



UNIVERSIDAD MICHOCANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA CORTE POR ELECTROEROSIÓN
MEDIANTE HILO PARA MATERIALES INTERMETÁLICOS DE BASE Fe-Al”**

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería Mecánica para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Presenta:

Francisco Javier Romero Sotelo

Asesor de tesis:

Dr. Marco Antonio Espinosa Medina

Coasesor de tesis:

M.C. Miguel Villagómez Galindo

Morelia, Mich., Octubre del 2012



Con especial dedicación a mi esposa María Elena, mis padres Luz María y Francisco por su gran apoyo.

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es dedicado y agradecido a las siguientes instituciones, familiares y amigos que colaboraron para que pudiera ser realizada esta tesis:

- Al CONACYT mi más grande agradecimiento por el apoyo económico para la realización de esta tesis.

- A la Facultad de Ingeniería Mecánica y a los profesores que imparten en la institución mi más grande agradecimiento, ya que gracias a ellos adquirí conocimientos más allá de la ciencia y de la vida.

- A mi asesor y coasesor mi más grande agradecimiento, por su guía, ayuda y colaboración importante en la elaboración del presente trabajo.

- A mi familia mi más grande agradecimiento por apoyarme todos estos años.

- A mis amigos de generación mi más grande agradecimiento por su ayuda y amistad todo este tiempo, donde aprendimos juntos tantas cosas, a mi esposa Elena por su gran apoyo para lograr que esto sea posible.

ABSTRACT

Through the time, the engineering advances had obliged that new manufacturing machine had developed every day, that machines had made cutting process more complex and easier. Engineers up to day are in the quest of new process but improving them like EDM machine, this process is considered as non conventional manufacturing process.

In this work an EDM prototype was created, in order to have the possibility of doing experiments at small scale level in comparison than industrial scale, in fact parameters more adequate for each material can be obtained, just to mention pulse control, voltage and amperage.

Keywords: Electrical discharge machining, prototype, manufacturing, Fe-Al intermetallic material.

RESUMEN

Los avances de la Ingeniería a lo largo del tiempo han exigido que diariamente se inventen nuevas máquinas en procesos de manufactura, las cuales facilitan realizar procesos de corte cada más complejos, por lo que actualmente los ingenieros están en la búsqueda no solo de mejorar procesos sino de crear nuevos, tal es el caso de la máquina de corte por electroerosión mediante hilo EDM, este proceso a diferencia de los demás es considerado no convencional.

En este trabajo de investigación se buscó la creación de un prototipo de este equipo EDM para así tener una máquina que brinde la posibilidad de experimentar a un nivel más pequeño que el industrial, y así obtener parámetros adecuados a cada material como son: control de pulsos, corriente y voltaje.

Palabras claves: Máquina de corte por electroerosión, prototipo, manufactura, material intermetálico Fe-Al.

ÍNDICE

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS.....	3
ABSTRACT	4
RESUMEN	5
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABLAS.....	9
NOMENCLATURA	10
ABREVIATURAS	11
GLOSARIO.....	12
Capítulo 1 Introducción	13
<i>1.1. Justificación.....</i>	<i>16</i>
<i>1.2. Hipótesis.....</i>	<i>18</i>
<i>1.3. Objetivos y aportaciones esperadas</i>	<i>18</i>
<i>1.3.1. Objetivo general</i>	<i>18</i>
<i>1.3.2. Objetivos específicos.....</i>	<i>18</i>
<i>1.3.3. Aportaciones derivadas de la presente tesis.....</i>	<i>19</i>
<i>1.4. Metodología.....</i>	<i>19</i>
Capítulo 2 Antecedentes.....	21
<i>2.1. Introducción</i>	<i>21</i>
<i>2.2. Antecedentes.....</i>	<i>23</i>
Capítulo 3 Procedimiento para el cálculo y aplicación general de los parámetros para la máquina EDM.....	27
Capítulo 4 Diseño de la estructura y mecanismos de la plataforma máquina EDM mediante hilo.....	29
<i>4.1. Diseño conceptual.....</i>	<i>29</i>
<i>4.2. Ensamble general del modelo de la máquina EDM.....</i>	<i>31</i>
<i>4.3. Diseño de mecanismo de avance en dos ejes x-y.....</i>	<i>32</i>
<i>4.3.1. Control de los motores NEMA 17 por EasyDriver</i>	<i>34</i>
<i>4.4. Diseño de detalle en planos constructivos</i>	<i>37</i>
<i>4.5. Análisis estructural por elemento finito</i>	<i>39</i>
<i>4.6. Máquina EDM diseño y fabricación final</i>	<i>41</i>

Capítulo 5 Sistema electrónico de la máquina EDM.....	43
5.1. Voltaje para el corte por hilo EDM.....	43
5.2. Generador de pulsos	45
5.3. Control de la corriente en la chispa EDM	46
Capítulo 6 Sistema de circulación del sistema EDM	47
Capítulo 7 Porta-electrodo de la máquina EDM.....	49
Capítulo 8 Caracterización del material a cortar en la máquina intermetálico Fe-Al	51
8.1. Análisis por Difractometría.....	51
8.2. Análisis metalográfico	52
Capítulo 9 Interfaz Arduino-ReplicatorG-CAM.....	53
Capítulo 10 Conclusiones y recomendaciones	57
10.1. Conclusiones.....	57
10.2. Recomendaciones y/o trabajos futuros.....	57
REFERENCIAS	58
Anexo A Dibujos de detalle individuales	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de electroerosión por hilo(a) [2]	21
Figura 2. Tipos de electroerosión (lado izquierdo por penetración y lado derecho por hilo) [1]	22
Figura 3. Esquema de una máquina EDM (corte por hilo) [4]	26
Figura 4. Diagrama de funciones para la máquina EDM [13]	31
Figura 5. Modelo de la máquina en Unigraphics NX6	32
Figura 6. Sistema de posicionamiento x-y de la máquina EDM mediante poleas y bandas	33
Figura 7. Sistema de posicionamiento mediante poleas y bandas ensamblado	34
Figura 8. Tarjeta EasyDriver v4.4 para controlar los motores a pasos NEMA17. [23]	34
Figura 9. Pines tarjeta EasyDriver v4.4 [23]	36
Figura 10. Conexión de las 2 bobinas de un motor a pasos en los pines COIL A y B	36
Figura 11. Dibujo de detalle de la máquina EDM en Unigraphics NX6	38
Figura 12. Restricciones y cargas aplicadas a la estructura de la máquina de electroerosión.	39
Figura 13. Esfuerzos de Von Misses en la estructura de la máquina EDM	40
Figura 14. Deformación unitaria para la máquina EDM	41
Figura 15. Máquina EDM fabricada según diseño propuesto	42
Figura 16. Diagrama eléctrico simulado en Proteus	44
Figura 17. Pruebas de voltaje de circuito MAX1044	44
Figura 18. Circuito electrónico de la tarjeta Arduino MEGA y Arduino Uno, con MAX1044 para control de voltaje y pulsos eléctricos conforme a lo requerido	45
Figura 19. Circuito electrónico para controlar la corriente del sistema	46
Figura 20. Sistema de circulación con cada componente	48
Figura 21. Porta-electrodo y sistema de alimentación de hilo	49
Figura 22. Tipos de hilo para proceso EDM	50
Figura 23. Gráfica de composición del material FeAl	52
Figura 24. Obtención del tamaño de grano mediante microscopio de barrido para el intermetálico. Fe-Al a 100x	52
Figura 25. Ambiente ReplicatorG [54]	54
Figura 26. Máquina EDM conectada a la interfaz y control de voltaje, etc.	55
Figura 27. Generación de códigos G y M	56

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Combinaciones que pueden ser programadas en los pines MS1 y MS2 para el control de los pasos del motor</i>	35
<i>Tabla 2 Listado de material utilizado estructuralmente y de movimiento</i>	38
<i>Tabla 3 Parámetros mínimos y máximos para la experimentación</i>	43
<i>Tabla 4 Lista de planos Anexos</i>	63

NOMENCLATURA

A	Amperaje de una corriente eléctrica.
VCD	Voltaje de corriente directa.
VCA	Voltaje de corriente alterna.
Ton	Tiempo de activación del generador de pulsos.
Toff	Tiempo de desactivación del generador de pulsos.

ABREVIATURAS

EDM	(Electrical Discharge Machining). Máquinado por electroerosión de electrodo.
CAM	(Computer Assisted Manufacturing) Manufactura asistida por computadora.
CNC	(Control Numerical Computer) Máquinado de control numérico.

GLOSARIO

Arduino	Plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles
Easy Driver	Tarjeta electrónica usada para el control de motores a pasos (velocidad, números de pasos, sentido de giro)
Interfaz	Es la conexión entre dos ordenadores o máquinas de cualquier tipo dando una comunicación entre distintos niveles.
Open source	Código fuente de software disponible sin costo alguno que puede ser utilizado libre de licencia.
ReplicatorG	Software alternativo generador de códigos G open source.
Repsnapper	Software alternativo generador de códigos G open source.

Capítulo 1 Introducción

La selección correcta de las variables de fabricación es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en la mayoría de los procesos de fabricación, y en particular, en los procesos relacionados con Máquinas de Electroerosión (EDM) [1-2]. La anterior se trata de una máquina capaz de mecanizar piezas geométricamente complejas o difíciles, materiales difíciles de mecanizar por un método convencional como lo son: los materiales compuestos, las súper-aleaciones, fases de carburos, etc. Ejemplos de los materiales anteriores son los aceros resistentes al calor que se utilizan ampliamente en las industrias de moldes, en el área aeroespacial, médica y aeronáutica.

El Mecanizado por Electro Descarga traducido al español según sus siglas en inglés (EDM) se realiza mediante una máquina electro-térmica para un proceso no tradicional, donde se utiliza energía eléctrica para generar una chispa eléctrica entre un electrodo y el material de trabajo promoviendo el desgaste de este. El método EDM se utiliza principalmente para mecanizar materiales difíciles de dar forma y de alta resistencia, aleaciones resistentes a la temperatura. El EDM se puede utilizar para mecanizar geometrías complejas o difíciles en pequeñas cantidades o incluso sobre la base de fabricación en serie [1-2].

La investigación de nuevas máquinas para realizar procesos de corte ha hecho que surjan novedosas máquinas que requieren de investigación. El mecanizado por descarga eléctrica (EDM) se ha convertido en un proceso muy novedoso y práctico, al momento de que el proceso logre su mayor alcance. Es decir, que se logre fabricar una máquina EDM completa que logre tener como elementos cada uno de los parámetros necesarios para mecanizar cualquier material, que tenga una base de datos completa para así solo introducir los valores del material a mecanizar y así mismo la máquina automáticamente realice todo el proceso; de aquí la importancia de la investigación para la fabricación de máquinas de este tipo [3-5].

El presente trabajo está estructurado en 10 capítulos, los cuales se describen a continuación:

En el **capítulo 1**, se presenta la introducción, así como su justificación, la descripción de la hipótesis, los objetivos, las aportaciones que se busca obtener dentro de este trabajo.

El **capítulo 2**, proporciona los antecedentes, los términos y conceptos fundamentales para el buen desarrollo de la tesis.

El **capítulo 3**, nos da una pequeña guía para poder obtener los parámetros de trabajo para la máquina EDM mediante hilo.

Por otro lado el **capítulo 4**, desarrolla desde un inicio el diseño total del prototipo de la máquina de corte por electroerosión, utilizando el programa Unigraphics para el modelado y obtención de los planos de construcción y posteriormente la construcción de la misma.

El **capítulo 5**, contiene toda la información necesaria para saber que dispositivos electrónicos se utilizaron para poner en marcha la máquina respecto a su posicionamiento, control de voltaje y pulsos, entre otras cosas.

El **capítulo 6**, nos da a detalle qué elementos se consideraron para la construcción del sistema de circulación, siempre buscando economizar en la compra de elementos del sistema, todo con el fin de circular agua desionizada para la realización de cortes en la máquina.

El portaelectrodo, parte esencial en la máquina esta contenido en el **capítulo 7**, y se dan detalles de diseño y tipos de hilo que se pueden utilizar en este proceso de corte, siendo entonces la parte matriz de este sistema.

El **capítulo 8**, nos muestra el proceso que se realizó para caracterizar el material de corte llamado Intermetálico de base Fe-Al, este material que de origen es destinado a utilizarse en este proceso de corte, y de donde resulta necesaria conocer sus propiedades tanto eléctricas como mecánicas para así mismo determinar los parámetros de corte del mismo.

El **capítulo 9**, nos explica el procedimiento de cómo se realiza la generación de códigos G y M en un programa libre de licencia, el cual se utilizó para tener una comunicación con la interfaz Arduino, y a su vez Arduino con la máquina, esto es, que generando el programa G y M se trasladan los datos a la máquina por medio de la tarjeta Arduino.

Finalmente, el **capítulo 10** nos presenta las conclusiones del trabajo, así como las recomendaciones necesarias para la continuación de este trabajo.

1.1. Justificación

Debido a que los procesos convencionales de mecanizado tienen las siguientes desventajas tales como:

- El material tiene dureza o resistencia muy elevada, o el mismo es demasiado frágil.
- La pieza es demasiado flexible o resulta difícil sujetar las partes.
- La forma de la pieza es compleja.
- El acabado superficial y la tolerancia dimensional son muy rigurosos.
- El aumento de la temperatura y los esfuerzos residuales en la pieza no son deseables ni aceptables.

Estas desventajas, antes mencionadas del proceso se convierten en oportunidades para el proceso de electroerosión ya que este proceso puede atacar varios aspectos que son limitantes en los procesos convencionales [1-3].

La electroerosión por hilo actualmente se considera como un proceso de mecanizado no convencional, pero que tiene muchas aplicaciones que no pueden abarcar de manera satisfactoria los métodos convencionales que producen viruta, como desecho, la cual en ciertos casos de la industria es algo innecesario.

