



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Sistema de control del GAP
para prototipo de
microelectrosión**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

PRESENTA

Alejandro Rafael Mendoza Valladolid

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Alberto Caballero Ruiz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

INDICE

FIGURAS	6
TABLAS	7
INTRODUCCION	8
1. ANTECEDENTES	10
1.1 Tecnologías de Microfabricación	10
1.2 Precisión en Microfabricación	10
1.3 Expectativas de mercado para las microtecnologías	12
1.4 Antecedentes de la electroerosión	12
1.5 Principio de funcionamiento de la electroerosión	14
1.6 Tipos de configuraciones para máquinas de electroerosión	16
1.7 Principales componentes de una máquina de electroerosión por penetración	18
1.8 Diferencias entre el proceso de electroerosión convencional y microelectroerosión	19
1.9 Microelectroerosión en la actualidad y sus aplicaciones	20
1.10 Primer prototipo desarrollado en el Grupo de Micro Mecánica y Mecatrónica (Ahora Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital)	23
1.10.1 Fuente	23
1.10.2 Posicionamiento del electrodo y la pieza de trabajo	25
1.10.3 Control de posición del electrodo	28
1.11 Evaluación del primer prototipo	29
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	31
2.1 ¿Por qué investigar procesos de micromanufactura?	31
2.3 ¿Por qué investigar microelectroerosión?	32
2.4 Objetivo	32
2.5 Alcances	33
3. MARCO TEÓRICO	34
3.1 <i>GAP</i>	34
3.2 Formas de controlar el <i>GAP</i>	36
3.2.1 Control de <i>GAP mediante</i> la regulación de la frecuencia	36

3.2.2 Control del <i>GAP</i> midiendo voltaje y corriente con control adaptativo	37
3.2.3 Control del <i>GAP</i> mediante medida directa entre los electrodos.	39
3.3 Diseño de experimentos	41
3.4 Control	42
3.4.1 Sistemas de control en lazo abierto	43
3.4.2 Sistemas de control en lazo cerrado	43
3.4.3 Acciones Básicas de Control	44
3.4.3.1 Acción del Control Proporcional	44
3.4.3.2 Acción del Control Integral	44
3.4.3.3 Acción de Control Derivativa	45
3.4.3.4 Acción de Control Proporcional-Integral-Derivativa	46
3.4.4 Control PID de plantas	47
3.4.5 Lógica Difusa y Sistemas Difusos	51
3.4.5.1 Conjuntos	52
3.4.5.2 Operadores para conjuntos difusos	54
3.4.5.3 Variables lingüísticas	56
3.4.5.4 Sistemas difusos	57
3.4.5.5 Metodología de diseño de sistemas difusos (Figura 3-23)	58
4. DESARROLLO DEL SISTEMA PROPUESTO	60
4.1 Cambios del primer prototipo y diseño de experimentos del prototipo original	60
4.1.2 Diseño de experimentos	61
4.1.2.1 Reconocimiento del problema	61
4.1.2.2 Elección de los factores y niveles	61
4.1.2.3 Selección de la variable de respuesta	64
4.1.1 Banco de resistencias	64
4.1.4 Resultados del diseño de experimentos	66
4.2 Requerimientos del sistema	68
4.3 Selección del actuador para sistema de posicionamiento para el electrodo	69
4.3.1 Motor Piezoeléctrico	70
4.4 Selección del controlador para el actuador del sistema de posicionamiento para el electrodo	72

4.5 Selección del sensor para sistema de posicionamiento para el electrodo	72
4.6 Mecanismo para sistema de posicionamiento	73
4.7 Controlador del actuador	79
4.8 Sintonización del motor piezoeléctrico	79
4.9 Control del Proceso	81
4.9.1 Dificultades para controlar el sistema y selección de método de control	82
4.9.2 Identificación de las entradas y salidas del control difuso	83
4.9.2.1 Procesamiento y acoplamiento de las señales	83
4.9.3 Universo del discurso y conjuntos difusos	86
4.9.4 Reglas del sistema difuso	89
4.9.5 Optimización del sistema (Simulación y ajuste)	91
4.9.6 Implementación del sistema de control difuso	92
4.9.7 Implementación del sistema de control de posicionamiento	94
5. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA	97
5.1 Resultados del diseño de experimentos	97
6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	101
6.1 Conclusiones	101
6.2 Trabajo a futuro	101
6.2.1 Fuente de Alimentación	102
6.2.2 Propiedades de los materiales	102
6.2.3 Control del sistema	102
6.2.3.1 Control del proceso	102
6.2.3.2 Control de posición del electrodo	103
7. APÉNDICES	104
Apéndice A Sistema para el posicionamiento fino	104
A.I Especificaciones Motor piezoeléctrico SQL-3.4 [21]	104
A.II Especificaciones Sensor Magnético NSE-5310[23]	104
A.III Especificaciones Controlador MC-1100[21]	105
A.IV Planos	106
Apéndice B Sistema de control	112
B.I Programa del sistema de control difuso	112

Apéndice C Electrónica	117
C.I Diagrama del circuito	117
8. Referencias	118

FIGURAS

Figura 1-1 Escala y Precisión en procesos de microfabricación	9
Figura 1-2 Tamaño, precisión absoluta y precisión relativa en mecanizado de precisión	10
Figura 1-3 Evolución del número de transistores por circuito integrado	11
Figura 1-4 GAP y microirregularidades	13
Figura 1-5 Proceso de la descarga	14
Figura 1-6 Electroerosión por hilo [4]	15
Figura 1-8 Electroerosión por penetración [4]	15
Figura 1-9 Milling EDM [4]	16
Figura 1-10 Diagrama de componentes del sistema de electroerosión	16
Figura 1-11 Micro galgas extensiométricas [8]	20
Figura 1-12 Ejemplos de aplicaciones [26]	20
Figura 1-13 Boquillas para inyectores de combustible en motores Diesel	21
Figura 1-14 Fuente con circuito RC primer prototipo	22
Figura 1-15 Máquina de control numérico (CNC)	23
Figura 1-16 CNC, servomotor y porta electrodos	24
Figura 1-17 Recipiente de vidrio y sistema de sujeción	24
Figura 1-18 Posicionamiento del electrodo y la pieza de trabajo	25
Figura 1-19 Carga y descarga de un capacitor [16]	26
Figura 1-20 Diagrama del circuito	26
Figura 3-1 Comportamiento de voltaje y corriente durante un pulso [12]	32
Figura 3-2	33
Figura 3-3 Máquina de microelectrósion	34
Figura 3-4 Esquema de control con medición de voltaje y corriente	35
Figura 3-5 Ilustración del movimiento de la herramienta	36
Figura 3-6 Principio de funcionamiento y relación entre el GAP y presión	37
Figura 3-7 Sistema de Control en lazo abierto [18]	39
Figura 3-8 Sistema de Control en lazo cerrado [18]	39
Figura 3-9 Diagrama de bloques controlador PID [17]	42
Figura 3-10 $e(t)$ rampa unitaria [17]	42
Figura 3-11 Salida del controlador [17]	42
Figura 3-12 Control PID de una planta [17]	43
Figura 3-13 [17] Sobrepasso en la respuesta al escalón	43
Figura 3-14 Respuesta al escalón unitario de una planta [17]	44
Figura 3-15 Curva de respuesta con forma de S [17]	45
Figura 3-16 Oscilación sostenida con un periodo P_{cr} [17]	46
Figura 3-17 a) Conjunto clásico b) Conjunto difuso [20]	47
Figura 3-18 Función de pertenencia [19]	48
Figura 3-19 Unión de los conjuntos difusos A y B [20]	49
Figura 3-20 Intersección de los conjuntos difusos A y B [20]	50
Figura 3-21 Complemento del conjunto difuso A [20]	50
Figura 3-22 a) Conjunto difuso A y su complemento b) Ley del medio excluido	51
Figura 3-23 Sistema difuso	53
Figura 4-2 Motor Piezoeléctrico SQL-3.4 [21]	63
Figura 4-3 Controlador para el motor MC-1100[21]	64

Figura 4-4 Sensor de posición NSE-5310[23]	65
Figura 4-5 Amortiguador [24]	66
Figura 4-6 Base	67
Figura 4-7 U	67
Figura 4-8 Soporte del motor	68
Figura 4-9 Resortes	68
Figura 4-10 Soporte MC-1100	69
Figura 4-11 Porta-electrodo	70
Figura 4-12 Mecanismo	70
Figura 4-13 Respuesta al escalón unitario	72
Figura 4-14 Circuito para el procesamiento y acoplamiento de las señales	75
Figura 4-15 Conjuntos difusos para la frecuencia	78
Figura 4-16 Conjuntos difusos para la derivada de la frecuencia	79
Figura 4-17 Conjuntos difusos para el desplazamiento de el electrodo	79
Figura 4-18 Superficie de control	81
Figura 4-19 Diagrama de flujo de la implementación del sistema de control difuso	83
Figura 4-20 Interfaz Gráfica	84
Figura 4-21 Diagrama de bloques del sistema de control	85

