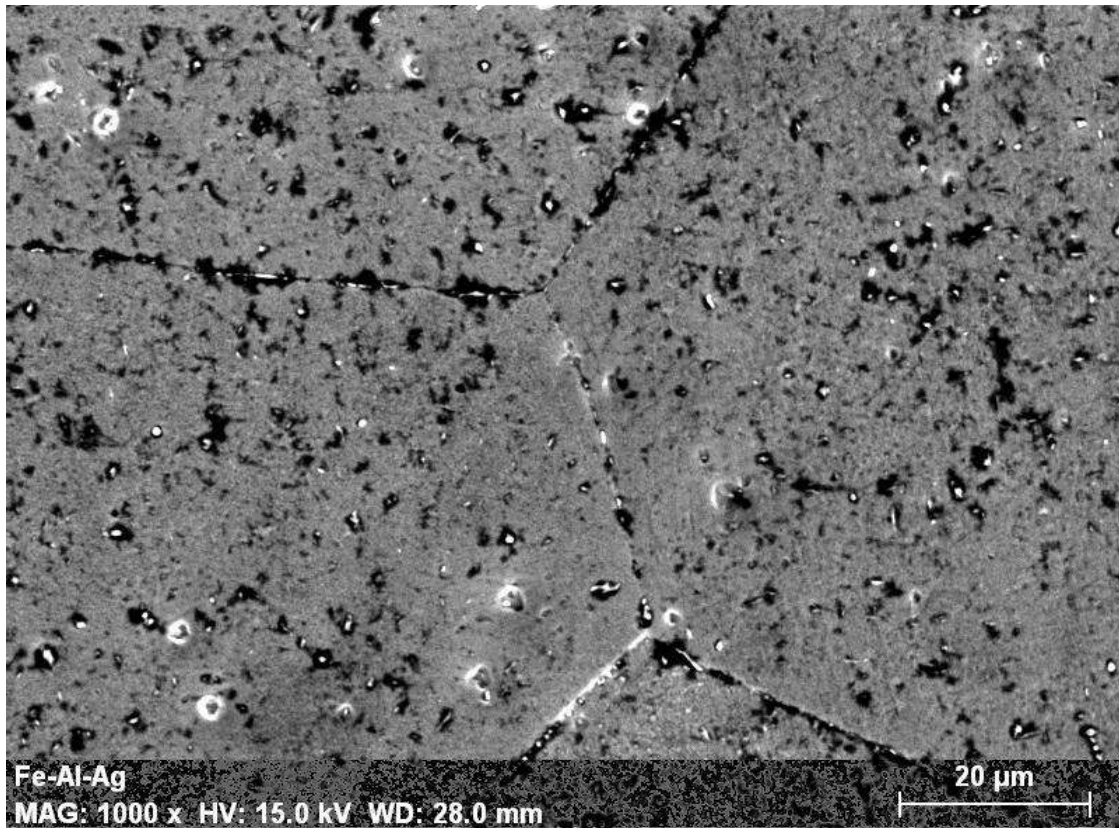


Figura 61 - Imagen en el microscopio de barrido a 1000x

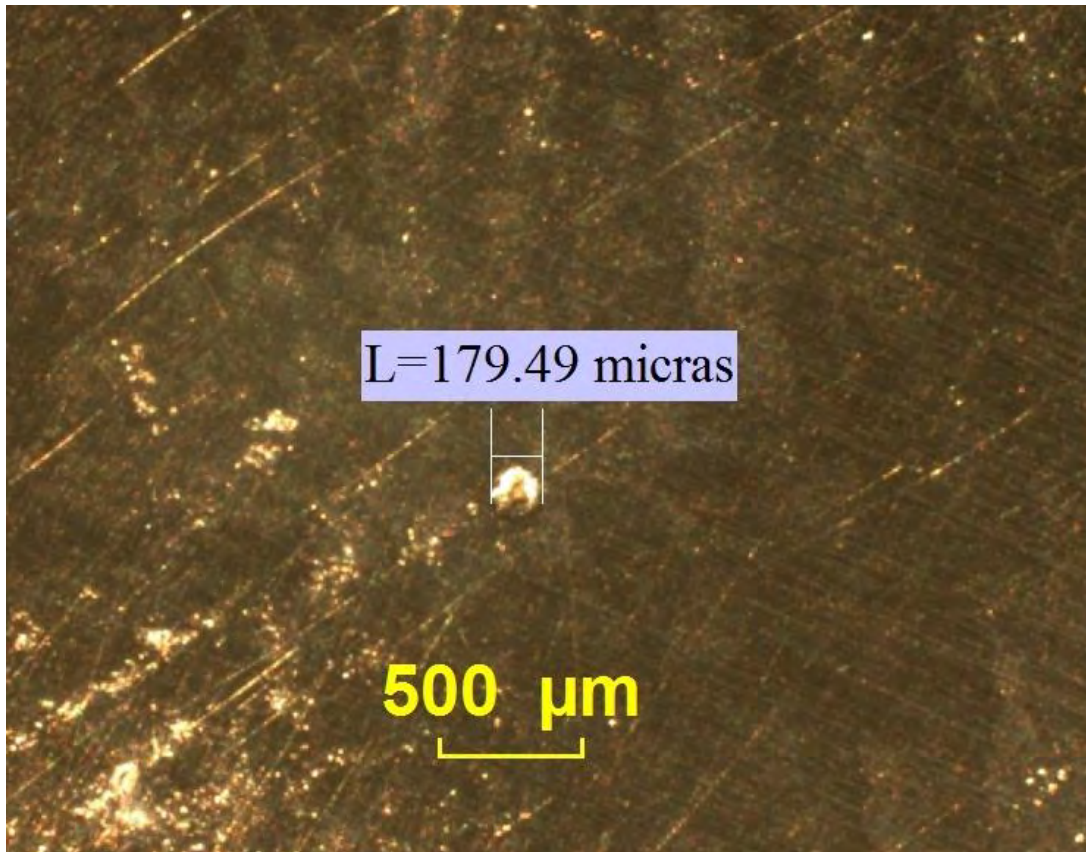
### 6.5 Micromaquinado de cráteres

Se realizaron varias pruebas de maquinado para posteriormente observar los resultados del micromaquinado por medio del microscopio óptico obteniendo los resultados presentados a continuación (Fig. 62, 63 y 64). Se eligieron estos resultados como ejemplo por presentar cráteres mejor definidos