Todavía no se han realizado pruebas de mecanizado específicamente para un material intermetálico Fe-Al, así como los parámetros necesarios para poder utilizar la máquina EDM en el mismo, ya que este tiene bastante potencial de aplicación dentro de la industria, como por ejemplo: El material es resistente al desgaste (erosión-corrosión), y podría ser aplicado en la industria petrolera, plantas de destilación y plantas desalinizadoras, además este material es aplicable como recubrimiento anticorrosivo y antierosivo.

Una comparación básica nos da una claridad del porqué utilizar el proceso de mecanizado por electroerosión: La electroerosión frente al mecanizado de alta velocidad. El mecanizado de alta velocidad (MAV) es uno de los temas favoritos en las discusiones actuales sobre las tecnologías modernas de fabricación, ya que este proceso ha avanzado sustancialmente desde

hace poco tiempo. Sin embargo, las inversiones en procesos de manufactura tienen un tiempo de vida largo e influyen en la rentabilidad, calidad y tiempo de fabricación. Los nuevos procesos de manufactura no cubrirán nunca todas las demandas de todas las aplicaciones, y deben ser confrontados con alternativas [6-8].

Para que las herramientas de mecanizado sean efectivas en comparación con otras tecnologías, se necesita una mayor flexibilidad para el cambio, sistemas de cambio más rápidos, producción de series cortas a bajo costo y lo más importante una excelente organización y velocidad en la fabricación de herramientas innovadoras. Esto implica realizar herramientas de materiales ultra-duros. Aquí es donde entra el mecanizado por electroerosión, debido a que este proceso tiene como característica principal la capacidad de mecanizar piezas de materiales ultra-duros, que en el proceso convencional normalmente sería complicado.

Desde hace varios años los investigadores de producción mecánica trabajan intensamente en la optimización del diseño de herramientas para procesos de deformación, y en la innovación y mejor adaptación de las tecnologías de mecanizado de acuerdo con los requisitos prácticos. La electroerosión comenzó en 1954 para aplicaciones prácticas y desde entonces ha crecido hasta adoptar la posición de tecnología, su inconveniente es la complejidad inherente a esta tecnología. Las tecnologías de fresado y, en general, de arranque de viruta se usan desde hace mucho más tiempo y tanto su enseñanza como su documentación son mejores. El arranque de material ha recibido un nuevo impulso y ha ganado interés desde la introducción del MAV [9-12].

En proceso (EDM) o dicho de otra forma chispa EDM según los expertos, una de las variables importantes del proceso es la distancia de separación entre el material a mecanizar y el electrodo llamado “gap”, en el proceso al generar un arco eléctrico, se penetra en el material a mecanizar y el electrodo, inmerso en un fluido dieléctrico el cual ayuda a tener un buen corte debido a la generación de chispa. El proceso aplica calor y presión. En consecuencia, es independiente de la fortaleza mecánica de la pieza. Esto permite el mecanizado de cualquier forma, incluso cortes sesgados o grabados en la pieza. Si la geometría formada directamente por copia de un electrodo-herramienta (electroerosión por penetración) o indirectamente por

un camino de herramienta programado (electroerosión por hilo) no producen el resultado deseado, puede aplicarse cualquier movimiento superpuesto. Los ejemplos más conocidos son penetración planetaria y corte por hilo en ángulo.

Puesto que el electrodo-herramienta puede moverse por medio de CNC en cualquier dirección vectorial cartesiana, las instalaciones de electroerosión no requieren más de 4 ejes operables simultáneamente. Son, por ello, relativamente fáciles de programar. Son el resultado de la capacidad de las chispas de encenderse en cualquier dirección, y de la posibilidad de copiar la geometría de los electrodos, de generar nuevas formas por medio de movimiento CNC vectorial de electrodos con forma y de superponer movimientos a operaciones programadas. Finalmente, también de la capacidad de secuenciar el mecanizado de secciones de geometría parciales o de combinar una pluralidad de grabados en una operación de electro mecanizado utilizando electrodos en forma de bloque [9-12].

1.2. Hipótesis

“Es posible diseñar y construir un prototipo para corte por electroerosión mediante hilo para mecanizar materiales intermetálicos de base Fe-Al, producidos mediante fundición por inducción, los cuales son difíciles de mecanizar por herramientas de desbaste de viruta.”

1.3. Objetivos y aportaciones esperadas

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo de una máquina de EDM para mecanizado por electroerosión con hilo en dos ejes para el mecanizado de un material intermetálico de base Fe-Al.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar el prototipo que contará con cada uno de los elementos mecánicos y electrónicos.

- Determinar los tipos de mecanismos mecánicos y electrónicos para el funcionamiento de la máquina.
- Desarrollar un prototipo y realizar las pruebas de funcionamiento.
- Crear la interfaz entre el sistema CAM y la máquina EDM.
- Encontrar los parámetros de mecanizado para seleccionar la corriente, voltaje y así mismo lograr determinar la velocidad de avance de la máquina, así como la capacidad de corte de la misma.

1.3.3. Aportaciones derivadas de la presente tesis

Dentro de las aportaciones obtenida durante del desarrollo de esta tesis están:

- Desarrollo de una metodología para la obtención de parámetros de trabajo para el corte de materiales con aleación de aluminio, en este caso para un Intermetálico Fe-Al, del cual se tuvieron que obtener sus características tanto eléctricas como mecánicas.
- Modelado y Construcción del prototipo para pruebas de corte, así como su puesta en marcha. De igual forma se realizo la caracterización mediante microscopia del material maquinado para comparar con resultados en trabajos pasados y poder en un futuro optimizar su funcionamiento, la máquina en principio fue diseñada para dos ejes.

1.4. Metodología

La configuración y construcción de la máquina de electroerosión por hilo y el desarrollo experimental se describe a través de los siguientes pasos:

1. Revisión bibliográfica sobre el tema de Electroerosión por hilo.
2. Diseño y fabricación del centro de mecanizado EDM. En esta etapa del proyecto se realizó el análisis del tipo de material a utilizar en el prototipo, así como el diseño por medio de un programa CAD, Unigraphics NX6 para su modelado, observando los detalles técnicos del mismo, determinar las dimensiones físicas, así como de la ejecución de su fabricación.

3. Diseño de la interfaz, es decir, se fabricó el prototipo de máquina de electroerosión que funciona con un programa CAD libre de licencia para su uso. Se utilizó una tarjeta ARDUINO para controlar el equipo que es movido por motores a pasos.
4. Análisis y discusión de los resultados obtenidos al mecanizar el material intermetálico de base Fe-Al, se fabricaron probetas que se llevaron a caracterizar mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido para su análisis. y se determinó la microestructura y morfología de superficie, todo esto para que proyectos futuros poder tener un procedimiento de corte y optimizar el proceso de corte.
5. Análisis de resultados finales y escritura de tesis. realización de un análisis global del proyecto incluyendo conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 2 Antecedentes

2.1. Introducción

Mecanizado por Electroerosión mediante hilo (también conocida como la chispa EDM, ver figura 1) es un proceso de producción electro-térmico en el que un alambre de metal fino de un solo filamento (generalmente de latón), en relación con el agua des-ionizada (se utiliza para conducir la electricidad) permite que el alambre corte a través del metal por la generación de calor mediante chispas eléctricas. Un alambre de metal fino de un solo filamento, generalmente de bronce, se alimenta a través de la pieza de trabajo, sumergido en un tanque de líquido dieléctrico, por lo general de agua des-ionizada. Las máquinas de electroerosión con alambre (o hilo) de última generación, poseen controles computarizados para regular la trayectoria de corte del alambre, tienen varios cabezales para cortar varias piezas simultáneamente e incluyen funciones de control para evitar la ruptura del alambre. Estas máquinas son extremadamente caras pero poseen la capacidad de cortar placas de hasta 30 cm de espesor [1-3].

El proceso de Electroerosión por hilo utiliza también un alambre de latón [1-3], que va desde 0,01 hasta 0,36 mm de diámetro, el cual representa al electrodo. En la Figura 1 (a) se ilustra el proceso de electroerosión por hilo, un hilo de viaje va erosionando el material para formar un surco en la pieza de trabajo. En la figura. 1 (b) se ilustra la brecha que se genera entre las chispas eléctricas, el alambre y pieza de trabajo.

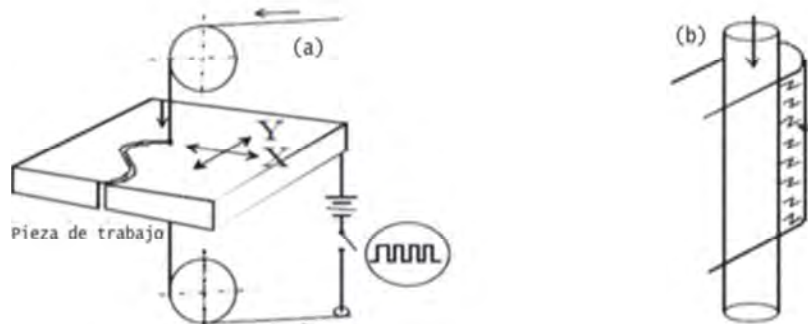


Figura 1. Esquema del proceso de electroerosión por hilo(a) [2]

El alambre de corte del proceso EDM se utiliza cuando se desean bajas tensiones residuales, es decir, para evitar la generación de esfuerzos cortantes debido al contacto entre el hilo de corte y la pieza a mecanizar, para esto, la generación del arco eléctrico minimiza el contacto directo entre los dos materiales antes mencionados promoviendo poca resistencia para realizar el corte.

El EDM es un desarrollo nacido en los años de la década de los 70, y por consiguiente, más moderno que el anterior, el cual sustituye al electrodo rígido por un hilo conductor y flexible; se tiene mejor movilidad (figura 2). Adicionalmente, las tasas de arranque de material con hilo rondan los $350 \text{ cm}^3/\text{h}$. La calidad, material y diámetro del hilo, en conjunción al voltaje y amperaje aplicado, son factores que influyen directamente en la velocidad con que una pieza pueda ser trabajada. También, el grosor y material de la pieza dictan ajustes para el cumplimiento del corte.

El acabado deseado en el proceso también es un factor de consideración que afecta el tiempo de ciclo de manufactura, pues el acabado que este proceso deja en la pieza puede ser mejorado al aplicar más pases semi-repetitivos de corte sobre la misma superficie sean ejecutados.

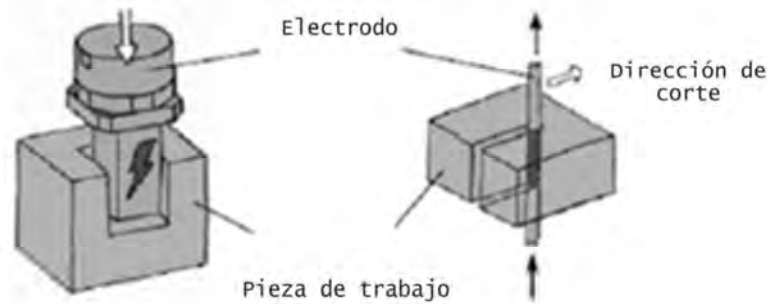


Figura 2. Tipos de electroerosión (lado izquierdo por penetración y lado derecho por hilo) [1]

2.2. Antecedentes

La electroerosión fue descubierta por el científico inglés Joseph Priestley[1-3]. Sin embargo, el mecanizado por descarga eléctrica no estaba plenamente aprovechado hasta 1943 cuando los científicos rusos aprendieron los efectos erosivos de la técnica que podría ser controlada y utilizada para fines de mecanizado.

Cuando se observó inicialmente por Priestley, fue un mecanizado EDM impreciso y plagado de fracasos. Desarrollado comercialmente a mediados de 1970, el proceso de electroerosión por hilo comenzó como una técnica viable que ayudó a dar forma a la industria del metal que vemos hoy. A mediados de 1980, las técnicas EDM fueron trasladadas a una máquina-herramienta. Esta aplicación del proceso EDM, ya más funcional, promovió su disponibilidad y aplicabilidad sobre los procesos de mecanizado tradicionales.

El mecanizado de procesos no-tradicionales, se refiere a que no se emplean herramientas tradicionales de desbaste mecánico para el metal que se va a retirar, y en su lugar se utilizan directamente otras formas de energía. Los problemas de manufactura de formas de alta complejidad, tamaño y una mayor demanda de productos de precisión y acabado superficial pueden ser resueltos a través de métodos no tradicionales. En la actualidad, los procesos no tradicionales poseen prácticamente una ilimitada aplicación, a excepción de las capacidades volumétricas de las tasas de remoción del material. En este último sentido se ha buscado avanzar en los estudios de desbaste para aumentar las tasas de remoción de material. A medida que aumenta la velocidad de eliminación o remoción de material, la rentabilidad de las operaciones también aumenta, estimulando a utilizar cada vez más los procesos no tradicionales. El proceso de mecanizado por descarga eléctrica se emplea extensamente para hacer herramientas, troqueles y piezas de precisión [4,5].

El proceso EDM ha ido remplazando el proceso de taladrado, fresado, rectificado y mecanizado y es ahora una opción de mecanizado bien establecida en muchas industrias manufactureras en todo el mundo. Con este proceso, es posible mecanizar componentes geoméricamente complejos o difíciles de desbastar, y resulta un proceso preciso. Los materiales así mecanizados pueden ser: aceros de herramientas que sufren un tratamiento

térmico, materiales compuestos, súper-aleaciones, materiales cerámicos, carburos, etc., aceros resistentes al calor que se utilizan ampliamente en moldes y matrices, industrias de la fabricación, la industria aeroespacial, aeronáutica y las industrias nucleares. El mecanizado por electroerosión también ha hecho sentir su presencia en los nuevos campos como los deportes, médicos y quirúrgicos, instrumentos ópticos, etc. [6-12].

Desde hace varios años los investigadores de producción mecánica trabajan intensamente en la optimización del diseño de herramientas para procesos de deformación, y en la innovación y mejorar prácticas de las tecnologías de mecanizado de acuerdo con los requisitos del proceso. La electroerosión comenzó en 1954 para aplicaciones prácticas y desde entonces ha crecido hasta adoptar la posición de tecnología común y bien aceptada en los talleres de fabricación de herramientas y utillajes. Tanto la versión de electroerosión por penetración, cómo la electroerosión por hilo están bien introducidas y se aplican con normalidad. Su inconveniente es la complejidad inherente a esta tecnología [5,6]. Dado que la formación profesional en electroerosión se ofrece en contadas ocasiones, en la mayoría de los talleres estos procesos se aplican a partir de “recetas de cocina” adaptadas empíricamente por los propios usuarios.