TABLAS

Tabla 1-1 MicroEDM en la industria	19
Tabla 1-2 Control servomotor	26
Tabla 1-3 Orden descendente en cuanto a volumen de material desplazado de la pieza de trabajo [6]	27
Tabla 3-1 Formulas sugeridas por Ziegler-Nichols para el primer método [17]	45
Tabla 3-2 Formulas sugeridas por Ziegler-Nichols para el segundo método [17]	46
Tabla 4-1 Niveles de prueba para cada factor	57
Tabla 4-2 Puntos experimentales o tratamientos propuestos	57
Tabla 4-3 Diagrama del circuito con banco de resistencias	58
Tabla 4-4 Puntos experimentales o tratamientos resultados [mm]	59
Tabla 4-5 Especificaciones de los actuadores	61
Tabla 4-6 variables lingüísticas asociadas a cada función de pertenencia	78
Tabla 4-7 FAMs	81
Tabla 5-1 Resultados del diseño de experimentos puntos experimentales o Tratamientos [mm]	86
Tabla 5-2 Resultados de las pruebas para el factor DPE1	87
Tabla 5-3 Resultados de las pruebas para el factor DPE2	88
Tabla 5-4 Resultados de las pruebas para el factor DPE3	90

INTRODUCCION

La electroerosión tiene sus inicios en 1943, siendo este año el punto de partida para múltiples investigaciones acerca de este fenómeno, desde sus inicios la electroerosión fue un sistema de manufactura revolucionario, debido a que no es necesario que la herramienta tenga una dureza superior a la dureza del material a maquinar, siempre y cuando ambos sean conductores; otra característica que vuelve a este proceso muy interesante es el hecho de que no es necesario tener movimientos relativos entre la herramienta y la pieza de trabajo.

Con el paso del tiempo las microtecnologías se vuelven motivo de estudio en múltiples áreas de la electrónica, debido a que la miniaturización conlleva múltiples ventajas, como consecuencia surge la necesidad de tener máquinas herramienta con las cuales se puedan fabricar piezas de dimensiones pequeñas con muy alta precisión; por tal motivo comienza el estudio de las micromáquinas herramienta. Las micromáquinas herramienta utilizan los mismos principios de funcionamiento que las máquinas herramienta convencionales, obviamente en el diseño de estas se presentan complicaciones inherentes a su tamaño y al tamaño de las piezas a maquinar.

Con base en estas necesidades se crea el Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital (MADiT) del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM, se han realizado investigaciones en el área micromáquinas herramienta. Una de las líneas de investigación del laboratorio aborda el estudio de un sistema de micromanufactura por electroerosión.

El trabajo de esta tesis toma como antecedente el primer prototipo desarrollado en el laboratorio [6], para continuar con esta línea de investigación; el objetivo es desarrollar un segundo prototipo, utilizando como antecedente los conocimientos y los resultados de la investigación anterior, con la finalidad de mejorar el desempeño del sistema desarrollado. La

estructura de la tesis que se presenta a continuación consiste en seis capítulos, divididos de la siguiente manera:

En el capítulo uno se presentan las tecnologías de microfabricación, se explica el proceso de electroerosión incluyendo su funcionamiento, configuraciones, componentes y se explican las diferencias entre la electroerosión convencional y la microelectroerosión; por otro lado, se explica el funcionamiento del primer prototipo, el cual fue tomado como antecedente para comparar los resultados obtenidos en este trabajo de tesis. En el capítulo dos se plasma el planteamiento del problema, exponiendo las razones para realizar este trabajo de tesis y se plantean los objetivos y alcances. El capítulo tres contiene el marco teórico con los conceptos necesarios para el desarrollo de la tesis y algunos métodos de control implementados en otras máquinas de electroerosión. En el capítulo cuatro se presenta el desarrollo del del sistema propuesto, , se plantean los requerimientos del sistema y se expone el diseño e implementación de cada uno de los sistemas que componen al prototipo; así mismo, se presenta un diseño de experimentos para comparar los resultados entre el primer prototipo y el sistema desarrollado. En el capítulo cinco se presentan las pruebas realizadas con el prototipo propuesto, para evaluar el funcionamiento de éste y poder comparar los resultados con los de su antecesor. Finalmente, se presenta los apartados de conclusiones y trabajo a futuro, donde se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo de tesis, y con base en ellas se proponen opciones para mejorar el desempeño del sistema.

1. ANTECEDENTES

1.1 Tecnologías de Microfabricación

Cuando hablamos de sectores diferentes a la microelectrónica, no se tienen tecnologías bien establecidas para fabricar microcomponentes en materiales diferentes al silicio.

Es por eso por lo que surgen las tecnologías de microfabricación, las cuales se enfocan a la fabricación de productos en una variedad de materiales, con tamaños que van desde decenas de micrómetros hasta unos pocos milímetros. A continuación, se muestra una imagen para poder visualizar donde está situada esta tecnología (Figura 1-1) [1]

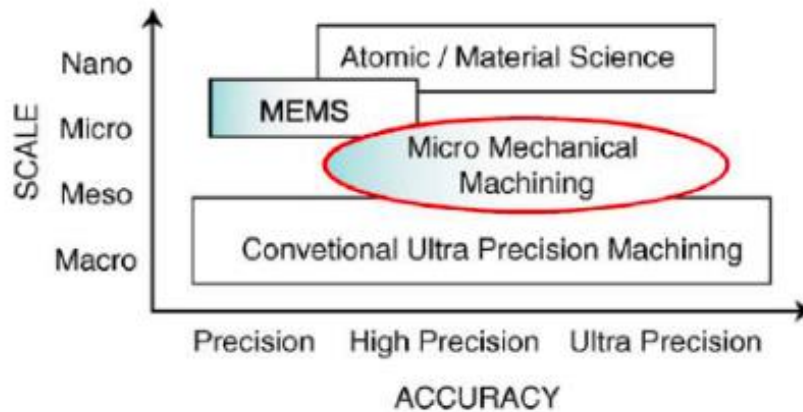


Figura 1-1 Escala y Precisión en procesos de microfabricación

1.2 Precisión en Microfabricación

La precisión absoluta que se puede alcanzar en procesos de microfabricación es del orden de 1 $[\mu\text{m}]$, por otro lado, en procesos de mecanizado convencionales podemos llegar a tener precisiones relativas de 10 $[\mu\text{m}]$, valores que hoy en día son inaccesibles en microfabricación.

Para clarificar este concepto se muestra una figura (Figura 1-2) donde se puede visualizar el orden de tamaños, precisiones absolutas y precisiones relativas que es posible alcanzar en procesos de mecanizado convencionales y procesos de microfabricación.

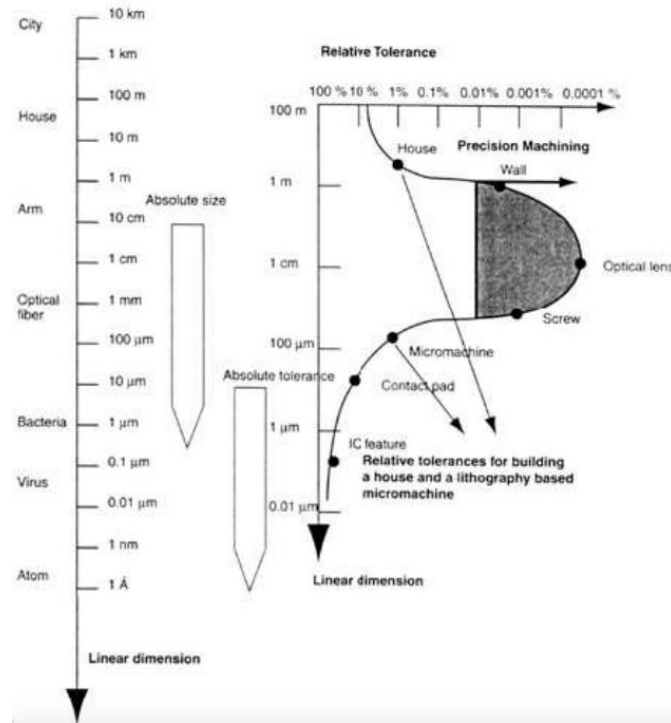


Figura 1-2 Tamaño, precisión absoluta y precisión relativa en mecanizado de precisión

Podemos observar que mientras reduce la dimensión lineal también se reduce la tolerancia relativa llegando a tener una tolerancia relativa para microfabricación similar a la que se tiene en la construcción de una casa (del orden de 1%), es importante resaltar que las dimensiones lineales en los procesos de microfabricación van desde decenas de micrómetros hasta unos pocos milímetros, sobre el cual aplica la tolerancia relativa. [1]

Con esto podemos ver que la tecnología de microfabricación aún está en sus inicios, lo cual nos deja muy claro la gran oportunidad que se tiene al trabajar ésta como una línea de investigación,

y buscar aportar algo a dicha tecnología lo cual pueda ayudar a seguir avanzando en la miniaturización.