que el resto de las pruebas. En la tablas 3, 4 y 5 se muestran los parámetros del maquinado que se utilizaron respectivamente..

Alimentación	5V DC
Ánodo	Alambre de latón GF Agie Charmilles Asia. 0.25 mm de diámetro, 900 N/mm <sup>2</sup>
Cátodo	Material intermetálico Fe-Al-Ag

Electrolito	Solución de Cloruro de Sodio (NaCl) al 10%
Tiempo de pulsos	0.1 milisegundos

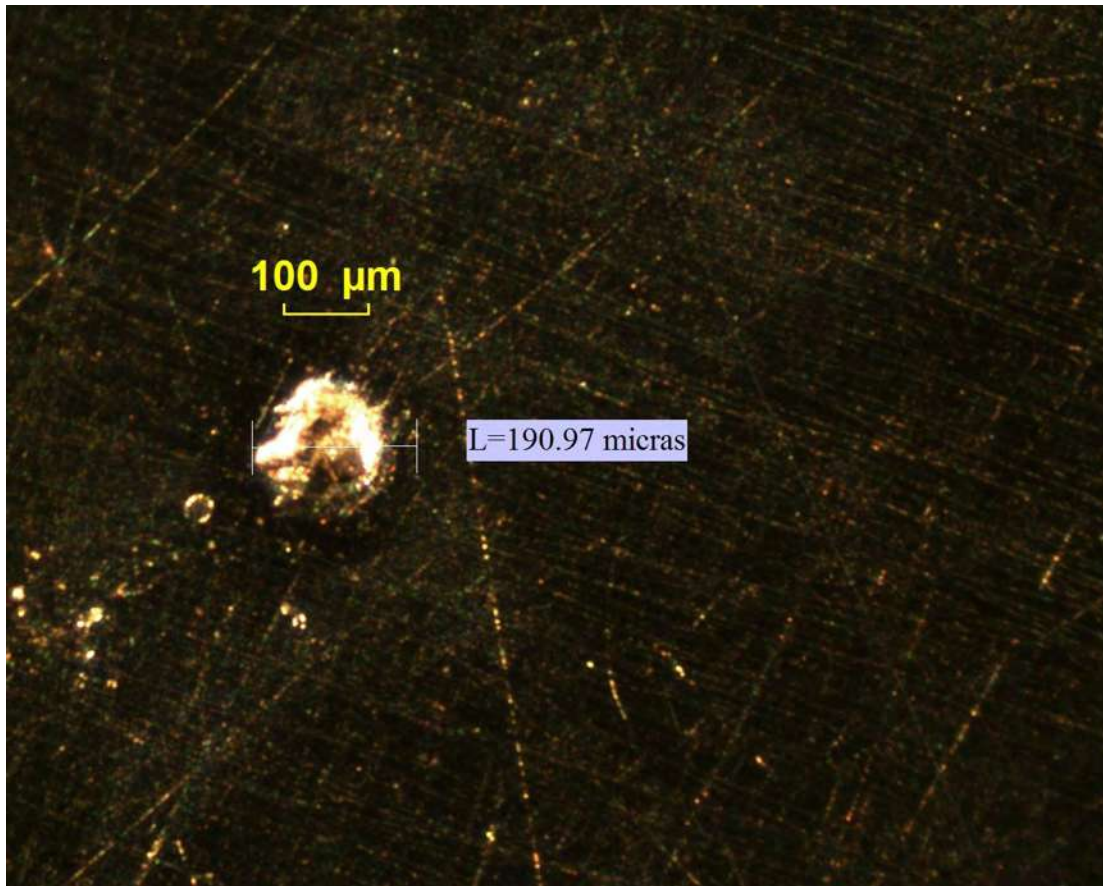
**Tabla 4 - Condiciones experimentales prueba #1**