En las últimas décadas, la tecnología EDM ha evolucionado gradualmente y tiende a convertirse en un proceso de fabricación importante. El EDM es un proceso que erosiona termoeléctricamente el material de la pieza por una serie de discretas chispas eléctricas entre la pieza y el electrodo enrojecido sumergido en un fluido dieléctrico. A diferencia del corte tradicional y procesos de molienda que se basan en una herramienta de corte de material de gran dureza o que utiliza materiales abrasivos para eliminar el material más suave con el trabajo mecánico, el proceso de electroerosión por chispas eléctricas no utiliza energía térmica para erosionar el material no deseado y generar la forma final deseada. La remoción de material en el proceso EDM depende principalmente de la conductividad eléctrica y la temperatura de fusión del material de trabajo [1-3]. Una pieza de trabajo con mayor conductividad eléctrica y menor temperatura de fusión, se puede mecanizar de manera más eficiente. La dureza del material ya no es factor dominante que afecte a la herramienta produciendo desgaste de la herramienta y demoras en el proceso de mecanizado.

El proceso de EDM tiene la capacidad de que el sistema al mecanizar sea preciso, y mecanice formas irregulares con un sistema de control de CNC. Además, la fuerza de corte en el proceso de EDM es pequeña, lo que lo hace ideal para la fabricación de partes con características miniatura, es decir de dimensiones requeridas para la nanotecnología [2]. A diferencia de las máquinas de electroerosión con electrodo de forma, es decir, por penetración a las que la polaridad aplicada puede ser invertida, la polaridad en el proceso de electroerosión con hilo es constante, o sea que la "mesa" o marco donde las piezas son montadas para ser trabajadas es tierra; esto significa que es de polaridad negativa. El hilo, por consiguiente, es el componente mecánico al que la carga positiva es dirigida.

Todas las máquinas reciben un hilo a modo que éste se tense en forma vertical (eje "Z"), para producir cortes y movimientos en el plano perpendicular, es decir, "X" e "Y". Más en su mayoría, las máquinas de electroerosión con hilo tienen la capacidad de mover sus componentes para ajustar el hilo vertical y producir un ángulo limitado de corte (ejes "U" y "V"). En maquinaria más elaborada, la electroerosión con hilo es posible mientras la pieza es rotada (cuarto axial de movimiento), esto significa que mientras la pieza está en un movimiento rotacional, otros movimientos axiales son simultáneamente posibles.

La eficiencia, exactitud y complejidad con que la pieza ha de ser trabajada es afectada por la calidad, condición y funcionalidad de la máquina a ser utilizada. El tamaño del recipiente, contenedor del líquido, puede ser un factor determinante sobre cuantas piezas y el tamaño de las piezas que pueden ser preparadas para el proceso.

Dado que las nuevas aplicaciones EDM, como el mecanizado de la ingeniería avanzada de nuevos materiales, la microfabricación no es un proceso tradicional, la selección de los parámetros del proceso no está fácilmente disponible. La tasa de remoción de material (MRR) depende en gran medida el proceso de selección de parámetros [2-4].

Por ejemplo la máquina de electroerosión por hilo ONA RE 250 [4], dispone de 5 ejes con control numérico: X e Y en la mesa dónde se fija la pieza y U, V y Z que se mueven desde la boquilla de arriba. Las boquillas entre las que va fijo el hilo tienen la misión de proporcionar un chorro de agua a presión que se llevará el material erosionado para la limpieza del canal de

erosión. Se puede trabajar en aspersion: en la que el único dieléctrico es el agua del chorro de las boquillas. Se puede trabajar también en inmersión en la que la pieza está sumergida en un baño de agua des-ionizada aunque no se recomienda en la mayoría de los casos [7-12].

El agua con el material de erosión pasa al filtrado que se realiza por un filtro permanente de carbono activo que recoge todas las “virutas” de la erosión (figura 3). De vez en cuando se limpia el filtro y las virutas se pasan a unos tanques en los que por decantación se van acumulando formando lodos. El hilo una vez realizada la electroerosión se lleva por un sistema de rodillos y guiado más o menos complejo hasta un troceador dónde se corta para su reciclado posterior (chatarra) [4].

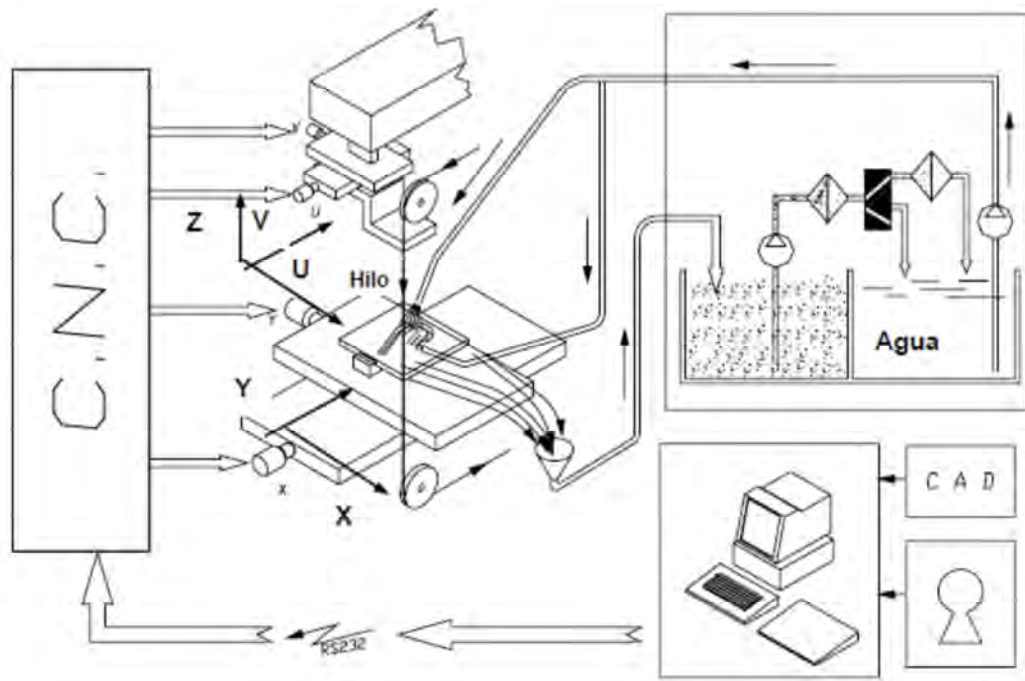


Figura 3. Esquema de una máquina EDM (corte por hilo) [4]

Capítulo 3 Procedimiento para el cálculo y aplicación general de los parámetros para la máquina EDM

De acuerdo a lo previsto en este proyecto, se determinó el procedimiento de cálculo de parámetros base, para de ahí partir en una secuencia de búsqueda de objetivos los cuales nos permitirán determinar cualquier variable, como son: corriente, voltaje, pulsos, y finalmente el avance de corte, los cuales permiten tener un control completo de la máquina. Su interfaz, permite modificar datos esenciales para su libre y sencilla operación de la misma.

Así mismo, se utilizaron datos de referencia que permiten tener un punto de comparación contra las subsiguientes pruebas según sean las necesidades de la misma. Para el actual proyecto se enfocó a mecanizar por medio de este proceso un corte mediante hilo para un material intermetálico del que se obtuvieron sus principales características, para así mismo, incluirlas en la valoración de corte de dicho material, las características del material intermetálico se mencionaran en capítulos posteriores.

Procedimiento para el cálculo de los parámetros:

1. Se realizó una revisión bibliográfica, mediante la cual se obtuvo la suficiente información sobre el material a cortar para tener valores de referencia similares, así como los valores por separado de cada material.
2. Se analizaron las capacidades de la máquina en lo que se refiere principalmente al voltaje máximo, corriente y número de pulsos que la misma puede ofrecer.
3. El Control de los parámetros de funcionamiento fue establecido de la siguiente manera:
 - a. Voltaje: El voltaje que ofrece este prototipo se regula mediante circuitos integrados como el “max1044”. Este multiplica el voltaje según sea la necesidad y puede estar controlado por la tarjeta Arduino, con la cual se puede establecer un control total de la máquina.
 - b. Corriente: Esta deberá ser calculada cada ocasión que se modifique el material a cortar, debido a que el valor prestablecido solo se utilizará para el material al que fue calculado. La finalidad de esto es evitar el paso de corriente innecesaria que perjudique el proceso de corte. Este análisis se basa en la ley de Ohm para

la determinación del valor de corriente, es decir, seleccionando el valor de la resistencia entre el material base y la tierra.

- c. Pulsos: estos valores al igual que la corriente son modificados según sea el material y siempre se partirá de valores pequeños cuando no se tengan valores algunos, o bien se tengan como valores promedio de cálculo o de investigación.

La forma, frecuencia y duración se controlan con la plataforma Arduino.

- 4. La programación para el corte se realiza mediante el programa de licencia libre: “Repsnapper” y el programa final de diseño de mecanizados “replicatorG” que permite la programación detallada, que se carga posteriormente a la tarjeta Arduino, y de ahí se transfiere a los sistemas de movimiento y operación del prototipo realizando los cortes por electroerosión.

Capítulo 4 Diseño de la estructura y mecanismos de la plataforma máquina EDM mediante hilo

De acuerdo a las reglas de diseño es fundamental determinar cada uno de los valores dimensionales de la máquina, así como cada elemento estructural necesario para realizar los movimientos planteados en documentos anteriores, tales como lograr tener dos movimientos esenciales en un eje “x” y “y”.

4.1. Diseño conceptual

Para el diseño conceptual, se siguió un procedimiento ordenado, separando y definiendo los objetivos o metas, delimitando las condiciones, eliminando los prejuicios y buscando variantes, para poder llegar a la toma de decisiones y obtener así la mejor solución posible [13].

Mediante el establecimiento de las tareas, se logró la recopilación de información sobre las exigencias que se establecen para la solución, así como las condiciones predominantes y su significado. Como resultado se obtienen los datos de funcionamiento y la lista de exigencias, que contienen los objetivos y las condiciones de la tarea por resolver en forma de exigencias o deseos. Entendiendo como exigencias aquellas que se deben satisfacer bajo cualquier circunstancia y como deseo aquellas que sólo se satisfacen según la posibilidad. Dado lo anterior se define:

Datos de funcionamiento.

- Para uso en laboratorio.
- Máquina de pruebas para mecanizado mediante hilo con agua desionizada.
- Capacidad de ser utilizada en pequeños talleres.

Exigencias

- Práctica.
- Sencilla.
- Económica.

- Segura.
- Confiable.
- Sistema de avance automático (gap).
- Alimentación a 127 VCA 60 Hz, convertida a VCD a distintos voltajes.
- Control de la corriente (A).

Deseos logrados

- Forma de onda (tiempo ON/OFF) eficiente.
- Utilización de partes estándar.
- Posibilidad de adaptación durante la construcción.
- Evitar el uso de tarjetas delicadas.
- Uso de tarjeta Arduino, sencilla de programación y utilización.
- Control de la posición de la pieza a mecanizar (x, y).

Dada la complejidad de la máquina, fue necesario realizar un proceso de abstracción para el conocimiento de los problemas principales. En esta etapa se resaltó el núcleo del problema y de esta manera fue posible librarse de ideas fijas y soluciones convencionales para reconocer nuevos caminos de solución.

Para ello fue necesario tener un conocimiento pleno de los parámetros del proceso y cómo estos afectan el proceso EDM, este análisis dio como resultado un diagrama de funciones (figura 4) donde la función total se vuelve lo más concreta posible, con referencia a la transformación de energía, material y señales. Ésta se define y se descompone en funciones parciales reconocibles.

Una vez establecidas las funciones, se realizó la búsqueda de principios de solución para cada una de las variables de la máquina. Estas soluciones se combinaron con ayuda del diagrama de funciones para lograr el cumplimiento de la función total, con el mínimo de gasto y esfuerzo, pero en cumplimiento con las exigencias [14-22].

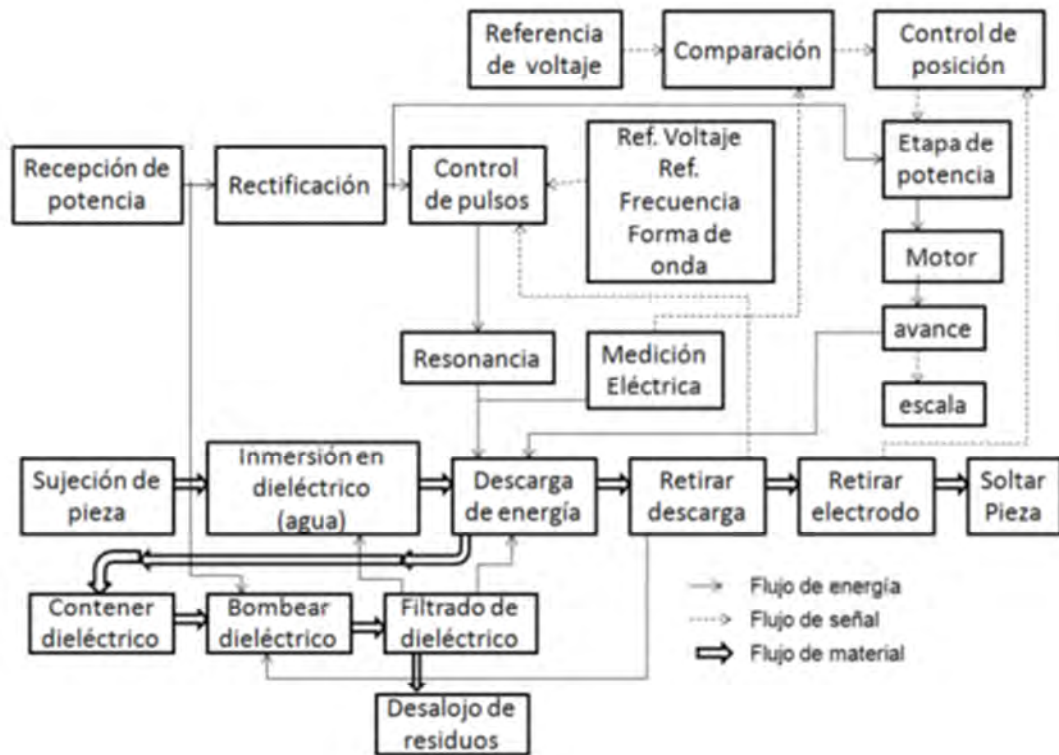


Figura 4. Diagrama de funciones para la máquina EDM [13]

4.2. Ensamble general del modelo de la máquina EDM

Las partes más importantes diseñadas para la estructura donde se montaron los elementos de la máquina EDM se muestran en la figura 5, que ilustran cada parte importante del mismo, modelado en Unigraphics, programa de modelado en donde después de haber definido cada uno de sus elementos se realizó a su construcción.