1.3 Expectativas de mercado para las microtecnologías

Estudios muestran que el mercado mundial de microtecnologías crece a un ritmo de 11% anual, dicho crecimiento global del mercado de microsistemas depende de las aplicaciones bien establecidas y de las nuevas tecnologías que se desarrollan a partir de la investigación. El campo de las tecnologías de información depende enormemente de las capacidades de miniaturización, como lo podemos ver en los equipos de cómputo, los cuales son capaces de empaquetar cada vez más dispositivos en un chip, los dispositivos conmutan más rápido y consumen menos energía. A continuación, se muestra un gráfico para ver cómo fue la evolución del número de transistores por circuito integrado (Figura 1-3). [1]

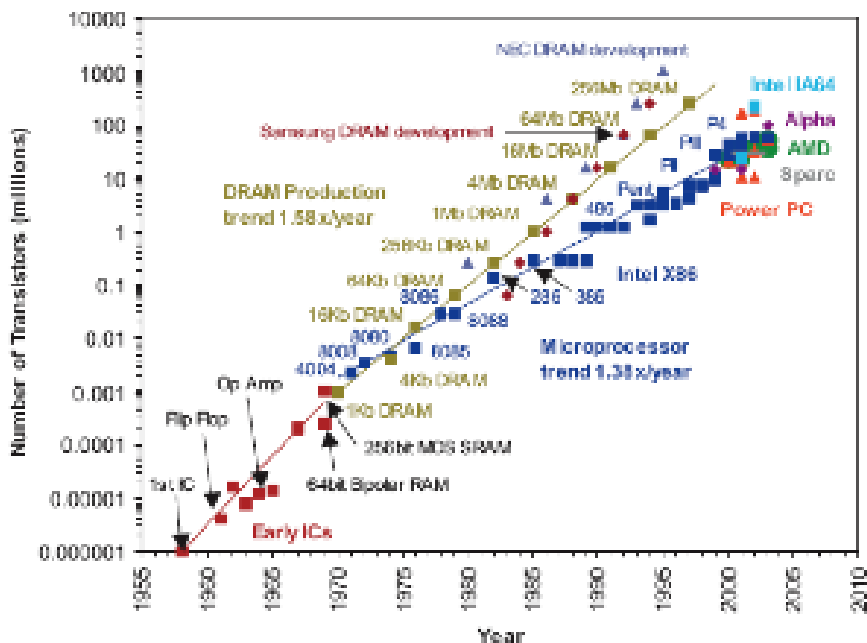


Figura 1-3 Evolución del número de transistores por circuito integrado

1.4 Antecedentes de la electroerosión

Los inicios de la electroerosión surgieron en 1943 en la U.R.S.S. durante la segunda guerra mundial a través de los científicos B.R. Lazarenco y N.I. Lazarenco quienes desarrollaron los primeros circuitos para realizar trabajos de electroerosión [2].

La idea de los científicos antes mencionados surgió del estudio del fenómeno que se presenta en los contactos, los cuales sufren un desgaste por una parte por el rozamiento mecánico, pero en mayor proporción dicho desgaste es debido al efecto destructor que ejerce la chispa eléctrica principalmente a causa de su efecto térmico.

Los estudios de estos científicos ayudaron a poder aplicar este efecto destructor a una finalidad práctica, la cual consiste en el mecanizado de metales mediante descargas eléctricas, ya que en ese entonces los únicos métodos que se tenían para dar forma a los metales eran por medio de fundición, deformación plástica y el arranque de viruta [3]. A pesar de estos intentos, la electroerosión permaneció desconocida hasta los inicios de la década de los 50 cuando la industria se empezó a interesar por esta tecnología [2].

La electroerosión fue un sistema de mecanizado de metales revolucionario ya que, a diferencia de los sistemas conocidos en ese momento, en este no importaba la dureza ni la tenacidad de los metales que se querían mecanizar, siempre y cuando estos fueran conductores. Otro aspecto revolucionario de este sistema es el hecho de que no se necesitan movimientos relativos entre la herramienta y la pieza de trabajo, como se presenta en los sistemas por arranque de viruta, ya que en este proceso sólo se necesita un movimiento de avance del electrodo hacia la pieza.

Debido a estas grandes ventajas la electroerosión ha sido objeto de amplias e intensivas investigaciones, con lo cual se ha podido perfeccionar de manera tal que hoy en día es un proceso imprescindible para para la fabricación de moldes, troqueles, etc.; aparte de usarse en la elaboración de piezas complejas de manufactura por medio de otras tecnologías. [3]

1.5 Principio de funcionamiento de la electroerosión

La electroerosión es un proceso en el cual el metal se arranca de la pieza de trabajo, aplicando una fuerza electromotriz entre ésta y el electrodo, el proceso se lleva a cabo sumergido en un fluido dieléctrico; una propiedad importante de dicho fluido dieléctrico es la rigidez dieléctrica, la cual se define como el gradiente de tensión máxima que puede soportar un no conductor sin perforarse y sus unidades son [V/m].

El uso de un fluido dieléctrico es de vital importancia para garantizar una reproducción fiel del electrodo sobre la pieza de trabajo, ya que si el proceso de electroerosión se realizara en un medio gaseoso sería totalmente incontrolable, porque la descarga sería de forma ramificada como consecuencia de la generación de distintos canales ionizados totalmente impredecibles, a consecuencia de los iones libres producidos por la radioactividad terrestre, la luz, etc. Por esta razón es necesario el uso de un fluido dieléctrico en el cual se pueda controlar la formación de dichos canales, principalmente los derivados de hidrocarburos, siliconas y el agua desionizada.

La generación de las chispas dentro del fluido dieléctrico se genera al aplicar una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza de trabajo separadas una distancia suficiente (*GAP*) para que se lleve a cabo la descarga, al observar de manera microscópica el espacio entre el electrodo y la pieza de trabajo, podemos observar microirregularidades en su superficie, por lo cual en ciertos espacios la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo es menor (Figura 1-4), y esto provoca que el efecto del campo eléctrico se concentre con preferencia en ese punto, produciendo la descarga una vez superada la rigidez dieléctrica del fluido dieléctrico.

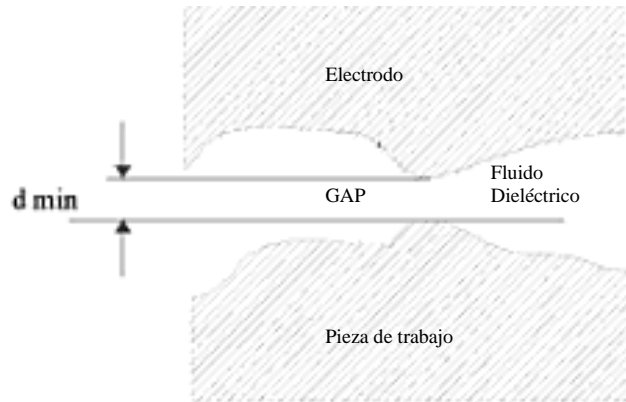


Figura 1-4 GAP y microirregularidades

El campo eléctrico producido por la descarga ioniza el líquido dieléctrico y polariza las partículas formando canales positivos y negativos. La caída brusca en la resistencia eléctrica del canal es lo que permite que la densidad de corriente alcance valores elevados, lo que inevitablemente conlleva a un fuerte aumento de temperatura de miles de grados, todo en cuestión de microsegundos. Como consecuencia de este aumento en la temperatura se produce una fusión y evaporación del metal en un reducido volumen de la superficie del mismo, lo cual provoca que se formen burbujas de gases, en las cuales la presión interna aumenta de forma progresiva, en el instante en el que cesa el impulso de corriente se produce un brusco descenso en la temperatura de la burbuja, con lo cual dicha burbuja sufre un descenso en la presión interna, ocasionando una especie de implosión. Las fuerzas que se producen en este acto hacen que los residuos provocados por la fusión sean proyectados con fuerza hacia el exterior del cráter dejado por la descarga (Figura 1-5) [2,3]

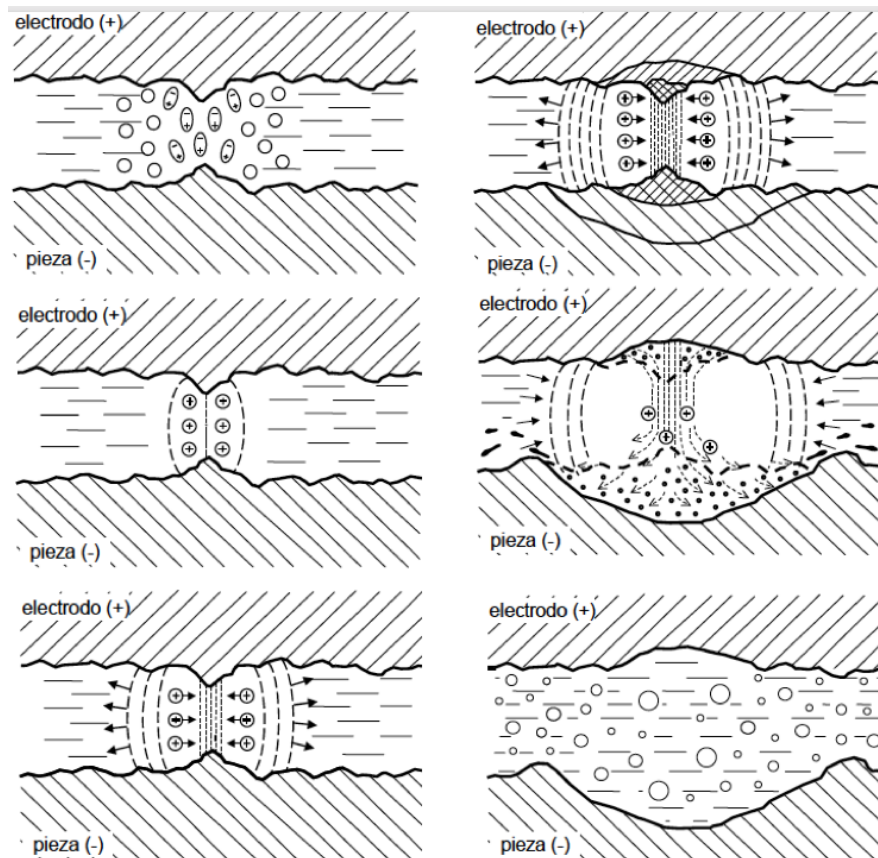


Figura 1-5 Proceso de la descarga

1.6 Tipos de configuraciones para máquinas de electroerosión

En el proceso de electroerosión existen dos configuraciones básicas, y la diferencia de éstas es el tipo de electrodo y el tipo de movimiento necesario para maquinar.