**Figura 62 - Cráter realizado con un voltaje de 5V, prueba #1**

Alimentación	5 DC
Ánodo	Alambre de latón Celectro, 0.25 mm. De diámetro, $970 \text{ N/mm}^2$
Cátodo	Material intermetálico Fe-Al-Ag
Electrolito	Solución de Cloruro de Sodio (NaCl) al 10%
Tiempo de pulsos	0.1 milisegundos

**Tabla 5 - Condiciones experimentales prueba #2**



**Figura 63 - Cráter realizado con un voltaje de 5V, prueba #2**

Alimentación	12V DC
Ánodo	Alambre de molibdeno Changkai Industrial, 0.18 mm. De diámetro.
Cátodo	Material intermetálico Fe-Al-Ag
Electrolito	Solución de Cloruro de Sodio (NaCl) al 10%
Tiempo de pulsos	0.1 milisegundos

**Tabla 6 - Condiciones experimentales prueba #3**

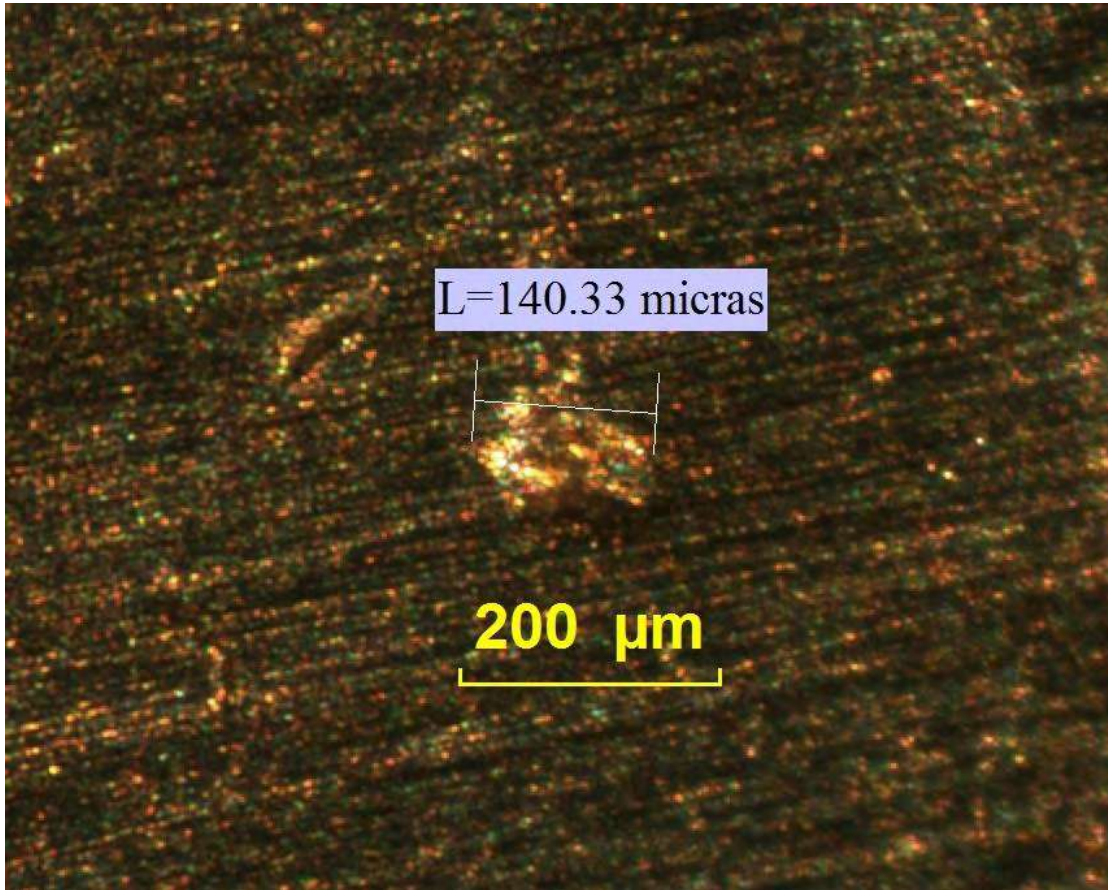


Figura 64 - Cráter realizado con un voltaje de 12V, prueba #3

## 6.6 Discusión de resultados

Al observar las imágenes es posible apreciar que los cráteres obtenidos con un voltaje de 5V se aprecian un poco más definidos en cuanto a su forma en comparación con el obtenido a 12V, que presenta una geometría más irregular, lo cual puede ofrecer alguna idea de la calidad del maquinado dependiendo del voltaje aplicado. Es posible que el voltaje usado en los pulsos en el proceso de maquinado, esté directamente relacionado con el resultado obtenido en cuanto a su geometría y calidad. Para establecer una conclusión definitiva es necesario realizar un número determinado de pruebas variando dichos voltajes, así como los diferentes tipos de electrodos para establecer los parámetros que aseguren la mejor calidad. Cabe destacar que aun existen parámetros que no han sido

determinados como la brecha entre el electrodo y la pieza de trabajo así como la velocidad de avance del electrodo y la frecuencia de los pulsos, parámetros que también influyen de manera importante en el proceso de maquinado y que necesitan ser estudiados a fondo para obtener resultados óptimos en el proceso.

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

#### Conclusiones

Se fabricó un centro de micromaquinado electroquímico mediante el análisis del proceso ECM y su aplicación que se enfocó principalmente al estudio del material intermetálico Fe-Al, producido en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH. El centro de maquinado cuenta con un sistema de posicionamiento en tres ejes y es controlado directamente desde una computadora con la ayuda del software RepSnapper. Además, se instaló un circuito integrado programable que permite variar la frecuencia de los pulsos de maquinado y establecer el valor deseado de los mismos para analizar los efectos de frecuencias de pulsos distintas en el proceso de micromaquinado. Se logró fabricar el centro de micromaquinado a un precio considerablemente más bajo que las máquinas ECM disponibles en el mercado, mediante la utilización de materiales relativamente fáciles de conseguir y que brindan la funcionalidad necesaria para el proceso, así como la precisión requerida, la cual era a nivel micrométrico. Esto se comprobó en las pruebas de mecanizado realizadas en algunas muestras del material obtenido y que comprueban el correcto funcionamiento del centro de micromaquinado y del proceso ECM.