Después de haber definido cada uno de los elementos de la máquina se procedió a su fabricación para su posterior ensamble y realización de las pruebas de funcionamiento de la misma.

Para el posicionamiento de la mesa de trabajo se necesitó de una referencia sobre cómo establecer la configuración de los ejes por lo que se realizaron pruebas en el programa de diseño Unigraphics, obteniendo de manera satisfactoria cada uno de los posicionamientos de los ejes x - y .

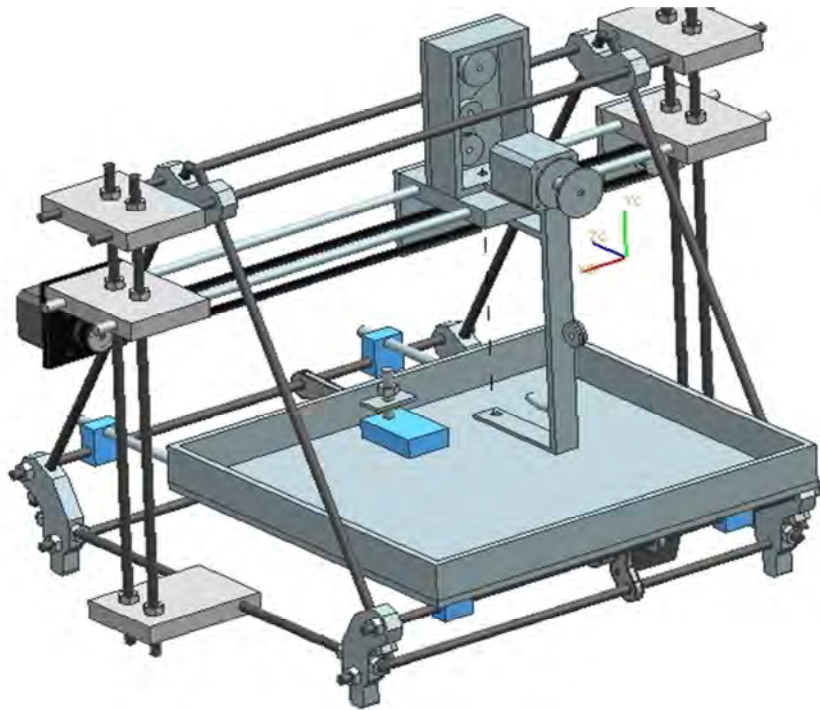


Figura 5. Modelo de la máquina en Unigraphics NX6

4.3. Diseño de mecanismo de avance en dos ejes x-y

El posicionamiento de la máquina se estableció en dos ejes trasladados por motores a pasos tipo NEMA17, cumpliendo con las características deseadas de funcionamiento y torque requeridos para el movimiento de la máquina.

El sistema de posicionamiento que se diseñó y seleccionó es del tipo de polea y correa, similar al de un sistema aplicado en impresoras a color, por lo que mencionaré las principales características del sistema que se muestra en la siguiente figura 6.

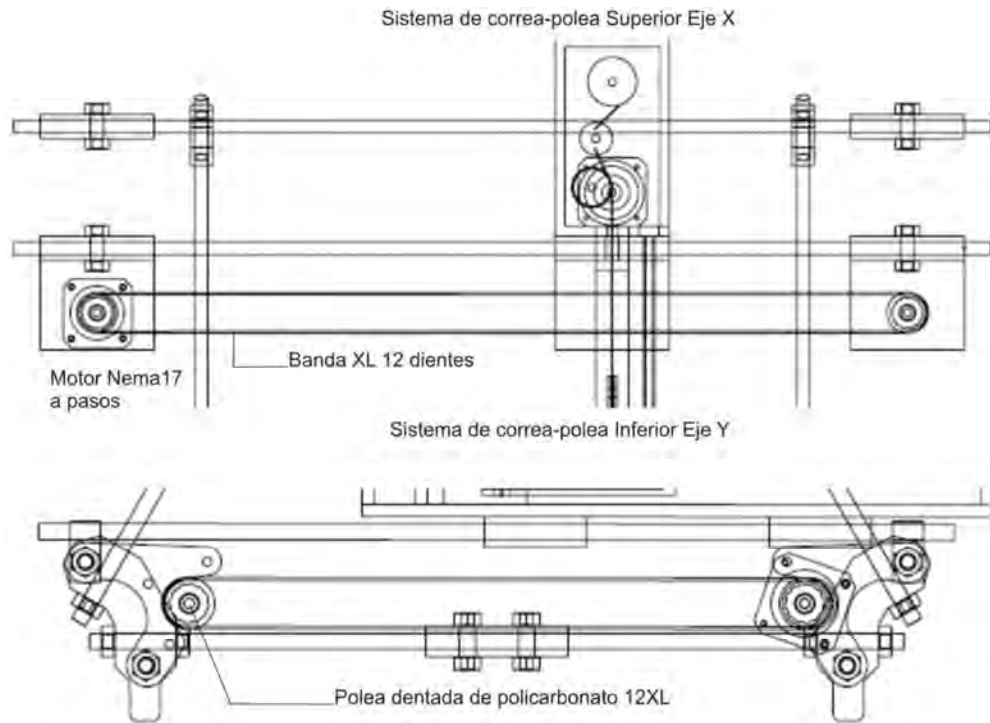


Figura 6. Sistema de posicionamiento x-y de la máquina EDM mediante poleas y bandas

Posterior al diseño se realizó la etapa de fabricación y ensamble del sistema de posicionamiento mediante una polea-correa, donde se utilizó correa plana del tipo XL de 3/8" de ancho acoplada a una polea de policarbonato; que de acuerdo con el diseño 12XL se empleó una de paso 12 para correa del tipo antes mencionada (Ver anexo B).

Se realizaron pruebas de funcionamiento ya acoplados con los motores NEMA 17, obteniendo excelentes resultados y apenas una pequeña vibración, la cual se corrigió mediante la adición de un tensor de polea que nos permitió dar la tensión necesaria al sistema de posicionamiento.

En total se utilizaron 4 poleas tipo XL y dos metros de correa plana, la cual se acopló al sistema. En la figura 7 se puede observar ya instalado y funcionando el sistema descrito anteriormente.

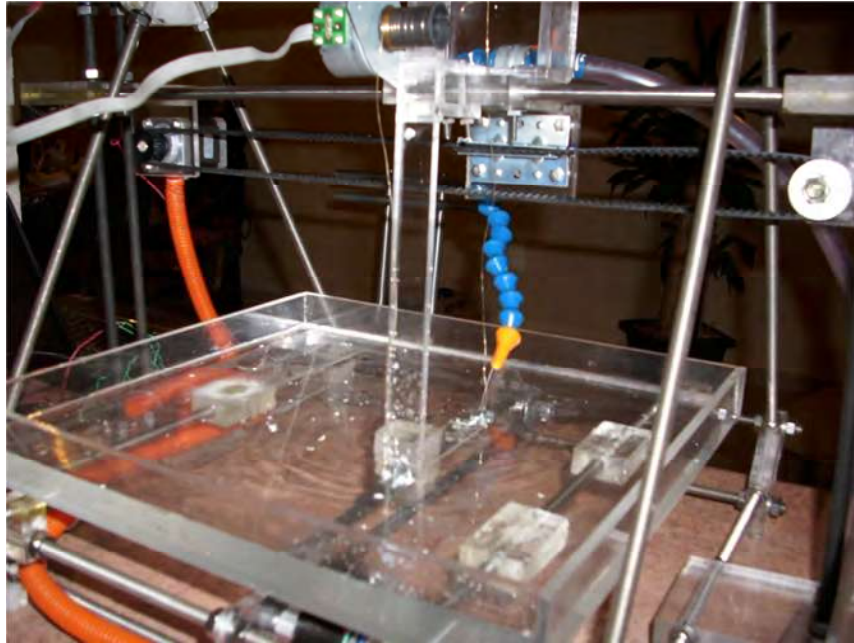


Figura 7. Sistema de posicionamiento mediante poleas y bandas ensamblado

4.3.1. Control de los motores NEMA 17 por EasyDriver

Para controlar los motores a pasos se utilizó una tarjeta Easydriver v4.4 para iniciar la programación, la primera acción fue vincular cada motor a pasos con su EasyDriver correspondiente (ver figura 8 y figura 9), para después vincular los 3 EasyDriver con la plataforma abierta Arduino [23-25].



Figura 8. Tarjeta EasyDriver v4.4 para controlar los motores a pasos NEMA17. [23]

Datos básicos de la tarjeta para su instalación y funcionamiento.

POWER IN (Alimentación). El EasyDriver puede ser alimentado 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. El EasyDriver permite controlar un motor de pasos (Stepper) con tan sólo 2 líneas, una de las cuales 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 los cuales se describen en el programa de la tarjeta Arduino.

MS1 Y MS2. El EasyDriver, permite manejar un motor de pasos con un grado de precisión bastante alto, así que se puede modificar el tipo de paso que mueve al motor. Por ejemplo giros rápidos y eficaces o giros lentos y precisos.

Tipos de paso: 1, 1/2, 1/4, 1/8.

Tabla 1 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. El EasyDriver nos permite parar el motor en cualquier instante, con sólo habilitar un LOW en la entrada del pin SLEEP, esto permite detener el motor, y quedar en espera hasta que el pin SLEEP reciba un HIGH para ponerse en marcha de nuevo.

MOTOR COIL A Y B. 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 ser conectados con las 2 bobinas del motor y así ser controlados (ver figura 9).

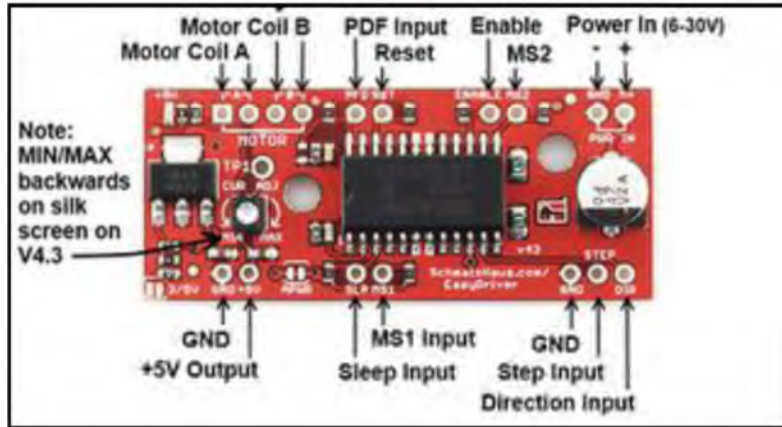


Figura 9. Pines tarjeta EasyDriver v4.4 [23]

Cada bobina tiene 2 cables de salida; por lo que cada pareja de cables pueden ir directamente conectados a la tarjeta 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 10).

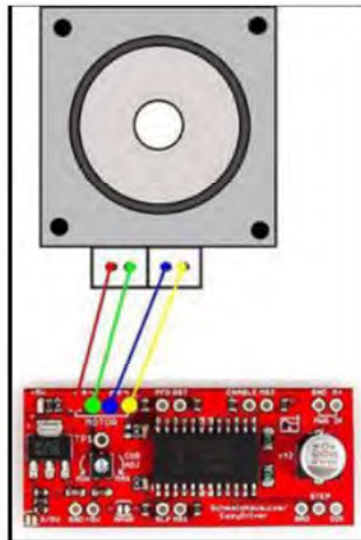


Figura 10. Conexión de las 2 bobinas de un motor a pasos en los pines COIL A y B

4.4. Diseño de detalle en planos constructivos

En este proceso de diseño se realizan los planos con los cuales se determinaron las dimensiones, tipos de material, así como cada una de las características de cada elemento del dibujo general, es decir, el proceso general es:

Primero: Se genera un plano general el cual contiene a grandes rasgos todas las piezas de la máquina EDM, incluida dentro del mismo plano una lista de partes que indica el nombre de la pieza, así como la cantidad de cada uno de ellos, estos datos se pueden observar en la figura 11 (para más detalles ver Anexo A).

Segundo: Ya teniendo un plano general se generaron los planos individuales los cuales incluyen a detalle: dimensiones, tipo de material, cantidad de piezas del mismo, número de plano, y finalmente el número de pieza derivado del plano general. Con esta información se realizó el proceso de ensamble general ya teniendo cada uno de los elementos. (Ver Anexo A)

Se muestra en la tabla 2 cada uno de los elementos que se utilizaron para la fabricación de la maquina EDM que posterior al diseño, se procedió a la fabricación de cada uno de ellos, la mayoría de los elementos estructurales fueron fabricados en acrílico con capacidades de resistencia bastante buenos para ser utilizado y otro material fue un acero al carbón y en las correderas de la plataforma principal fue de acero inoxidable que en capítulos posteriores se mencionan.