- Electroerosión por hilo (*Wire* EDM WEDM)

En este tipo de máquinas el electrodo que se utiliza es un hilo metálico y es necesario que se mueva tanto la pieza de trabajo como el electrodo, a continuación, se muestra una imagen para poder visualizar de forma más clara cómo debe de ser el movimiento entre estos (Figura 1-6)

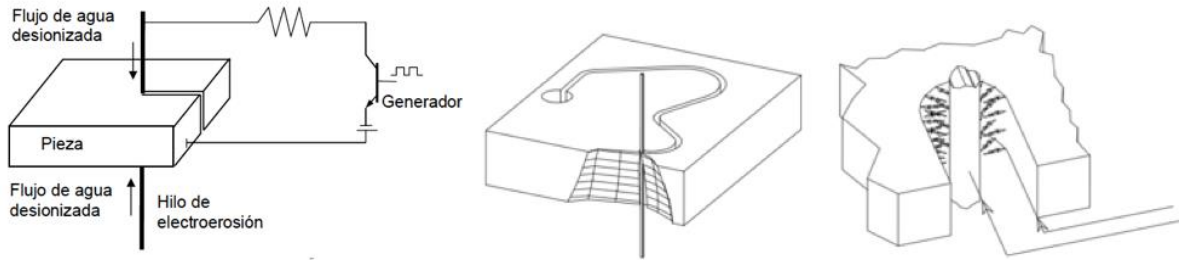


Figura 1-6 Electroerosión por hilo [4]

- Electroerosión por penetración (*Sinker EDM*).

En esta configuración tenemos dos tipos dependiendo de la forma del electrodo:

- o *Die-sink EDM*. En esta configuración el electrodo tiene la forma del maquinado que se requiere y dicho electrodo se reproduce como una copia espejo en la pieza de trabajo (Figura 1-7).

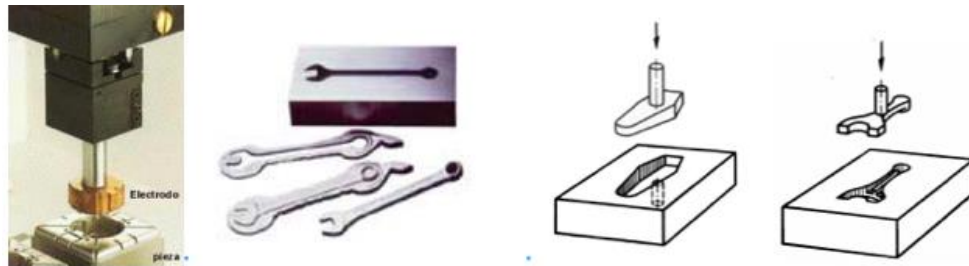


Figura 1-7 Electroerosión por penetración [4]

- o *Milling EDM*. En esta configuración el electrodo funciona como un cortador en el proceso de fresado, y la forma de maquinar es igual a la que se utiliza en una fresa convencional, la única diferencia es que aquí el desbaste de material es por medio del proceso de electroerosión (Figura 1-8).

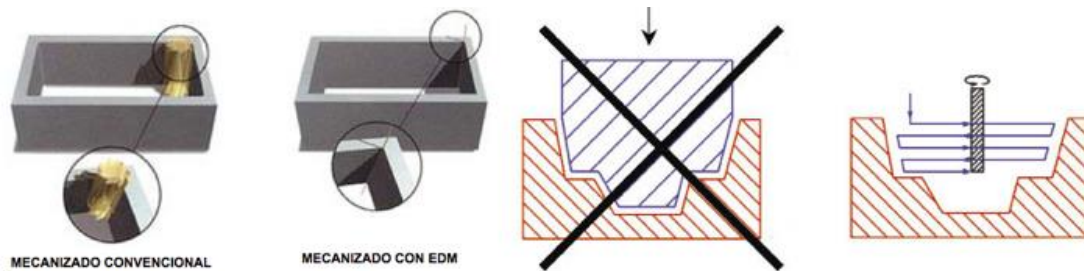


Figura 1-8 Milling EDM [4]

1.7 Principales componentes de una máquina de electroerosión por penetración

A continuación, se explicarán los componentes principales de una máquina de electroerosión, para explicar dichos componentes se utilizará la siguiente imagen (Figura 1-9) para que sea más representativo cada componente.

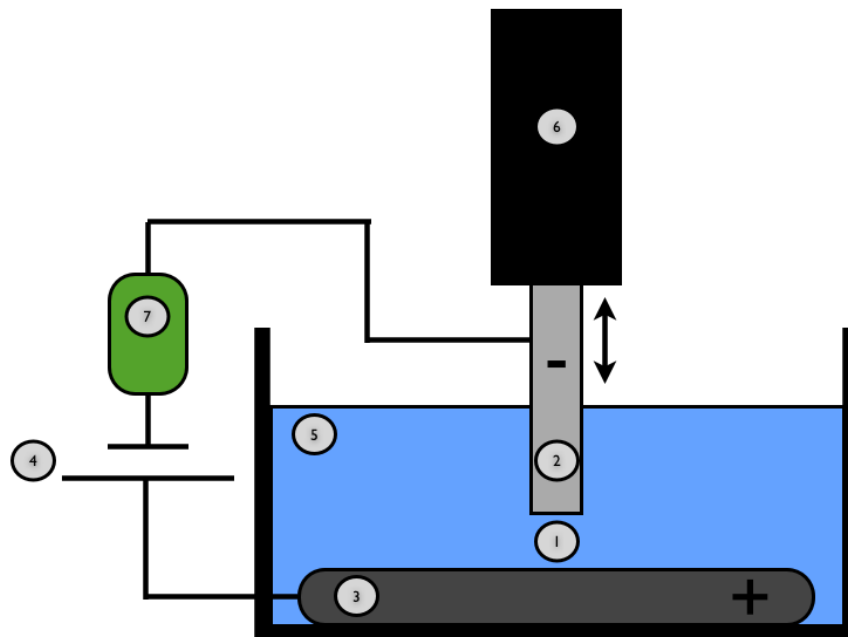


Figura 1-9 Diagrama de componentes del sistema de electroerosión

Componentes

1. *GAP*. Espacio que se tiene entre el electrodo y la pieza de trabajo donde se genera la chispa
2. Electrodo (Cátodo). Es el que se utiliza como herramienta para realizar el maquinado en la pieza de trabajo, ya sea reproduciendo a espejo la forma de esta o moviéndose en dos ejes para dibujar otra pieza como en el proceso de fresado, esta pieza forzosamente debe ser de un material conductor.

3. Pieza de trabajo (Ánodo). Es la pieza en la cual se va a llevar a cabo el maquinado, esta pieza forzosamente debe ser de un material conductor.
4. Fuente de corriente directa. Es la cual proveerá de energía al sistema para llevar a cabo el maquinado.
5. Fluido dieléctrico. Es el fluido en el cual se sumerge la pieza de trabajo y el electrodo para llevar a cabo el proceso de electroerosión.
6. Actuador. Es el dispositivo utilizado para mover el electrodo hacia la pieza de trabajo y que se pueda llevar a cabo el maquinado
7. Circuito eléctrico.
 - 7.1 Es la parte del circuito el cual genera los pulsos con los cuales trabajamos para llevar a cabo el proceso de electroerosión.
 - 7.2 Es la parte del circuito con la cual se controla el actuador para que se realice el maquinado.

1.8 Diferencias entre el proceso de electroerosión convencional y microelectroerosión

Conceptualmente el proceso de microelectroerosión no difiere del proceso convencional de electroerosión. Sin embargo, el proceso y los medios presentan algunas particularidades.

Una de las diferencias más notables se presenta en el tamaño del electrodo al ser tan pequeño presenta una limitada capacidad de conducción de calor, y por lo mismo al tener una masa pequeña su capacidad para disipar el calor en la zona de la descarga es limitada.

De la misma manera que en el proceso de electroerosión convencional para tener una mayor precisión, es necesario reducir las vibraciones del electrodo, así como su desgaste; y sabemos que en cada descarga el electrodo sufre un desgaste lo cual disminuye la sección efectiva del mismo, y esto implica una disminución en la energía que se tiene en cada descarga.