Por otra parte, también se logró que el centro de maquinado sea práctico y fácil de transportar, además de que ocupa un espacio reducido por lo que los estudios se pueden realizar sin dificultad en casi cualquier instalación.

Se realizaron mecanizados en las muestras de material intermetálico para producir cráteres en las piezas y comprobar que el proceso funciona correctamente.

## Trabajo futuro

Se plantea a futuro realizar un análisis más detallado de todo el proceso para determinar las condiciones óptimas de trabajo de acuerdo a la calidad deseada y observar cómo afecta la variación de algunos de los parámetros como son: la frecuencia de los pulsos, el electrolito utilizado, el material del electrodo, la brecha de separación entre el electrodo y la pieza de trabajo, entre otros. Esta será una extensión importante de este trabajo.

La frecuencia de los pulsos se relaciona con la tasa de remoción de material y ésta puede variarse hasta obtener una tasa de remoción adecuada y al mismo tiempo permitir la remoción de los residuos por medio del electrolito.

En cuanto al tipo de electrolito usado es posible variar el porcentaje de la solución para lograr mejores acabados superficiales en la pieza de trabajo aunque esto también puede afectar directamente la tasa de remoción.

Por otro lado, la brecha de separación entre la pieza de trabajo y el electrodo brinda otra área de oportunidad de mejora del proceso microECM, ya que es necesario el estudio de esta característica para establecer cuál debería ser la velocidad de avance adecuada para que la brecha se mantenga a la distancia deseada y que no se produzcan cortocircuitos durante el maquinado.

Cabe mencionar que también es necesario estudiar varios electrodos de diferentes materiales para observar los resultados que se obtienen con cada uno, ya que los que se utilizaron en este trabajo fueron los disponibles en el momento del estudio, sin embargo, existe una amplia gama de posibilidades en cuanto a diferentes materiales conductores.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Srinivas Sundarram S. Development of Electrochemical Micro Machining, *Tesis*. 2008.
- [2] McGeough, J. Theory of Electrochemical Machining, 2005.  
<http://www.electrochem.cwru.edu/ed/encycl/>.
- [3] <http://www.electrochemicalmachining.com/>
- [4] <http://www.youtube.com/watch?v=VzmVrJAlhew>
- [5] Zhang Y. Investigation into Current Efficiency for Pulse Electrochemical Machining of Nickel Alloy. *Tesis*. 2010.
- [6] <http://www.interempresas.net/MetalWorking/Articles/43234-New-trends-for-machining.html>
- [7] <http://www.finishingmachines.com/ecd.htm>
- [8] Wang M.H. and Zhu D., Fabrication of multiple electrodes and their application for micro-holes array in ECM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008. 41(1-2): p. 42-47.
- [9] Bhattacharyya B., Advancement in electrochemical micro-machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004. 44(15): p. 1577-1589.
- [10] Datta M. and Landolt D., Electrochemical machining under pulsed current conditions. *Electrochemical Acta.*, 1980. 26(7): p. 899-907.
- [11] Bhattacharyya B., Doloi B., and Sridhar P.S., Electrochemical Micro-Machining: New Possibilities for Micro-Manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001. (1–3)(113 ): p. 301–305.