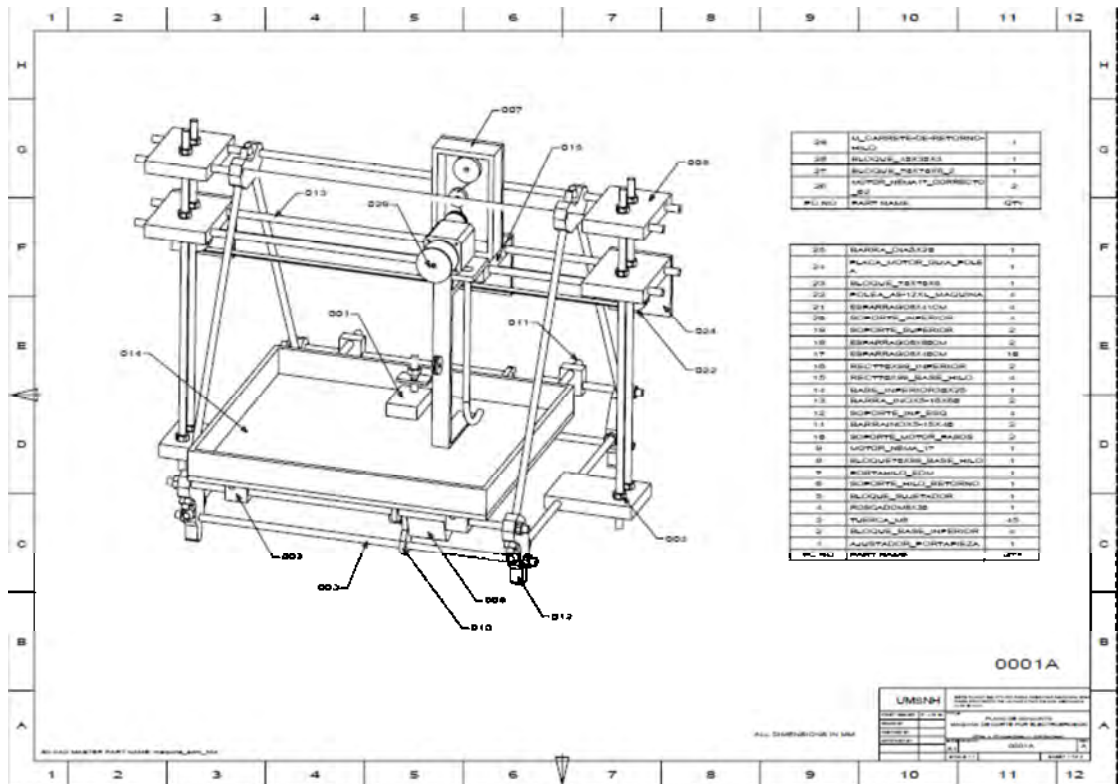


Figura 11. Dibujo de detalle de la máquina EDM en Unigraphics NX6

Tabla 2 Listado de material utilizado estructuralmente y de movimiento

Pza. No.	Nombre de la parte	Cantidad
1	AJUSTADOR_PORTAPIEZA	10
2	BLOQUE_BASE_INFERIOR	4
3	TUERCA_M8	45
4	ROSCADO M8X30	1
5	BLOQUE_SUJETADOR	1
6	SOPORTE_HILO_RETORNO	1
7	PORTAHILO_EDM	1
8	BLOQUE 70X99_BASE_HILO	1
9	MOTOR_NEMA_17	3
10	SOPORTE_MOTOR_PASOS	2
11	BARRA INOX5-15X40	2
12	SOPORTE_INF_ESQ	4
13	BARRA_INOX5-16X60	2
14	BASE_INFERIOR30X25	1
15	RECT70X99_BASE_HILO	4
16	RECT70X99_INFERIOR	2
17	ESPARRAGO8X40CM	10

18	ESPARRAGO8X60CM	2
19	SOPORTE_SUPERIOR	2
20	SOPORTE_INFERIOR	4
21	ESPARRAGO8X41CM	4
22	POLEA_A9-12XL_	4
23	BLOQUE_70X70X6	1
24	PLACA_MOTOR_GUIA_POLEA	1
25	BARRA_DIA5X20	1
26	BLOQUE_70X70X6_2	1
27	BLOQUE_40X30X3	1
28	M_CARRETE-DE-RETORNO-HILO	1
29	BANDA XL PARA POLEAS	2

4.5. Análisis estructural por elemento finito

Se realizó el análisis estructural con el programa Unigraphics NX y Ansys como solver.

El mallado consistió de 68320 elementos tetraédricos del tipo solid92, se aplicaron restricciones en los 4 apoyos y se sometió a cargas como se muestra en la figura 12.

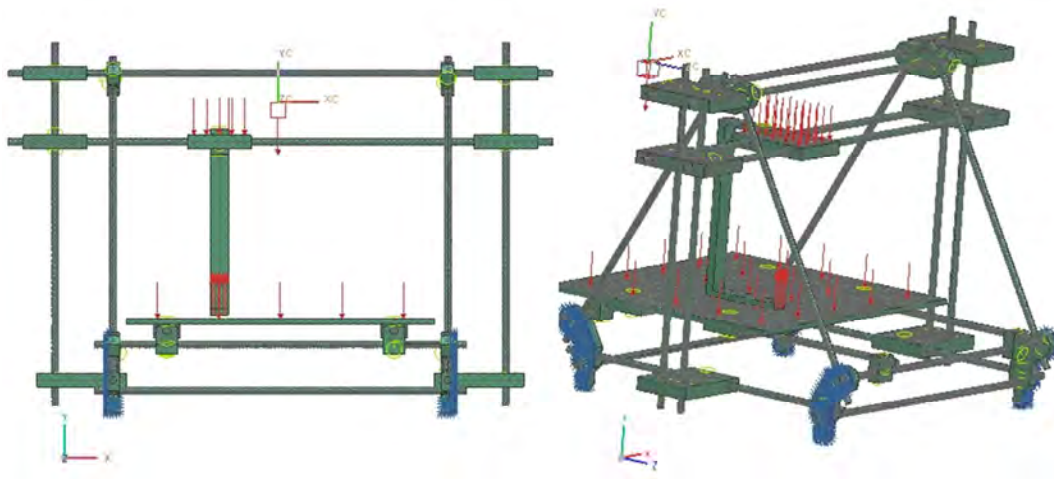


Figura 12. Restricciones y cargas aplicadas a la estructura de la máquina de electroerosión.

Se obtuvo un esfuerzo máximo de Von Mises del orden de 45.24 MPa, valor muy inferior al de 125 MPa para el material acrílico utilizado en los soportes, bandeja y elementos de alimentación del hilo, mientras que para las barras de Acero Inoxidable ASTM A304 su resistencia a la tracción es de 510 MPa, por lo que se puede deducir que la estructura soportará

las cargas requeridas para su operación, y la deformación unitaria es del orden de $6.05e-4$ mm/mm, dicha deformación no compromete el desempeño de la máquina. (Figuras 13 y 14)

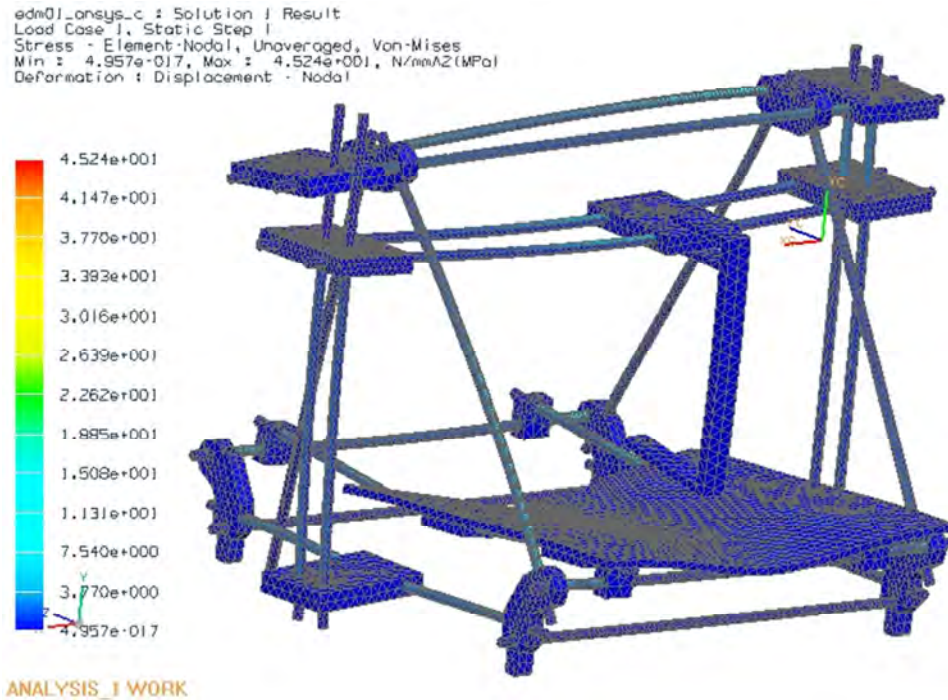


Figura 13. Esfuerzos de Von Misses en la estructura de la máquina EDM

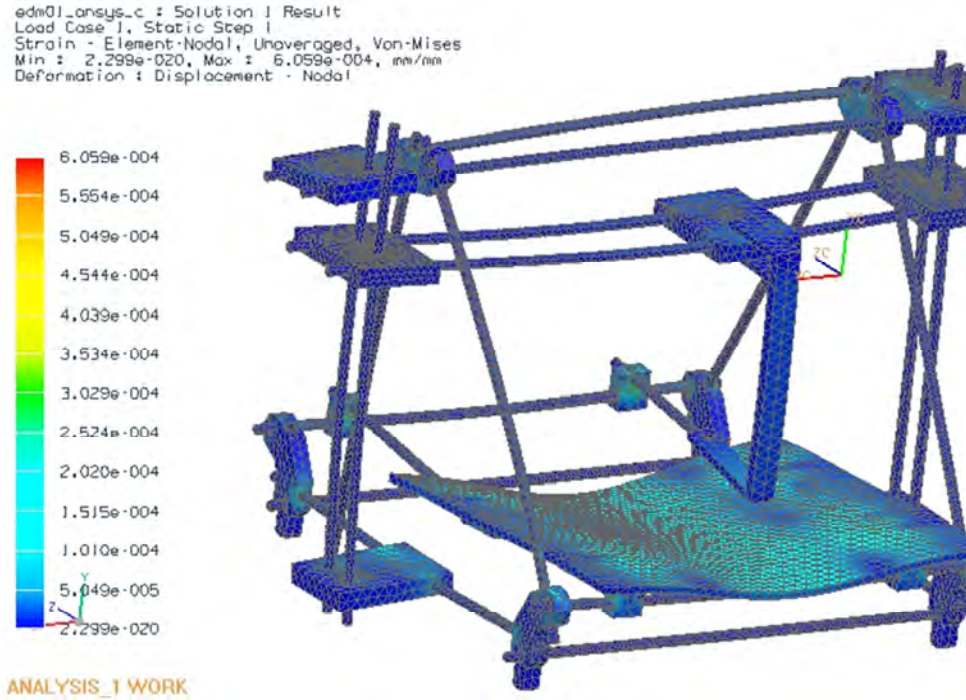


Figura 14. Deformación unitaria para la máquina EDM

4.6. Máquina EDM diseño y fabricación final

Previamente se planteó el diseño de una máquina utilizando del paquete de diseño Unigraphics NX para el modelado, en el cual se obtuvieron resultados positivos, que finalmente derivaron en la construcción de la máquina EDM por hilo, la cual permitió obtener la esencia del diseño y construcción (de acuerdo a trabajos previos [13-17]), pero finalmente se obtuvo el diseño final e independiente que respeta cada uno de los criterios de diseño.

Finalmente, se logró adaptar cada uno de los elementos necesarios en la máquina EDM como son: El sistema de bombeo del fluido dieléctrico seleccionado para este proceso, el movimiento lineal de posicionamiento en dos ejes y un motor para enrollar el hilo, en un movimiento de renovación de hilo para no contaminar el proceso de corte.

En la figura 15 se puede observar que la máquina ya contiene cada uno de los elementos propuestos desde un inicio del proyecto como son: sistema de bombeo, porta-electrodo,

interfaz Arduino-ReplicatorG, generador de pulsos, y voltajes de la misma; más adelante se describe cada uno de ellos a detalle.

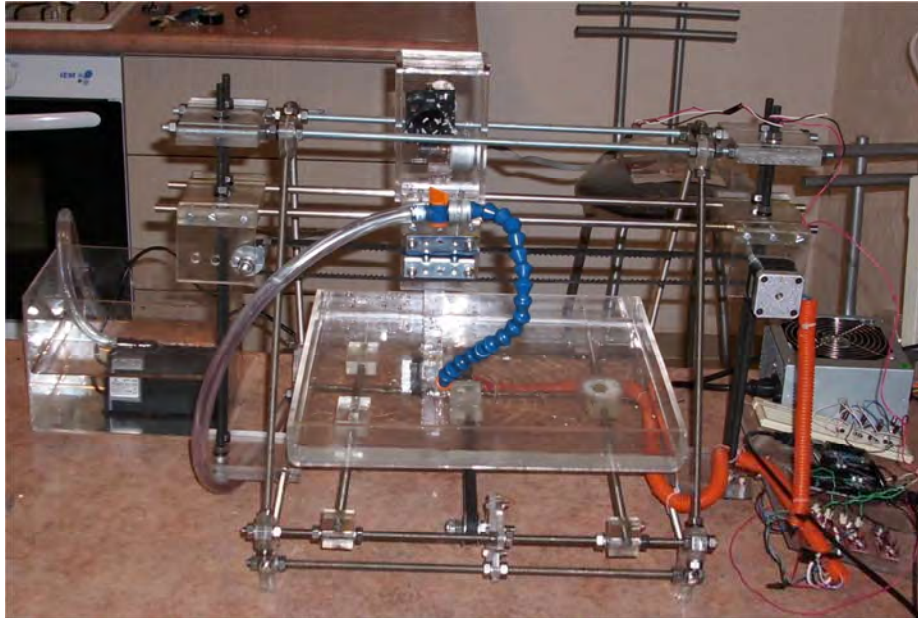


Figura 15. Máquina EDM fabricada según diseño propuesto

Capítulo 5 Sistema electrónico de la máquina EDM

En esta parte se explicará con más detalle la conexión de cada elemento electrónico y eléctrico de la máquina, como se mencionó lo que se refiere a las tres principales variables de control de la máquina, que son: voltaje, corriente y número de pulsos en ON, y pulsos OFF, ver tabla 3 para valores de inicio del corte por hilo.