Por otra parte, sabemos que uno de los puntos más importantes en el proceso de microelectroerosión es el reducir al máximo la energía de cada chispa con el fin de controlar de la mejor manera posible la cantidad de material mecanizado por cada chispa, y así poder utilizar electrodos de diámetros muy pequeños. Por otro lado, dependiendo de la aplicación se requerirá mayor o menor energía, por ejemplo, en aplicaciones que se requiera mucha precisión se deberá reducir la energía por pulso, a diferencia de un proceso donde se requiera una elevada productividad en los cuales la energía por pulso deberá de incrementarse, y reducir los avances. [5]

En un proceso convencional de electroerosión la energía utilizada en cada descarga es del orden de Joules (0.05 a 1 [J]), mientras que en el proceso de microelectroerosión la energía utilizada en cada descarga es del orden de los microJules ($< 50 [\mu\text{J}]$). [6]

Con esto podemos concluir que los puntos esenciales para trabajar el proceso de microelectroerosión son los siguientes:

- Controlar la energía por pulso
- Tener una estabilidad en el *GAP* para poder evitar fluctuaciones en la descarga
- Tener una precisión adecuada en el posicionamiento del electrodo, lo cual implica establecer un sistema de control que permita movimientos finos [5].

1.9 Microelectroerosión en la actualidad y sus aplicaciones

En el mercado existen varias empresas que venden máquinas de electroerosión, como Knuth, Makino, ONA, echoENG, Aristech, AccuteX, JOEMARS, FANUC, Sodick, +GF+, Cormak, entre otras; pero en temas de microelectroerosión la oferta comercial es más reducida, a

continuación, se enlistan algunos de los sistemas de microelectroerosión disponibles en el mercado, sus características y sus aplicaciones (Tabla 1-1).

- Características

Fabricante	Modelo	Fuente de alimentación	Carrera Ejes	Precisión del posicionamiento	Resolución
Sarix	SX 100 hpm	400 V AC 50 Hz, 2KVA	X:250[mm] Y:150[mm] Z:150[mm]	± 2 [µm]	0.1 [µm]
SmalTec	GM703	110 V AC 50/60 Hz, 1kVA	X:50[mm] Y:50[mm] Z:70[mm]	10 [mm] : 0.03 [um] 50 [mm] : 0.17 [um]	.010 [um]
Aristech	MD-22/10A	200/380/415/440/600 V AC 3.5 KVA	X:250[mm] Y:250[mm] Z:150[mm]	± 1 [µm]	0.1 [µm]
Viteris Technologies	MW250	110 - 130 VAC	X:250[mm] Y:250[mm] Z:102[mm]	1 [um] / 100 [mm]	0.1 [µm]

Tabla 1-1 MicroEDM en la industria

- Aplicaciones

- Micromoldeo
 - Herramientas médicas
 - Microlentes
- Microgalgas extensiométricas (Figura 1-10)
- Estampado de precisión
- Punzonado de precisión
- Placas de inyector de tinta
- Placas de inyector de combustible diesel
- Matrices de extrusión de fibra
- Microguías de alambre
- Microresortes

- Aletas de microenfriamiento
- Cabezales de pulverización personalizados
- Micropines
- Medidores de microestrés
- Discos de orificio de chorro de agua
- Objetivos de alineación
- Boquillas de para inyectores de combustible (Figura 1-12)

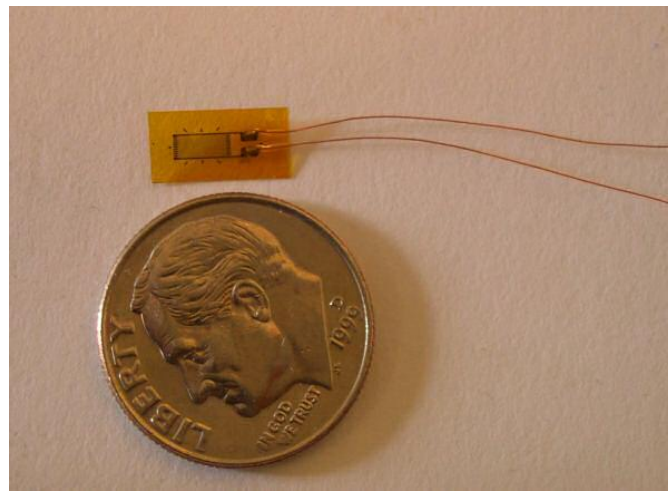


Figura 1-10 Microgalgas extensiométricas [8]

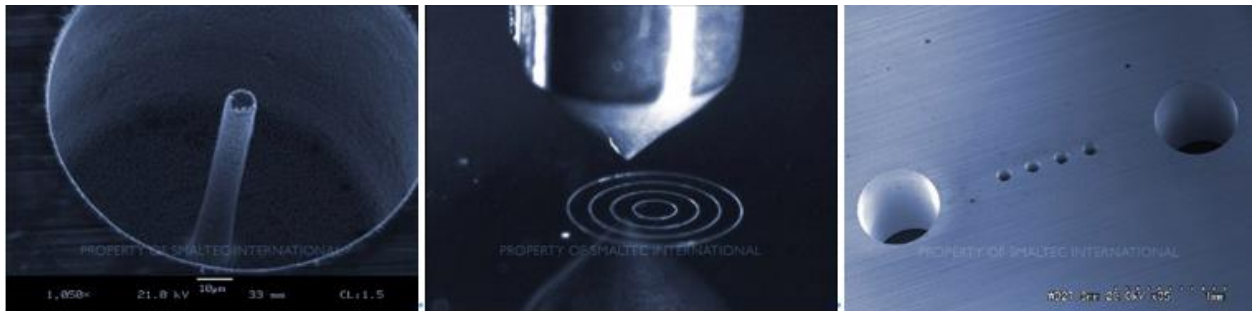


Figura 1-11 Ejemplos de aplicaciones [26]



Figura 1-12 Boquillas para inyectores de combustible en motores Diesel

Como podemos observar existe una demanda de sistemas de microelectroerosión para diversas aplicaciones.

1.10 Primer prototipo desarrollado en el Grupo de Micro Mecánica y Mecatrónica (Ahora Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital)

Como antecedente para este trabajo de tesis se utilizará el trabajo previo realizado en el laboratorio [6], esto con la finalidad de tener una referencia para analizar los resultados y aprovechar la experiencia obtenida en el trabajo anterior, el objetivo principal del primer trabajo fue el diseño e implementación de una fuente para el proceso de microelectroerosión.

A continuación, se explicarán las partes que componen al primer prototipo desarrollado en el laboratorio

1.10.1 Fuente

En este prototipo se utilizó una fuente la cual consistía en un circuito RC (Resistor - Capacitor) en serie (Figura 1.13), el objetivo de esta fuente fue la generación de pulsos con los cuales funcionó el sistema de electroerosión, dicho circuito fue alimentado con una fuente de 30 [V] de corriente directa, la resistencia tenía un valor equivalente aproximadamente de 10 [Ω] y un capacitor de polipropileno de 20 [μF].

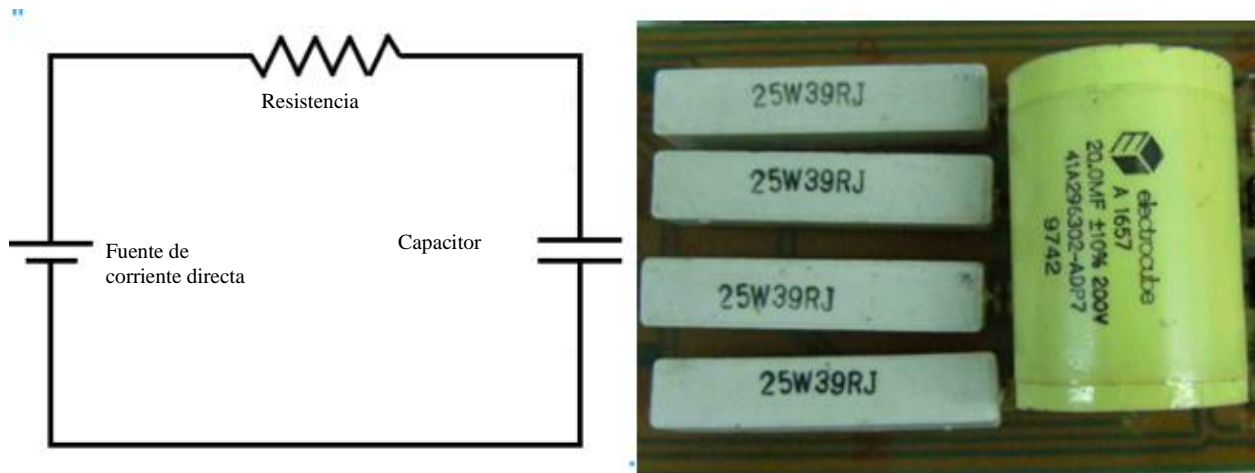


Figura 1-13 Fuente con circuito RC primer prototipo

Con base en los valores de los dispositivos utilizados en el circuito eléctrico podemos calcular la constante de tiempo con la siguiente fórmula:

$$\tau [s] = R [\Omega] * C [F] \quad \text{Formula 1}$$

Donde

τ = Constante de tiempo del circuito RC

R = Resistencia

C = Capacitancia

Sustituyendo valores

$$\tau [s] = 10[\Omega] * 20 \times 10^{-6} [F] = 0.0002 [s] \quad \text{Formula 2}$$

Una vez que obtuvimos la constante de tiempo es posible calcular el valor de frecuencia máxima del circuito.

$$F = \frac{1}{\tau} [Hz]$$

Formula 3

Sustituyendo la constante de tiempo

$$F = \frac{1}{0.0002[s]} = 5 [KHz]$$

Formula 4

Con esto obtenemos el valor teórico de la frecuencia máxima de maquinado que se puede obtener con el circuito propuesto de 5[KHz].