[12] Ronnie A. Mathew, Study of the Pulsed Electrochemical Micromachining of Ultra High Aspect Ratio Micro Tools. Tesis. 2011.

[13] Srisawadi S. An Investigation of Rapid Tooling for Electrochemical Machining of Ti-6Al-4V Alloy. Tesis. 2006.

[14] Adeva P., Materiales alternativos de las superaleaciones: compuestos intermetálicos. Journal. 1999.

<https://www.serina.es/empresas/aecientificos/revistashtml/MaterialesAlternativos.html>

[15] Espinosa Medina M. A. et al. Caracterización de Fractura de Aleaciones Intermetálicas de Base FeAl con adiciones de Ag, Li, 2010.

[http://www.amemi.org/memorias\\_2010/Metales\\_y\\_aleaciones/POSTERS/CARACTERIZACION\\_DE\\_FRACTURA\\_DE\\_ALEACIONES.pdf](http://www.amemi.org/memorias_2010/Metales_y_aleaciones/POSTERS/CARACTERIZACION_DE_FRACTURA_DE_ALEACIONES.pdf)

[16] Sawicki J. ECM Machining of Curvilinear Rotary Surfaces by a Shaping Tool Electrode Performing Composite Motion. Journal. 2010. Vol. 34. No. 2.

[17] Purcar M. et al. 3D Electrochemical Machining Computer Simulations. Journal 2004.

[18] Hocheng H. et al. Ring-Form Electrode in Electropolishing of External Cylindrical Surface. Journal. 2000.

[19] Zhu J. Robust Thermal Error Modeling and Compensation for CNC Machine Tools. Disertación. 2008.

[20] Pa P. Design of Gear-Form Electrode and Ultrasonic Aid in Electrochemical Finishing of SNC236 Surface. Journal. 2007.

[21] Swain A. Preparation of Coated Microtools for Electrochemical Machining Applications. *Disertación*. 2010.

[22] Mallick U. Estimation of MRR using U-Shape Electrode in Electrochemical Machining. *Tesis*.

[23] Sun X. An Integrated Framework for Developing Generic Modular Reconfigurable Platforms for Micro Manufacturing and its Implementation. *Tesis*. 2009.

[24] Cagnon L. et al. Electrochemical Micromachining of Stainless Steel by Ultrashort Voltage Pulses. *Journal*. 2003.

[25] <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/43234-Nuevas-tendencias-para-el-mecanizado.html>

[26] <http://www.schmalzhaus.com/EasyDriver/>

[27] <http://www.arduino.cc/>

[28] [http://reprap.org/wiki/Main\\_Page](http://reprap.org/wiki/Main_Page)

[29] <http://onsemi.com>

[30] <http://casoproblema3.wikispaces.com/>

[31]

[http://ocw.uniovi.es/file.php/39/1C\\_C11812\\_A/contenidos%20en%20pdf%20para%20descargar/18.pdf](http://ocw.uniovi.es/file.php/39/1C_C11812_A/contenidos%20en%20pdf%20para%20descargar/18.pdf)

## ANEXO I

### **Artículos publicados y presentaciones en el marco de esta tesis.**

Villagómez Galindo M., Espinosa Medina M., Álvarez Sánchez O. y López Flores L., *Diseño de una Plataforma para Micromaquinado por Electroerosión (EDM) y/o Electroquímico (ECM)*, 10º Congreso Nacional de Mecatrónica Noviembre 3, 2011. Puerto Vallarta, Jalisco. Conferencia Magna y Publicación de Artículo.

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

Miguel Villagómez Galindo, Marco Antonio Espinosa Medina, Oscar Álvarez Sánchez  
y 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), [marespm@gmail.com](mailto:marespm@gmail.com), [alvarezoscar\\_1@hotmail.com](mailto:alvarezoscar_1@hotmail.com),  
[lopez1365@hotmail.com](mailto:lopez1365@hotmail.com)

## Resumen.

*En este trabajo se presenta el diseño de una plataforma para micromaquinado, ya sea mediante el proceso de electroerosión EDM (por sus siglas en inglés Electrical Discharge Machine) o el proceso electroquímico ECM (por sus siglas en inglés Electrochemical Machining). En este proyecto se plantea que con la plataforma se tenga la posibilidad de elegir cualquiera de los dos procesos de maquinado adecuando determinados parámetros de acuerdo al proceso seleccionado (EDM o ECM).*

*Por ejemplo: voltaje, amperaje, frecuencia de generación de pulsos, duración de los pulsos, fluido circulante y separación entre la pieza de trabajo y el electrodo (gap).*

**Palabras clave:** Micromaquinado, EDM, ECM, maquinado por electroerosión, maquinado electroquímico.

## 1. Introducción.

Dentro de los procesos de manufactura no-convencionales que ofrecen mayor precisión de fabricación tridimensional en materiales conductores de alta resistencia, se encuentran los procesos de manufactura por EDM (maquinado por electroerosión) y ECM (maquinado electroquímico).