En este capítulo se da una descripción guía para realizar la conexión del circuito, así como de los resultados experimentales que se obtuvieron al realizar las conexiones conforme a las simulaciones hechas previamente en trabajos pasados, asimismo se muestran los valores en tiempo real y de ahí se tomaron algunas decisiones para iniciar los cortes.

Tabla 3 Parámetros mínimos y máximos para la experimentación

Variable a Controlar	Etiqueta	Min.	Intermedio	Max.
Pulso ON (μ s)	ON	20	48	100
Pulso OFF (μ s)	OFF	6	8	10

5.1. Voltaje para el corte por hilo EDM

En el presente capítulo se describe cada uno de los pasos realizados para la regulación y control de los diferentes voltajes requeridos, los cuales son controlados por un sistema de multiplicación de voltaje, controlados por un circuito integrado MAX1044 y dependerá del voltaje, desde 24 Volts hasta 60 Volts establecidos estos como: el rango mínimo y máximo de trabajo para el caso de los materiales intermetálicos.

El circuito integrado MAX1044 tiene la propiedad de ser un convertidor de voltaje, las principales propiedades es que puede invertir, doblar, dividir o multiplicar un voltaje de entrada positivo. Una de sus propiedades utilizada, es el de multiplicar el voltaje de entrada, esto debido a una conexión en cascada de varios de estos circuitos, así se logró cada uno de los voltajes requeridos en los parámetros de funcionamiento de la máquina, ver figura 16.

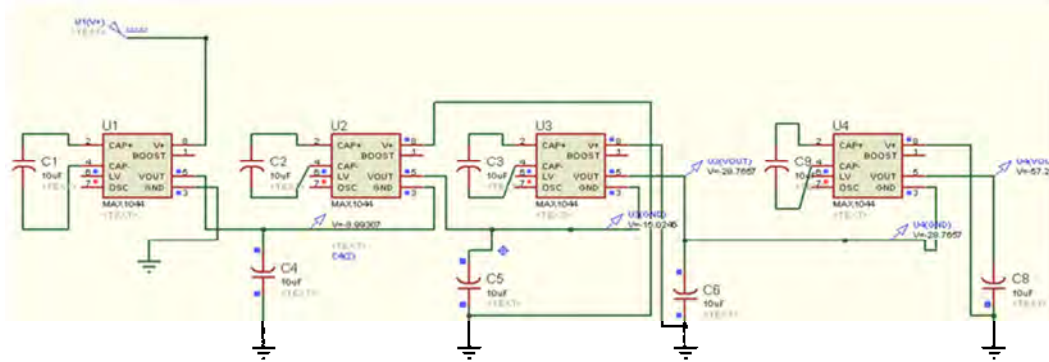


Figura 16. Diagrama eléctrico simulado en Proteus

Posterior a la simulación, se realizaron las pruebas experimentales, donde se pudieron constatar cada uno de los valores obtenidos en la simulación y solamente se observó una pequeña pérdida de carga de alrededor del 2 al 5 % de pérdida de potencia, pero considerada desde un inicio, ver figura 17.

Al obtener los valores deseados y de simulación se utilizó el programa ARES para imprimir las pistas y plasmarlas en una placa y poder soldar cada uno de los elementos del circuito e instalarlo en la máquina EDM para la generación de voltajes que inician desde los 12 volts hasta 57 volts como máximo para las pruebas de corte.

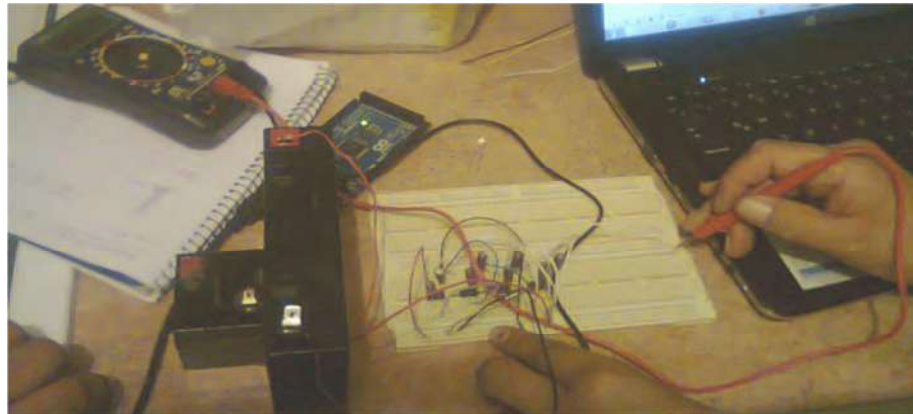


Figura 17. Pruebas de voltaje de circuito MAX1044

5.2. Generador de pulsos

Para esta etapa de control, se utilizó la tarjeta Arduino Mega2560, así como la tarjeta Arduino Uno, las cuales tienen como propiedad realizar varios arreglos y poder controlar los pulsos necesarios para los cortes de la pieza, así como el movimiento de los dos ejes requeridos en este proyecto de investigación. También permite controlar principalmente los parámetros de funcionamiento de la máquina EDM para materiales intermetálicos, y en lo sucesivo poder manipular estos valores, para que sea posible realizar cualquier tipo de mecanizado por este proceso. La figura 18 muestra la conexión del circuito para poder tener control mediante la tarjeta Arduino mega2560 y Arduino Uno [24].

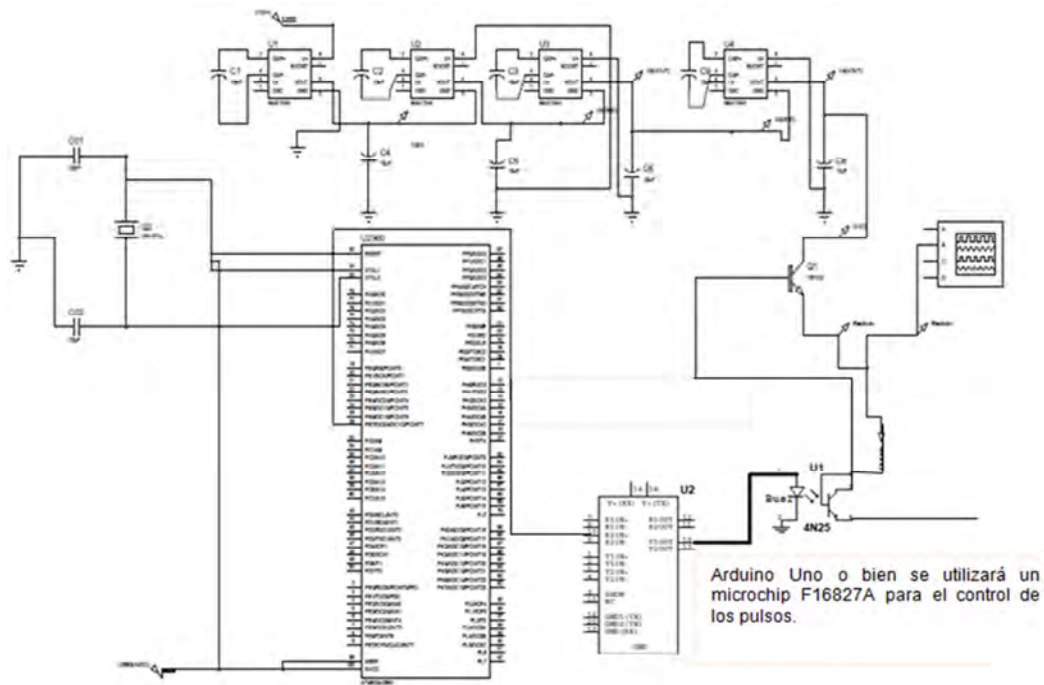


Figura 18. Circuito electrónico de la tarjeta Arduino MEGA y Arduino Uno, con MAX1044 para control de voltaje y pulsos eléctricos conforme a lo requerido

5.3. Control de la corriente en la chispa EDM

Para poder manipular esta etapa del control de la corriente se realizó en base al principio de la ley de ohm está determinada por la ecuación:

$$I = \frac{V}{R} \tag{1}$$

Donde: I es la corriente, V el voltaje, R la resistencia. Si se tiene un voltaje constante, y conociendo el valor de la corriente buscada se obtiene al despejarla de la ecuación 1, la resistencia para determinar su valor de la conforme a la potencia que se está administrando.

$$R = \frac{V}{I} \tag{2}$$

Dependiendo de qué resistencia se requiera, se activará un transistor que permitirá el flujo de corriente necesario. En la figura 19, se muestra cómo se realiza el arreglo para tener control sobre la corriente que se requiera, y todo será controlado por la tarjeta Arduino Mega2560, la cual cuenta con suficientes puestos de entrada y de salida de señales, tanto digitales como análogas para controlar el sistema electrónico [25-30].

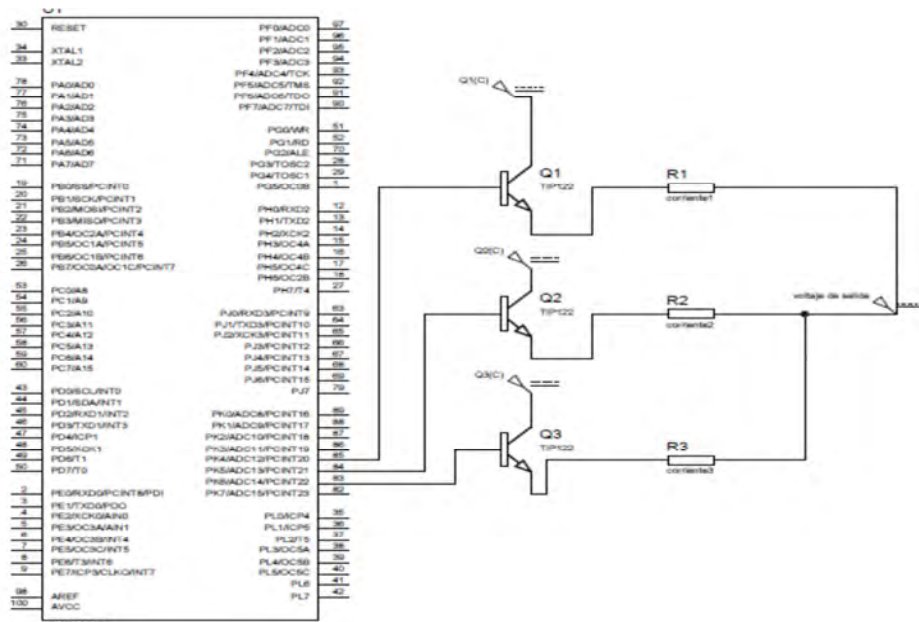


Figura 19. Circuito electrónico para controlar la corriente del sistema

Capítulo 6 Sistema de circulación del sistema EDM

El fluido dieléctrico realiza una función muy importante que es la de evacuar los residuos de la erosión, que no son otros mas que el material arrancado de la pieza y el pérdida por el electrodo. La presencia de residuos de erosión en suspensión en el fluido dieléctrico provoca principalmente:

- a) Una disminución de la capacidad de arranque.
- b) Una mayor propensión a la generación de arcos eléctricos ramificados.
- c) Una mayor posibilidad de generación de descargas parásitas que pueden reducir la precisión de la pieza.

Se estableció el sistema de circulación conforme a los requerimientos iniciales con el propósito de realizar cortes de buena calidad (figura 20). Los cuales se enlistan a continuación:

1. 2 Tanques de almacenamiento.
2. Bomba de circulación.
3. Manguera, varios calibres.
4. Filtros
5. Válvula esférica.

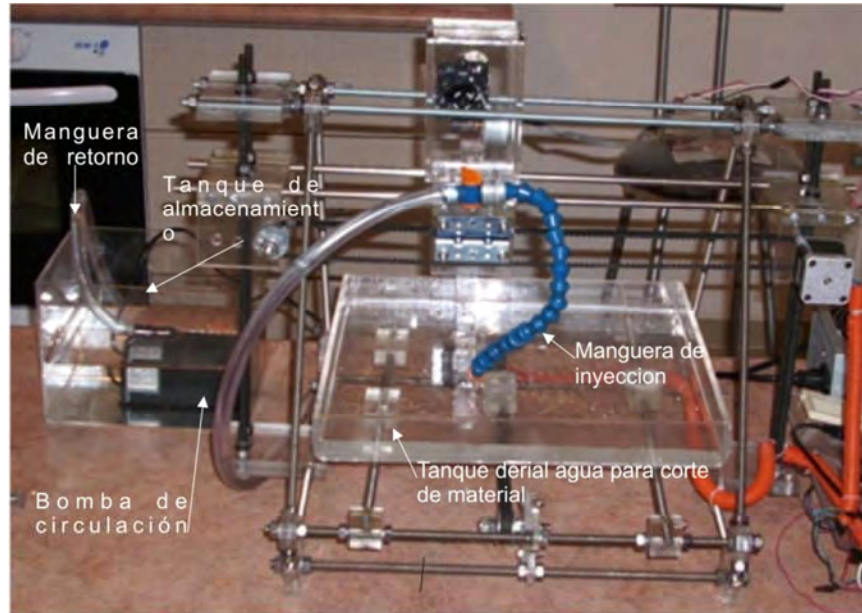


Figura 20. Sistema de circulación con cada componente

Capítulo 7 Porta-electrodo de la máquina EDM

Para poder fabricar el porta-electrodo de este prototipo, previamente se realizó un modelado en Unigraphics NX para determinar las dimensiones y realizar su fabricación (figura 21). Lo importante de este porta-electrodo a diferencia de los demás procesos EDM, es que este proceso usa hilo de un diámetro muy pequeño. En este proyecto se utilizaron tres tipos de hilos: Molibdeno de 0.18 mm de diámetro, latón de fabricación nacional y latón de importación de 0.25 mm de diámetro (figura 22). Se debieron considerar las velocidades de avance del hilo, así como no rebasar los límites de tensión de cada uno de los hilos para poder realizar las pruebas de corte del proceso.