1.10.2 Posicionamiento del electrodo y la pieza de trabajo

Para realizar el posicionamiento del electrodo en este primer prototipo se utilizó una máquina de control numérico (CNC) (Figura 1-14).

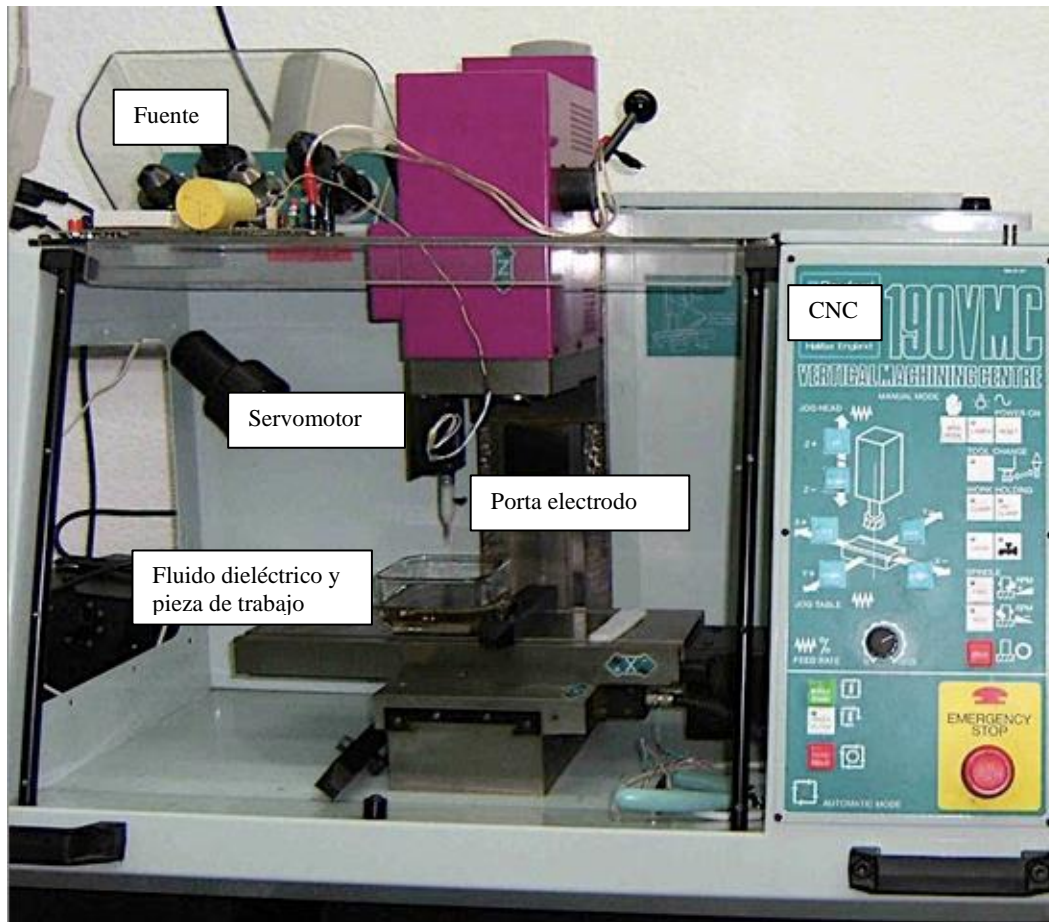


Figura 1-14 Máquina de control numérico (CNC)

A la cual se le acopló un servomotor de corriente directa con desplazamiento lineal con un porta electrodos; este servomotor se utilizó como el actuador para realizar el control de la posición durante el proceso de electroerosión. El porta electrodos tiene un tornillo que cumplía dos funciones: sujeción y punto de conexión para el voltaje de alimentación del electrodo (Figura 1-15).

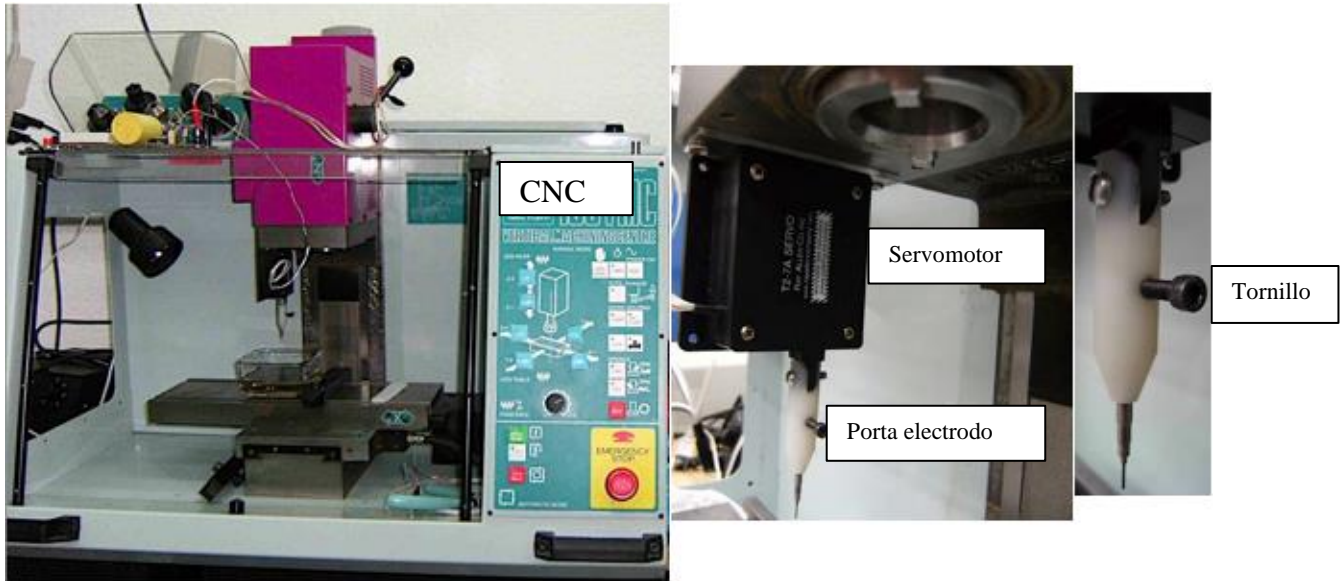


Figura 1-15 CNC, servomotor y porta electrodos

En la mesa de la máquina de control numérico se cuenta con un sistema de sujeción para la pieza de trabajo dentro de un recipiente de vidrio PYREX, la razón de utilizar un recipiente y no directo sobre el banco de la máquina es para poder contener el fluido dieléctrico necesario durante el proceso. (Figura 1-16)

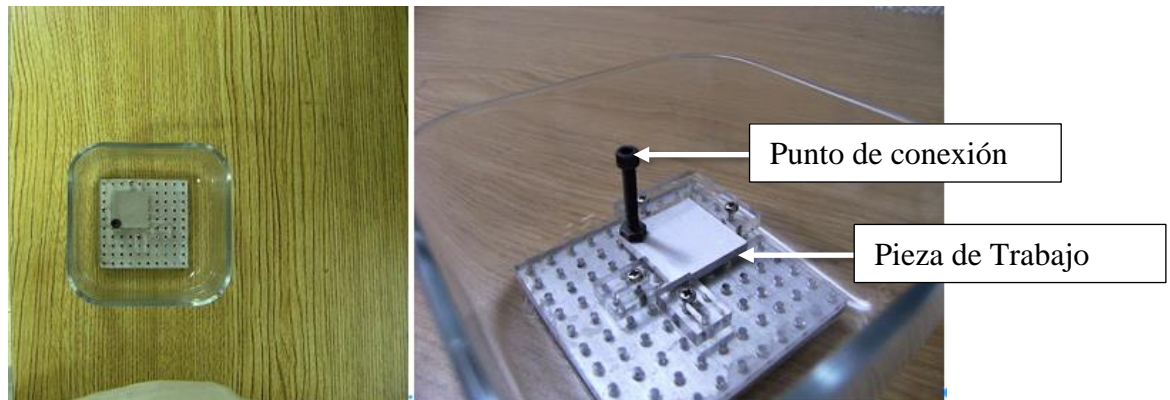


Figura 1-16 Recipiente de vidrio y sistema de sujeción

El método de sujeción de la pieza de trabajo, requería que se hiciera un barreno a la pieza de trabajo para colocarse un tornillo que servía como punto de conexión de la fuente a la pieza de trabajo. (Figura 1-17)