### 1.1 Proceso de electroerosión de electrodo.

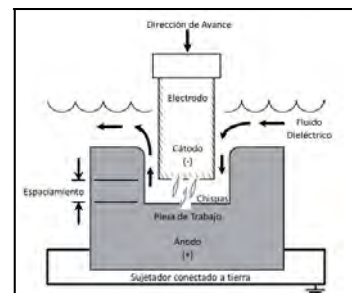
El principio del EDM aprovecha el efecto de erosión provocado por una serie de descargas controladas que generan una chispa eléctrica entre un

electrodo y el material de trabajo. Las chispas se generan en un líquido dieléctrico, 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 [1].

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.

Así, el proceso de maquinado consiste en la eliminación sucesiva de pequeños volúmenes de material de la pieza a maquinado (ver figura 1). Este pequeño volumen es fundido o vaporizado durante cada descarga, así éste proceso básico se realiza repetidamente bajo una frecuencia determinada.

La principal función del medio dieléctrico es crear un medio que facilite la ionización, además de funcionar como refrigerante y como un fluido que retira el material removido durante el proceso de manufactura.



**Fig 1. Proceso de electroerosión (EDM) [2]**  
1.2 Proceso electroquímico.

El maquinado electroquímico (ECM) tiene como objetivo trabajar en materiales que son difíciles de maquinar por métodos convencionales, funciona por medio del desprendimiento de iones que se logra gracias al fenómeno de electrólisis, una reacción química que ocurre cuando una corriente eléctrica pasa entre dos conductores sumergidos en una solución líquida.

En el maquinado electroquímico, cuando el pulso de corriente es aplicado a dos electrodos que están sumergidos en un electrolito, se produce el intercambio de iones y átomos debido a la adición de electrones del circuito externo.

Las reacciones químicas dependen tanto del material de la pieza de trabajo (peso atómico y carga iónica), como del tipo de electrolito, una solución electrolítica concentrada tiene las ventajas de una mejor conductividad y por lo tanto una tasa de penetración mayor y mayor precisión, por otro lado, una solución diluida es menos probable que se cristalice y da una superficie más suave [3].

En la figura 2 aparece un esquema de una celda electrolítica utilizando sulfato de cobre como electrolito y alambre de cobre como electrodos.

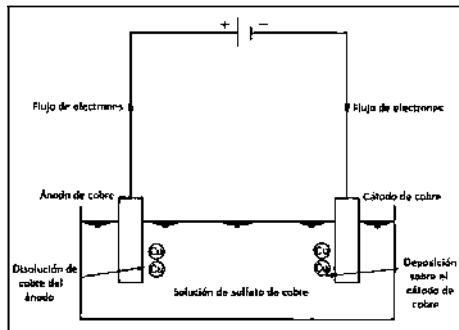


Fig 2. Esquema de electrólisis [4].

## 2. Metodología de diseño.

Para establecer el diseño del centro de micromáquinado del proceso de electroerosión de electrodo el desarrollo del proyecto se dividió en las siguientes etapas:

1. Revisión bibliográfica
2. Diseño de la plataforma base del centro de micromáquinado.

3. Diseño, selección de los dispositivos necesarios para lograr el proceso de electroerosión.
4. Programación del centro de micromáquinado.
5. Adecuar los parámetros del proceso de electroerosión al maquinado del material intermetálico seleccionado.
6. Análisis y validación de resultados.

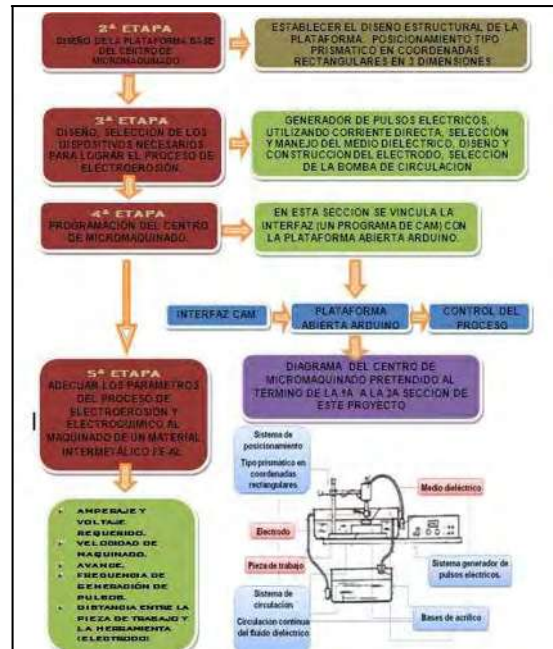


Fig 3. Metodología de diseño.