Es importante mencionar que se llevara a cabo varios cortes con cada uno de los hilos para poder tener elementos de comparación de un corte respecto del otro.

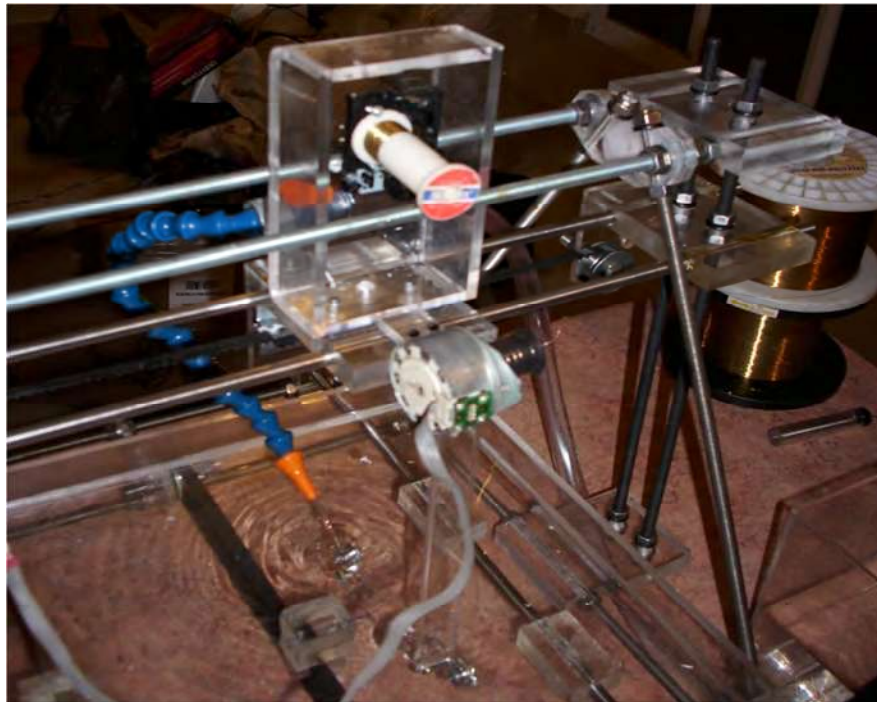


Figura 21. Porta-electrodo y sistema de alimentación de hilo

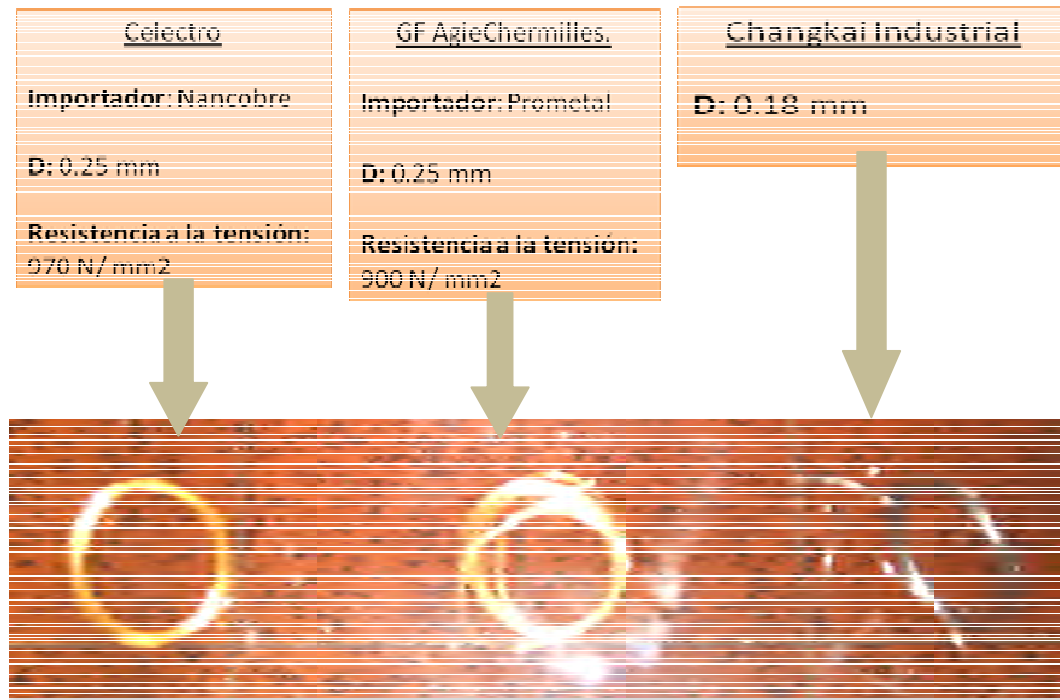


Figura 22. Tipos de hilo para proceso EDM

Capítulo 8 Caracterización del material a cortar en la máquina intermetálico Fe-Al

Como es bien sabido la caracterización de materiales es la perturbación de un material preparado de acuerdo a la técnica a aplicar, dicha perturbación se alcanza por medio de una señal la cual puede ser luminosa, eléctrica, térmica entre otras, las cuales nos ayudan a conocer o predecir cómo es el comportamiento de las propiedades de algún material.

Se puede determinar el tamaño de grano, forma y distribución de varias fases e inclusiones presentes las cuales facilitan el análisis del material, la microestructura y a su vez revela si la pieza fue trabajada mecánicamente y/o térmicamente.

El procedimiento utilizado para la preparación de la muestra es relativamente sencillo y de bajo costo, en el cual se obtienen buenos resultados si se mantiene constancia, al momento de preparar muestras, la cual aporta práctica y rapidez, es bueno recordar que al momento de observar la muestra es recomendable tener un buen pulido del material para tener un excelente análisis metalográfico.

La preparación de muestras metalográficas es uno de los métodos más importantes en cuanto al conocimiento extenso de piezas, el cual se rige bajo las normas de la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (*American Society for Testing and Materials; ASTM*). Los pasos más importantes y que se realizaron en el material intermetálico se mencionan más adelante, estos análisis aportan información necesaria para obtener los valores tanto mecánicos, eléctricos y de otra índole para usarse en la determinación de los parámetros de corte del material a procesar.

8.1. Análisis por Difractometría

El material intermetálico obtenido mediante fundición convencional fue caracterizado mediante difracción de rayos X. Los resultados de esta caracterización muestran las fases presentes en el material. La figura 23 presenta el espectro obtenido. En general, el material, el

cual tiene una estructura cristalina cúbica, presento la fase FeAl, sin la presencia de otras fases aparentes (figura 23). El análisis y de acuerdo con la comparativa de las cartas cristalográficas, se observó que el material intermetálico tiene una sola composición de 0.4 Al y 0.6 de Fe.

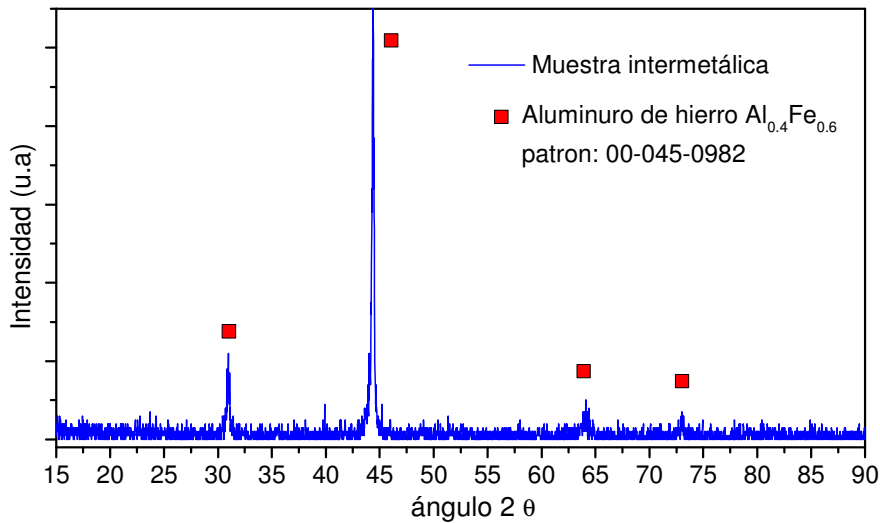


Figura 23. Gráfica de composición del material FeAl

8.2. Análisis metalográfico

La distribución del tamaño de grano fue homogénea y presento una distribución equiaxial, lo cual representa una distribución de propiedades fisicoquímicas similares en el volumen, isotrópicamente hablando. El tamaño de grano en promedio es de 200 micras aproximadamente a lo largo de la distribución como se muestra en la figura 24.

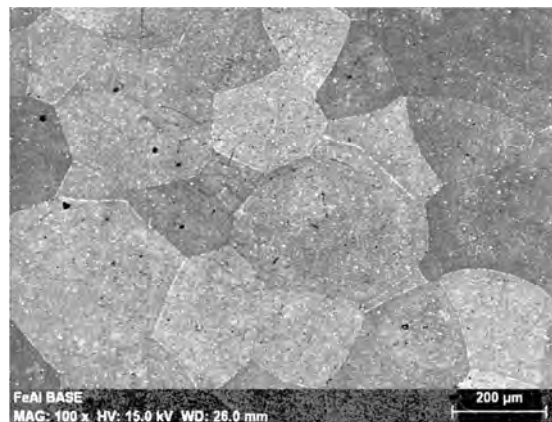


Figura 24. Obtención del tamaño de grano mediante microscopio de barrido para el intermetálico. Fe-Al a 100x

Capítulo 9 Interfaz Arduino-ReplicatorG-CAM

Esta es una de las partes más importantes de la máquina ya que al tener cada elemento enlazado entre sí, es posible realizar cada uno de los movimientos requeridos dentro del corte EDM por hilo [47-50].

Una de las fases iniciales fue la de obtener una interfaz sencilla, libre de licencia y que fuera capaz de generar códigos G y M, y que a su vez fueran interpretados por la máquina y realizar el corte conforme al diseño. Para este fin, se utilizó un programa llamado ReplicatorG, que al igual que Reprapnapper realiza la misma función, sin embargo de acuerdo a la experiencia obtenida en este proyecto se optó por usar ReplicatorG.

ReplicatorG es el software controlador de la máquina EDM a través de la tarjeta Arduino y, la máquina CNC: Se le puede introducir al sistema, un archivo GCode o STL para procesar la información de corte y de ahí generar códigos G y M capaces de dar la información correcta a la tarjeta Arduino de open source. Entonces la tarjeta emite las señales adecuadas a la máquina EDM para realizar los cortes a velocidades y parámetros deseados, es sencillo de instalar, además, la característica esencial es que puede ser actualizado continuamente. El software, no tiene ningún costo y su licencia es libre de manejo, ver la figura 25 para más detalles visuales [54-55].

Los pasos para su uso son muy sencillos, estos se describen como sigue:

- Se genera un archivo en extensión .stl para poderlo importar al programa de ReplicatorG, éste debe contener cada uno de los elementos requeridos para su corte.
- Se importa al programa y automáticamente el programa permite visualizarlo en un ambiente de 3D, y de ahí se puede posicionar la pieza virtualmente.
- Se generan los códigos G y M en la barra con el mismo nombre.

- Se procede a conectarse con la tarjeta Arduino la cual sirve como interfaz entre el programa y la máquina, en esta parte la máquina está recibiendo cada una de las instrucciones de corte.
- Se centra la pieza desde la máquina mediante el programa en la computadora. Esto es, se establece el cero de la pieza a mecanizar.
- Y finalmente se ejecuta el programa y la máquina comienza el corte.

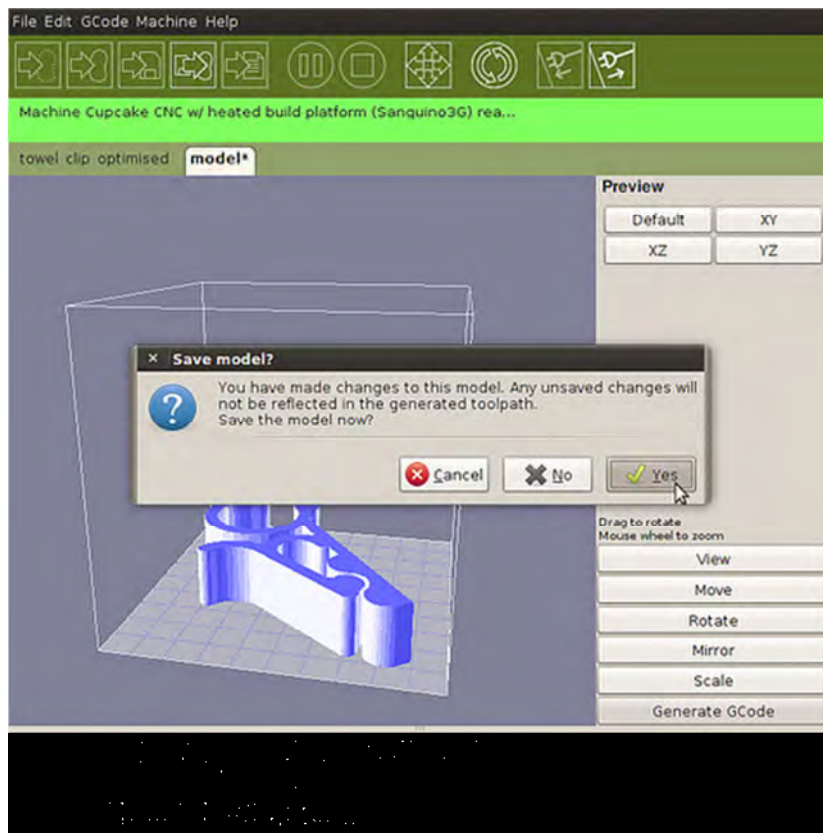


Figura 25. Ambiente ReplicatorG [54]

Es importante mencionar que se requiere modificar ciertas variables en el programa, tales como las dimensiones de las carreras en cada eje, así como las velocidades a las que trabajarán cada elemento de la misma.

Una vez logrado esto, en la máquina se iniciaron las pruebas de funcionamiento, ya habiendo cambiado los parámetros de la máquina desde el programa, se alineó la máquina para así mismo tener un control 100% de la misma.