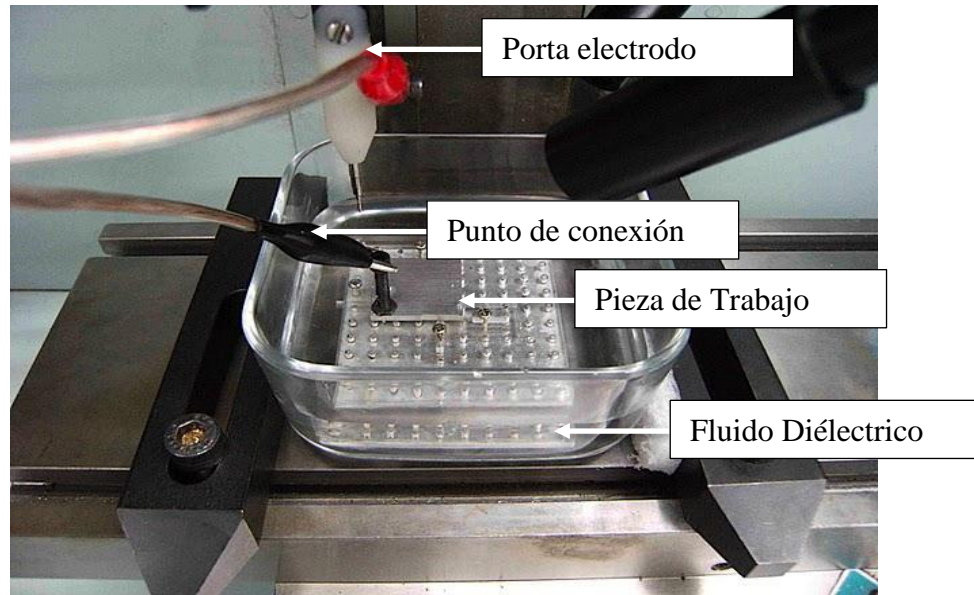


Figura 1-17 Posicionamiento del electrodo y la pieza de trabajo

1.10.3 Control de posición del electrodo

El método de control implementado para el posicionamiento del electrodo durante el proceso de electroerosión consistió en utilizar el voltaje del capacitor que es el mismo voltaje que se tiene en el GAP (V_{GAP}), el cual fue comparado con un voltaje de referencia fijo (V_{FIJO}), y dependiendo de la diferencia de potencial que se tenga se polarizaba el servomotor para moverse en un sentido u otro

En la siguiente figura (Figura 1-18) se puede observar el comportamiento del voltaje del capacitor durante la carga y descarga.

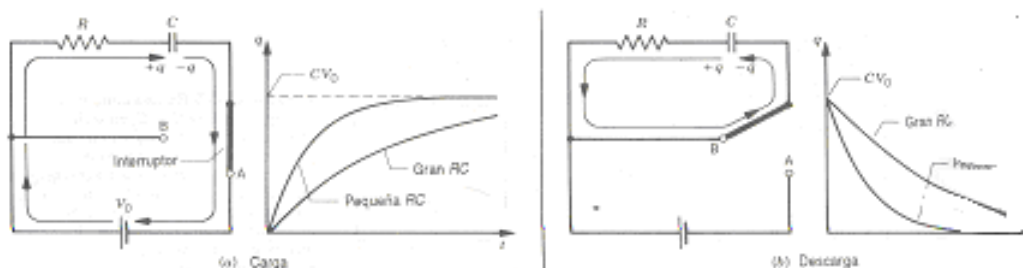


Figura 1-18 Carga y descarga de un capacitor [16]

Al presentarse una chispa, arco o corto circuito el V_{GAP} disminuye rápidamente y en esa condición es necesario subir el electrodo para volver a tener una condición de circuito abierto

y generar otra chispa. En la Tabla 1-2 se presentan los estados del *GAP* y el sentido de movimiento del electrodo.

Estado del GAP	Motor		Dirección electrodo
	A	B	
Circuito Abierto	0	1	Baja
Chispa	1	0	Sube
Arco	1	0	Sube
Corto Circuito	1	0	Sube

Tabla 1-2 Control servomotor

El V_{FIJO} se obtiene con un divisor de voltaje variable, el cual es alimentado con un voltaje de corriente directa independiente al V_{GAP} . Para poder variar este voltaje se utiliza un potenciómetro de precisión para tener un control más fino de las variaciones del voltaje.

A continuación, se muestra un diagrama del circuito eléctrico utilizado para el control del servomotor (Figura 1-19) [6].

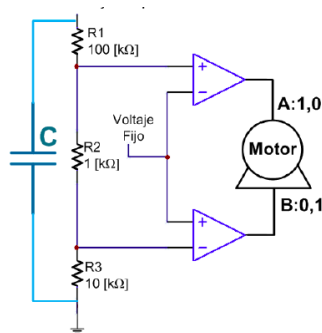


Figura 1-19 Diagrama del circuito

1.11 Evaluación del primer prototipo

Con la finalidad de establecer las mejores condiciones para manufacturar con el sistema de microelectroerosión desarrollado, se realizaron pruebas considerando tres parámetros de control:

- Fluido Dieléctrico

- Dieléctrico comercial
- Queroseno
- Aceite
- Materia prima
 - Latón
 - Aluminio
- Electrodo
 - Cobre
 - Grafito

La variable de control seleccionada fue el material removido, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 1-3:

No. Exp	Vol. despl. x 10 ⁻³ [mm]	Dieléctrico	Materia Prima	Electrodo
6	705.75	Queroseno	Latón	Cobre
5	651.14	Aceite	Latón	Cobre
10	601.12	Dieléctrico Comercial	Latón	Grafito
9	163.8	Queroseno	Aluminio	Grafito
1	102.2	Dieléctrico Comercial	Aluminio	Cobre
2	82.27	Aceite	Aluminio	Cobre
7	56.22	Dielectrico Comercial	Aluminio	Grafito
8	17.67	Aceite	Aluminio	Grafito
3	11.9	Queroseno	Aluminio	Cobre
11	9.41	Aceite	Latón	Grafito
12	7.53	Queroseno	Latón	Grafito
4	1.47	Dieléctrico Comercial	Latón	Cobre

Tabla 1-3 Orden descendente en cuanto a volumen de material desplazado de la pieza de trabajo [6]

Al realizar las pruebas fue posible observar que sólo en algunos experimentos fue posible alcanzar la frecuencia máxima de operación del sistema por algunos instantes, pero no se contaba con la instrumentación necesaria para medir estos tiempos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 ¿Por qué investigar procesos de micromanufactura?

Uno de los grandes avances en las microtecnologías se dio a mediados del siglo pasado al aparecer el transistor (reconocido con el premio nobel de física), dicho componente tuvo un gran impacto en el diseño de circuitos electrónicos reemplazando las costosas y poco fiables válvulas de vacío o bulbos.

A finales de la década de los 50 Richard Feynman, eminente físico, publicó un estudio en el que promovía una gran tecnología en las tecnologías de miniaturización, esto inspirado en el funcionamiento de los sistemas biológicos por su capacidad de ejecutar funciones complejas y almacenar grandes cantidades de información a nivel microscópico, en este estudio Feynman especulaba sobre los nuevos campos de aplicación al desarrollar la capacidad de fabricar dispositivos miniaturizados.

Como podemos ver la miniaturización de los componentes tuvo sus orígenes en la electrónica, teniendo grandes avances, es por eso por lo que se presentó la necesidad de trabajar en la miniaturización en otros sectores, esto debido a que la miniaturización conlleva muchas ventajas, entre las que se pueden mencionar:

- Reducción de energía y consumo de materiales durante la fabricación
- Aplicaciones menos invasivas
- Dispositivos de gran sensibilidad con funcionamiento más selectivo
- Mejor relación coste / funcionalidad
- Ligereza y portabilidad

Las microtecnologías desempeñarán un papel muy importante en la industria del futuro en sectores como son: medicina, biotecnología, energía, etc., esto debido a que las microtecnologías son el enlace entre el mundo microscópico y macroscópico, con esto surge la necesidad de desarrollar sistemas que nos permitan seguir incursionando en la miniaturización y es por eso por lo que contar con sistemas de manufactura a pequeña escala se vuelve una línea de investigación muy importante y con gran futuro. [4]

2.3 ¿Por qué investigar microelectroerosión?

Como se mencionó anteriormente, existe una importante línea de investigación referente a los sistemas de manufactura a pequeña escala, los cuales podemos dividir de acuerdo con su método de operación en dos principalmente:

- Métodos por arranque de viruta
- Métodos energéticos

Ya que en los métodos energéticos la herramienta de trabajo no debe tener una dureza mayor a la de la pieza de trabajo como en los métodos de arranque por viruta y por otro lado, se han observado oportunidades de producir pequeños microcomponentes como agujeros de boquilla, ranuras, ejes y engranajes en cualquier material conductor por medio de la microelectrosión, debido a que la tasa de remoción de material entre el proceso de electroerosión convencional y la microelectrosión es menor ($\sim 0.05 - 500 \mu\text{m}^3$) y también se han demostrado beneficios en el mecanizado de formas complejas en materiales de alta dureza que son difíciles de fabricar por medios convencionales. Por esta razón se ha decidido enfocar este trabajo en la mejora del sistema de control del primer prototipo de microEDM desarrollado[11].

2.4 Objetivo

Desarrollar un sistema de control del *GAP* para buscar mejorar el desempeño del primer prototipo microEDM desarrollado.