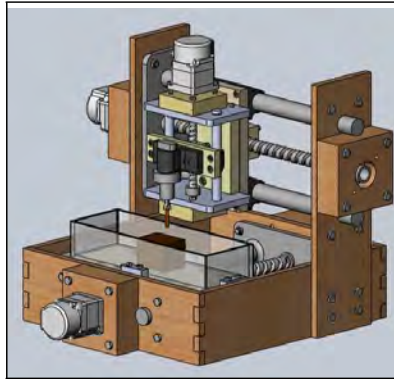
## 3. Propuesta de diseño de la estructura del centro de micromáquinado.

Las partes más importantes para el diseño de la plataforma base son: la estructura de la máquina, el mecanismo de avance del electrodo, el generador de pulsos y la interfase.

### 3.1 Estructura de la plataforma base.

La plataforma base se diseñó con tres grados de libertad en coordenadas rectangulares (ver figura 4), con la finalidad de establecer los parámetros que definan a cada uno de los procesos de desbaste (EDM o ECM).

El diseño estructural se realizó con la ayuda del software de CAD SolidWorks 2010.

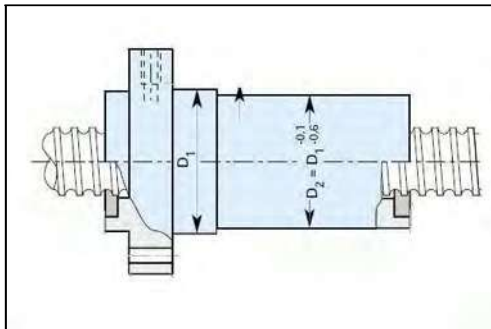


**Fig 4. Diseño de la plataforma base.**

El diseño presentado se definió para asegurar la rigidez y la estabilidad necesaria cuando el proceso de maquinado se lleve a cabo; buscando que la precisión que se necesita no se vea afectada.

### 3.2 Mecanismo de avance del electrodo.

Para asegurar la precisión que se necesita para cada uno de los procesos de desbaste se plantea que el movimiento lineal del electrodo sea mediante la aplicación de un mecanismo micrométrico como el que se muestra en la figura 5.

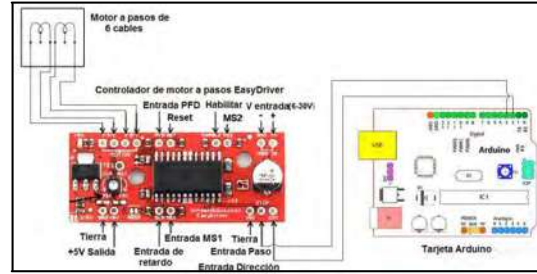


**Fig 5. Mecanismo de avance del electrodo.**

Acoplado el mecanismo mostrado a un motor de pasos unipolar se obtiene el avance del electrodo.

La precisión micrométrica es obtenida por medio del paso de la rosca.

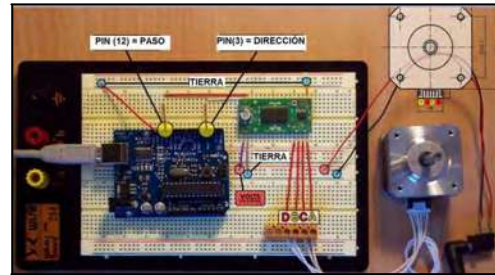
Para el control del motor a pasos se plantea que este se logre mediante el sistema de control mostrado en la figura 6.



**Fig 6. Sistema de control para el motor a pasos [5].**

Este sistema de control consiste de una tarjeta arduino, el controlador del motor y el motor propiamente dicho.

El controlador del motor (Easy Driver) permite manipular y darle la secuencia correcta a las fases del motor a pasos, al enlazar el controlador con el arduino se consigue la precisión requerida para el motor (ver figura 7).



**Fig 7. Conexionado para el control del motor a pasos.**

### 2.3. Generador de pulsos.

Para un proceso de micromaquinado la disminución de la cantidad de material removido por descarga, obliga a aumentar la cantidad de pulsos aplicados por unidad de tiempo, de tal forma que no disminuya considerablemente la Velocidad de Remoción de Material (VRM) [6].

Por lo anterior se utilizará un generador de pulsos cuyo control será mediante un circuito integrado programable (PIC) como se puede ver en la Figura 8.