En la figura 26 se muestra la comunicación ReplicatorG-Máquina-Arduino, donde se calibró la máquina y se cargó un programa que ejecutará ciertos movimientos codificados en G y M.



Figura 26. Máquina EDM conectada a la interfaz y control de voltaje, etc.

Se obtuvieron excelentes resultados y se procedió a instalar cada uno de los componentes adicionales tales como los circuitos que regularán: voltajes, control de los pulsos, y control del sistema de bombeo, así como el giro del rollo de hilo para realizar un corte en un material intermetálico. En la figura 27 se muestra la manipulación del programa ReplicatorG.



Figura 27. Generación de códigos G y M

Capítulo 10 Conclusiones y recomendaciones

10.1. Conclusiones

- Se logró diseñar y fabricar un prototipo funcional de máquina de corte por electroerosión.
- Se seleccionó un sistema de bombeo adecuado para evitar la presencia de rebabas en el fluido dieléctrico acorde a las especificaciones de diseño.
- Se programó un software “open source” como controlador del hardware de la máquina EDM y que sirve como interfaz para comunicarse con el software *replicatorG*.
- Es posible maquinar piezas de estructura compleja mediante códigos G y M.
- Se diseñó un sistema de pulsos eléctricos controlado por la plataforma *Arduino*, en el cual se pueden variar el tiempo de activación y espera de los pulsos eléctricos.
- Se alcanzó una resolución de movimiento en los ejes “x” y “y” de 11.25 micrómetros por paso.
- Se obtuvieron los siguientes parámetros de operación de la máquina:
Una velocidad de avance de 3300 mm/s, un voltaje máximo de 60 V y un amperaje máximo de 18 A, se pueden manejar pulsos de un mínimo de 1 microsegundo de duración.

10.2. Recomendaciones y/o trabajos futuros

- Optimización de la distancia entre el hilo y el material a desbastar.
- Experimentar con distintos valores de diferencia de potencial (V) e intensidad de corriente (A) para determinar el acabado superficial óptimo.

REFERENCIAS

- [1] Shailesh Kumar, D., “Experimental Investigation of Machining Parameters for EDM Using U-shaped electrode of AISI P20 Tool Steel. National Institute of technology Rourkela, India, 2009.
- [2] Miller, Scott F., “Wire Electro-Discharge Machining of Advanced Engineering Materials”, North Carolina State University, 2003.
- [3] Lin Y., Cheng, C., Su, B. and Hwang, L.-., Machining characteristics and optimization of machining parameters of SKH 57 high-speed steel using electrical-discharge machining based on Taguchi method. *Materials and Manufacturing Processes*, 21(8), 922-929, 2006.
- [4] Industrias Mecánicas Nafer, “Electroerosión por Hilo Máquina”, http://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/FeriaVirtual/Productos-Mecanizado-de-precision-Nafer-60784.html.
- [5] Izquierdo B., Sánchez, J.A., Plaza, S., Pombo, I. And Ortega, N., A numerical model of the EDM process considering the effect of multiple discharges. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(3-4), 220-229, 2009.
- [6] Ghoreishi, M., Tabari C., Investigation into the effect of voltage excitation of pre-ignition spark pulse on the electro-discharge machining (EDM) process. *Materials and Manufacturing Processes*, 22(7):833–841, 2007.
- [7] El-Taweel T.A., Multi-response optimization of EDM with Al-Cu-Si-tic P/M composite electrode. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(1-2), 100-113, 2009.
- [8] Schumacher B.; Weckerle D.: “Funkenerosion, richtigverstehen und anwenden” (Electroerosión: buenacomprensión y aplicación), TechnischerFachverlag K. H., Möller, D-5620 Velbert, ISBN 3-9801934-0-3, 1988.
- [9] Schulz, HanserVerlag Carl, “Hochgeschwindigkeitsbearbeitung” (Mecanizado de alta velocidad); Múnich, ISBN 3-446-18796-0, 1996.
- [10] Schmid, U. “HSC am harten Werkstückund an der weichenElektrode” (Mecanizado de alta velocidad de piezas duras y con electrodos blandos) - Maschinenfabrik W. Fehlmann AG, CH-5703 SEON www.fehlmann.com, 1999.

- [11] Benchmark Werkstück HSC “(Pieza de referencia para Mecanizado de Alta Velocidad)”, Makino/Alphacam, Alphacam, Wienerstrasse 33, D-73614 Schorndorf, www.alphacam.de, 1999.
- [12] [http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_\(iteration_2\)](http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_(iteration_2))
- [13] Raymundo F. Moreno, Apuntes sobre metodología del diseño, U.A.S.L.P., 1999.
- [14] El-Taweel, Multi-response optimization of EDM with Al–Cu–Si–TiC P/M composite electrode. *Int J AdvManufTechnol*doi: 10.1007/s00170-008-1825-6. *Int J AdvManufTechnol* 44:520–528, 2009.
- [15] RiazAhamed Asokan, Aravindan S, EDM of hybrid Al–SiCp–B4Cp and Al–SiCp–GlasspMMCs,doi: 10.1007/s00170-008-1839-0, 2009.
- [16] El-Taweel, TA Parametric study and optimisation of wire electrical discharge machining of Al–Cu–TiC–Si P/M composite. *Int J Machining Machinability Mater* 1(4):380–395. doi: 10.1504/IJMMM.2006.012348, 2006.
- [17] Zarepour H, Fadaei TA, Karimi D, Amini S, Statistical analysis on electrode wear in EDM of tool steel DIN 1.2714 used in forging dies. *J Mater Process Technol* 187–188:711–714, 2007.
- [18] Lin CL, Lin JL, KoTC, Optimisation of the EDM process based on the orthogonal array with fuzzy logic and gray relational analysis method. *Int J AdvManufTechnol* 19:271–277. doi:10.1007/s001700200034, 2002.
- [19] Lin JL, Lin CL, The use of grey-fuzzy logic for the optimization of the manufacturing process. *J Mater Process Technol* 160:9–14. doi:10.1016/j.jmatprotec.2003.11.040, 2005.
- [20] Su JC, Kao JY, TarnngYS, Optimisation of the electrical discharge machining process using a GA-based neural network. *Int J AdvManufTechnol* 24:81–90, 2004.
- [21] Kuriakose S, Shunmugam MS, Multi-objective optimization of wire-electro discharge machining process by non-dominated sorting genetic algorithm. *J Mater Process Technol*, 170:133–141. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.04.105, 2005.
- [22] Fenggou C, Dayong Y The study of high efficiency and intelligent optimization system in EDM sinking process. *J Mater Process Technol*, 149:83–87. doi:10.1016/j.jmatprotec.2003.10.059, 2004.
- [23] <http://www.schmalzhaus.com/EasyDriver/>

- [24] <http://www.arduino.cc/es/>
- [25] Simao J., H.G. Lee, Aspinwall D.K., Dewes R.C., Aspinwall E.M., Workpiece surface modification using EDM. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 pp. 121-128, 2003.
- [26] .Chen M.R, Q.A. Xu, Amorphous carbon nitride thin films deposited by electrolysis and metanol and urea organic solution, *Journal of Material Science Letters* 18, pp. 317-319. 111, 1999.
- [27] Medellin Hugo, Flores Aaron, Morales Jorge, Caracterizacion Experimental del Mecanizado por Descarga Electrica en Agua, *Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 17 al 19 de septiembre, 2008, Puebla, Mexico.
- [28] Medellin H., Flores A., Morales J., de la Garza A., Analysis of electrical discharge machining using water as dielectric and diverse electrode materials, *Proceedings of the ASME 2008 IDETC/CIE 2008*, August 3-6, 2008, Brooklyn, New York, USA.
- [29] Abbas NM, Solomon DG, Bahari MF, “a review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)”. *Int J Mach Tools Manuf* 47(7 8):1214–1228. doi:10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026, 2007.
- [30] Ho KH Newman, ST State of the art electrical discharge machining (EDM). *Int J Mach Tools Manuf* 43:1287–1300. doi:10.1016/S0890-6955 (03)00162-7, 2003.
- [31] Singh S, Maheshwari S, Pandey PC Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials. *J Mater Process Technol* 149:272–277. doi:10.1016/j.jmatprotec.2003.11.046, 2004.
- [32] Özgedik A, Coğun C An experimental investigation of toolwear in electric discharge machining. *Int J AdvManuf Technol* 17:488– 500. doi:10.1007/s00170-004-2220-6, 2006.
- [33] El-Taweel TA Parametric study and optimization of wire electrical discharge machining of Al–Cu–TiC–Si P/M composite. *Int J Machining Machinability Mater* 1(4):380–395. doi:10.1504/IJMMM.2006.012348.
- [34] Zarepour H, Fadaei TA, Karimi D, Amini S Statistical analysis on electrode wear in EDM of tool steel DIN 1.2714 used in forging dies. *J Mater Process Technol* 187–188:711–714, 2007.

- [35] Matsuhara Y, Obara H et al Study on high finish machining in wire EDM. *J Elec Mach Technol* 28(90):19–22, 2004.
- [36] Masuzawa T, Sata T, Kinoshita N The occurring mechanism of the continuous arc in micro-energy EDM by RC circuit. *J JSEME* 5(9):35–52, 1971.
- [37] Masuzawa T, Fujino M (1980) Micro pulse for EDM. *Proc Japan Society for Precision Engineering Autumn Conference*, pp 140–142
- [38] He G, Zhao W, Guo Y, and Wang Z Development of nanosecond order pulse generator. *Elec Disch Mach* 4:11–13, 1999.
- [39] Masuzawa T, Fujino M, Kobayashi K (1985) Wire electrodischarge grinding for micro-machining. *Ann CIRP* 34(1):431–434
- [40] Paul Acarnley, *STEPPING MOTORS a guide to theory and practice*, 4th edition The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2002.
- [41] Kazimierzczuk M.K., Czarkowski D., *Resonant Power Converters*, Wiley/Interscience, New York, 1995.
- [42] Steigerwald R.L., A comparison of halfbridge resonant converter topologies, *IEEE Trans. Power Electron*, 3 (2) (1998), pp. 174- 182.
- [43] Hydeman J.E., et al. Westinghouse Electric Corp., US Patent 5 543 599 (1996).
- [44] Abbas NM, Solomon DG, Bahari MF a review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *Int J Mach Tools Manuf* 47(7 8):1214–1228. doi:10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026, 2007.
- [45] Ho KH, Newman ST State of the art electrical discharge machining (EDM). *Int J Mach Tools Manuf* 43:1287–1300. doi:10.1016/S0890-6955 (03)00162-7, 2003.
- [46] Singh S, Maheshwari S, Pandey PC Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials. *J Mater Process Technol* 149:272–277. doi:10.1016/j.jmatprotec.2003.11.046.
- [47] Özgedik A, Coğun C An experimental investigation of toolwear in electric discharge machining. *Int J Adv Manuf Technol* 17:488– 500. doi:10.1007/s00170-004-2220-6, 2006.
- [48] El-Taweel TA Parametric study and optimization of wire electrical discharge machining of Al–Cu–TiC–Si P/M composite. *Int J Machining Machinability Mater* 1(4):380–395. doi:10.1504/IJMMM.2006.012348, 2006.

- [49] Zarepour H, Fadaei TA, Karimi D, Amini S Statistical analysis on electrode wear in EDM of tool steel DIN 1.2714 used in forging dies. *J Mater Process Technol* 187–188:711–714, 2007.
- [50] Matsuhara Y, Obara H et al Study on high finish machining in wire EDM. *J Elec Mach Technol* 28(90):19–22, 2004.
- [51] Masuzawa T, Sata T, Kinoshita N The occurring mechanism of the continuous arc in micro-energy EDM by RC circuit. *J SEME* 5(9):35–52, 1971.
- [52] Masuzawa T, Fujino M (1980) Micro pulse for EDM. *Proc Japan Society for Precision Engineering Autumn Conference*, pp 140–142
- [53] He G, Zhao W, Guo Y, and Wang Z Development of nanosecond order pulse generator. *Elec Disch Mach* 4:11–13, 1999.
- [54] http://reprap.org/wiki/RepSnapper_Manual:Introduction
- [55] Samoa J., H.G. Lee, D.K. Aspinwall, R.C. Dewes, and E.M. Aspinwall 2003. Workpiece surface modification using electrical discharge machining, 43 121–128.

Anexo A Dibujos de detalle individuales

Recordando que en la tabla siguiente se anexan cada uno de los dibujos de detalle individuales para futuros trabajos donde se requiera fabricar la máquina nuevamente o bien aclarar cualquier duda sobre el mismo.

Tabla 4 Lista de planos Anexos

Pza. No.	Nombre de la parte	Pagina
001A	ENSAMBLE GENERAL	
1	AJUSTADOR_PORTAPIEZA	
2	BLOQUE_BASE_INFERIOR	
3	TUERCA_M8	
4	ROSCADO M8X30	COMERCIAL
5	BLOQUE_SUJETADOR	
6	SOPORTE_HILO_RETORNO	
7	PORTAHILO_EDM	
8	BLOQUE 70X99_BASE_HILO	
9	MOTOR_NEMA_17	
10	SOPORTE_MOTOR_PASOS	
11	BARRA INOX5-15X40	COMERCIAL
12	SOPORTE_INF_ESQ	
13	BARRA INOX5-16X60	COMERCIAL
14	BASE_INFERIOR30X25	
15	RECT70X99_BASE_HILO	
16	RECT70X99_INFERIOR	
17	ESPARRAGO8X40CM	COMERCIAL
18	ESPARRAGO8X60CM	COMERCIAL
19	SOPORTE_SUPERIOR	
20	SOPORTE_INFERIOR	
21	ESPARRAGO8X41CM	COMERCIAL
22	POLEA_A9-12XL_	
23	BLOQUE_70X70X6	
24	PLACA_MOTOR_GUIA_POLEA	
25	BARRA_DIA5X20	COMERCIAL
26	BLOQUE_70X70X6_2	REF. 023
27	BLOQUE_40X30X3	
28	M_CARRETE-DE-RETORNO-HILO	
29	BANDA XL PARA POLEAS	COMERCIAL