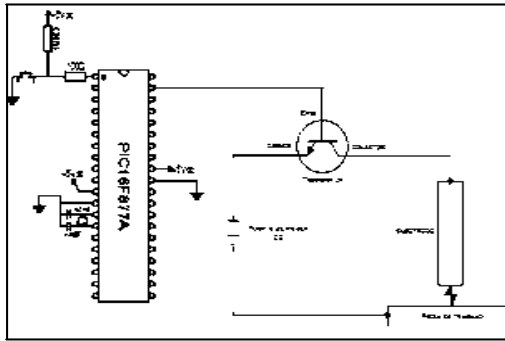


Fig 8. Generador de pulsos para los dos procesos.

#### 2.4. Interfase.

La finalidad de la interfase es el poder generar un programa de maquinado que a su vez se traduzca en un lenguaje que pueda ser interpretado por el arduino.

El primer paso para lograr esto es utilizando un modulo del software SolidWorks 2010 llamado CamWorks. Estableciendo la geometría que nosotros queremos obtener, este módulo permite simular el proceso de desbaste (ver figura 9) y generar un programa en códigos GM que describa las trayectorias de maquinado (ver figura 10).

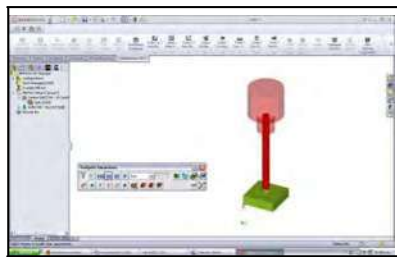


Fig 9. Simulación del proceso de desbaste en CamWorks.



Fig 10. Generación del programa de maquinado en códigos GM en el modulo CamWorks

Mediante una rutina utilizando el lenguaje de programación Python, el programa en códigos GM se

traduce en órdenes que pueden ser interpretadas por la tarjeta arduino logrando con esto el control de todo el sistema.

#### 4. Determinación de los parámetros del proceso.

Con la configuración que se propone de la plataforma (ver figura 11) se podrá realizar el ciclo de maquinado para los 2 métodos de desbaste, ECM y EDM.



Fig 11. Parámetros necesarios para establecer el ciclo de desbaste.

Con la finalidad de estudiar tanto el proceso ECM como el proceso EDM, hay que considerar que cada uno de ellos tiene variantes importantes y que estas tienen que considerarse para tener la posibilidad de utilizar cualquiera de los dos procesos.

De acuerdo al fluido de trabajo utilizado, el proceso EDM requiere de un medio dieléctrico para que la chispa eléctrica se genere en forma constante y controlada, además de que realiza la función de limpiar el material erosionado de la pieza de trabajo [7]; por otra parte, el proceso ECM requiere de un electrolito, que tiene la función de transportar los iones que se desprenden de la pieza de trabajo; debido a esto se debe tomar en cuenta que tras un determinado número de ciclos de trabajo el electrolito se satura por los iones desprendidos en el proceso y es necesario reemplazarlo.

La precisión para tener un micromaquinado es una característica muy importante ya que para lograr el ciclo de desbaste, tanto del proceso EDM como del ECM, es necesario mantener una distancia constante entre el electrodo y la pieza de maquinado (gap) y el avance del electrodo debe ser constante de acuerdo con el voltaje entre el electrodo y la pieza de trabajo [8].

Para el caso del generador de pulsos los parámetros más importantes a regular son el voltaje, el amperaje y la frecuencia aplicados de acuerdo al proceso elegido.

El material del electrodo de trabajo para ambos procesos será el cobre, la geometría del mismo será la de un alambre para hacer tanto en el proceso EDM como en el ECM, el proceso de micro-hole.

## 5. Conclusiones.

La plataforma de micromaquinado presentada en este proyecto se encuentra en desarrollo, se han definido de manera separada tanto el sistema de posicionamiento, la interfaz CAM y el generador de pulsos, para finalmente poder realizar el ensamble de estos 3 elementos y poder establecer la máquina de micromaquinado para EDM y/o ECM

El desarrollo presentado en este proyecto de investigación es el de la determinación de la plataforma base con el posicionamiento en una dirección, con la finalidad de establecer los parámetros de maquinado antes mencionados para un material intermetálico, tanto para el proceso de EDM como el ECM.

Como trabajos futuros para este proyecto hay varias posibilidades tales como: establecer las diferencias entre el proceso EDM y el ECM y qué acabados superficiales nos ofrece cada uno de ellos, aumentar el número de ejes de la máquina de uno a tres con el objetivo de poder obtener geometrías más complicadas, analizar a un nivel metalográfico las probetas obtenidas del material intermetálico con el objetivo de establecer qué estructura cristalina es obtenida al ser maquinadas por ambos procesos y con ello definir la factibilidad de poder maquinar piezas con grado aeroespacial o biomédico.

## Referencias.

- [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/>