2.5 Alcances

- Desarrollar un banco de resistencias para la fuente del primer prototipo
- Diseño de experimentos
 - o Prototipo actual con banco de resistencias
 - o Prototipo con nuevo sistema de control
- Investigar el proceso de manufactura por electroerosión.
- Investigar sistemas para establecer el espacio óptimo entre el electrodo y la pieza de trabajo.
- Investigar sistemas de control para posicionamiento fino.
- Diseñar un sistema que permita controlar el espacio entre el electrodo y la pieza de trabajo (*GAP*).
- Realizar pruebas al sistema de control de *GAP*.
- Desarrollar pruebas que permitan establecer la influencia del espacio entre el electrodo y la materia prima en la calidad superficial de piezas micromanufacturadas.
- Analizar resultados y establecer trabajo a futuro.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 *GAP*

Como lo vimos en la Figura 1-9, el *GAP* es una variable crítica dentro del proceso de electroerosión ya que de él dependen otros factores como son el voltaje necesario para romper la rigidez dieléctrica del fluido, la tasa de remoción de material, la rugosidad, la estabilidad en el proceso, el tipo de descarga que se presentará, etc. [10].

El proceso de remoción de material sucede en este *GAP* y dependiendo la etapa del proceso se presentará alguno de los siguientes tipos de descarga:

- Circuito abierto. Éste se presenta cuando la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo es mayor a la distancia necesaria por romper la rigidez dieléctrica del fluido dieléctrico, en este caso el voltaje que se tiene en el *GAP* es el mismo que el de la fuente y no se tiene flujo de corriente.
- Cortocircuito. Éste se presenta cuando la herramienta está haciendo contacto con la pieza de trabajo, en este caso no se tiene voltaje en el *GAP* ya que el *GAP* es cero, mientras que la corriente fluye constantemente calentando la pieza de trabajo y el electrodo, sin remover material.
- Arco. Éste se caracteriza por tener un flujo de corriente entre el electrodo y la pieza de trabajo. Inmediatamente que se presenta el pulso de la fuente y el voltaje que se tiene en el *GAP* nunca llega al voltaje de circuito abierto.
- Chispa. Este se caracteriza por que el voltaje en el *GAP* aumenta hasta alcanzar el voltaje de circuito abierto, después de un instante de tiempo la descarga se estabiliza y la

corriente fluye, en este punto la corriente alcanza su valor máximo y el voltaje en el *GAP* disminuye hasta el voltaje de descarga manteniéndose constante hasta que se acabe el pulso; en la Figura 3-1 se muestran las formas de onda de Voltaje y Corriente, para cada una de las etapas al generarse una chispa.

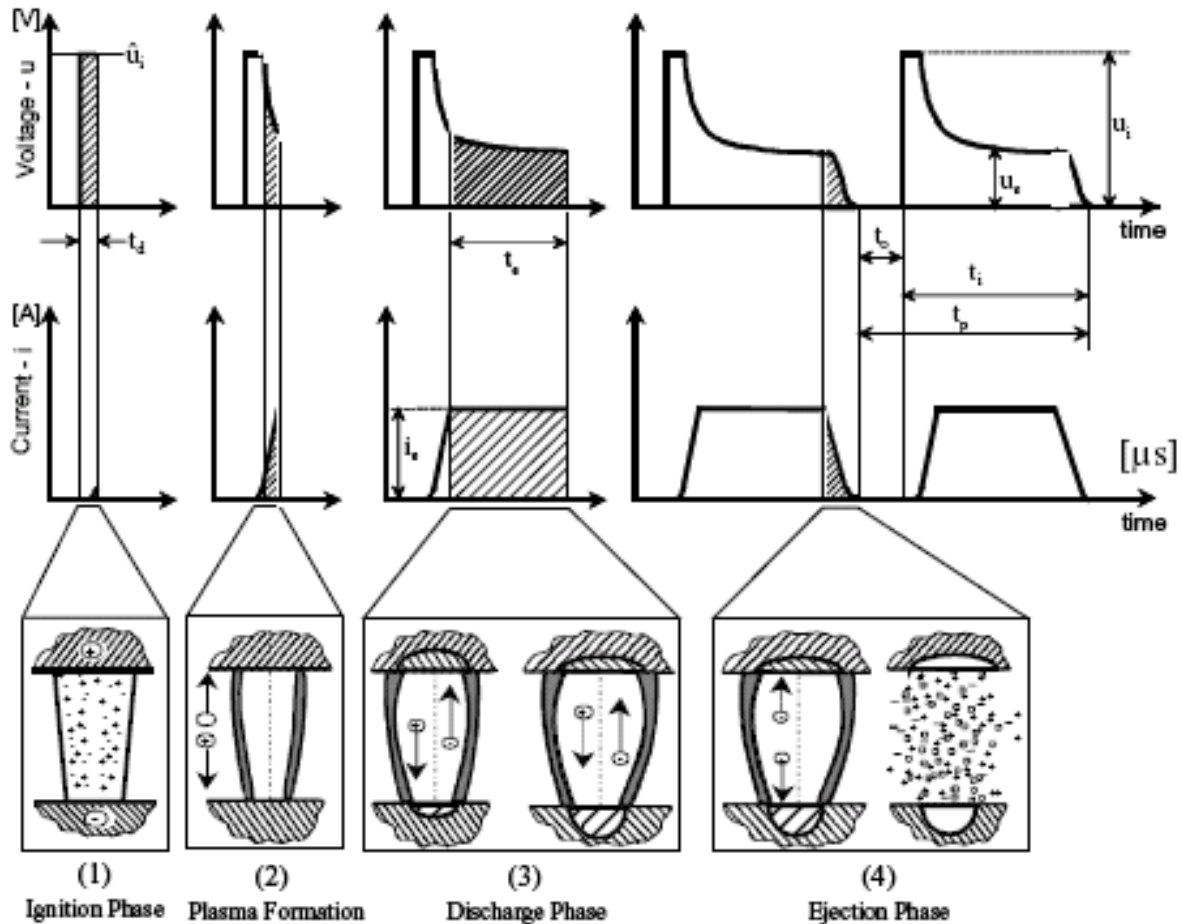


Figura 3-1 Comportamiento de voltaje y corriente durante un pulso [12]

Los primeros tres tipos de descarga mencionados anteriormente (Circuito abierto, corto circuito y arco) son consideradas como descargas no deseadas en el proceso, ya que disminuyen la tasa de remoción de material lo cual afecta la eficiencia del maquinado; a continuación, en la Figura 3-2, podremos ver las diferencias que se presentan en las formas de onda de voltaje y corriente entre los tipos de descarga que se pueden presentar en el proceso [11].

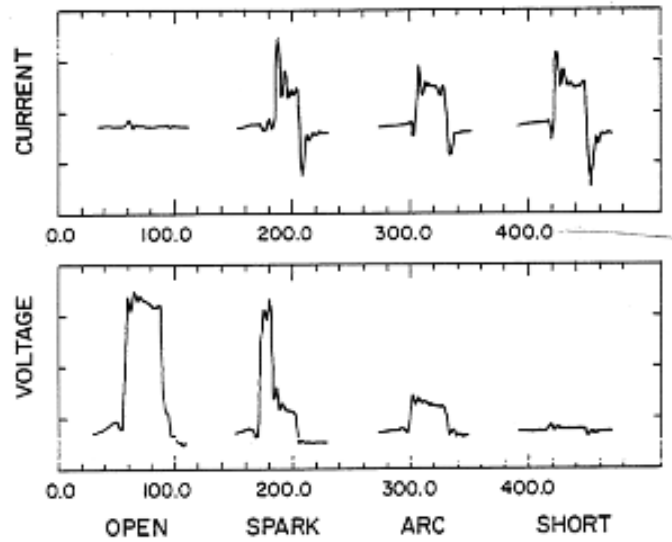


Figura 3-2

3.2 Formas de controlar el *GAP*

Dada la importancia del *GAP* dentro del proceso de electroerosión, esto ha llevado a desarrollar varios métodos de control, a continuación se explican algunos.

3.2.1 Control de *GAP* mediante la regulación de la frecuencia

En este método se utiliza una fuente RC con la cual se obtiene energía eléctrica casi constante en cada descarga, y al regular la frecuencia de los pulsos se puede controlar la tasa de remoción de material.

Lo que se busca es regular la frecuencia de los pulsos controlando el *GAP*, ya que al reducir el *GAP* se aumenta la frecuencia de los pulsos, por lo cual el *GAP* resulta ser un efectivo regulador de la frecuencia de los pulsos.

El proceso consiste en atenuar el voltaje presente entre el electrodo y la pieza de trabajo y éste entra a un circuito comparador para compararlo contra un voltaje de referencia. Cuando el voltaje que se tiene entre el electrodo y la pieza de trabajo es menor que el voltaje de referencia,

la comparación se vuelve negativa dando una salida de 0[V], estos cambios de estado son la entrada de una tarjeta de adquisición de datos con la cual se determina la frecuencia de los pulsos y se utiliza como retroalimentación hacia una computadora, la cual cuenta con una tarjeta para el control de movimiento del sistema.

Ya que la frecuencia de los pulsos fluctúa con una alta frecuencia, para calcular el movimiento se utiliza un promedio que se calcula con la frecuencia de los pulsos medida, usando 10 muestras por segundo; a continuación se muestra una imagen en la cual podemos ver este sistema (Figura 3-3) [13]

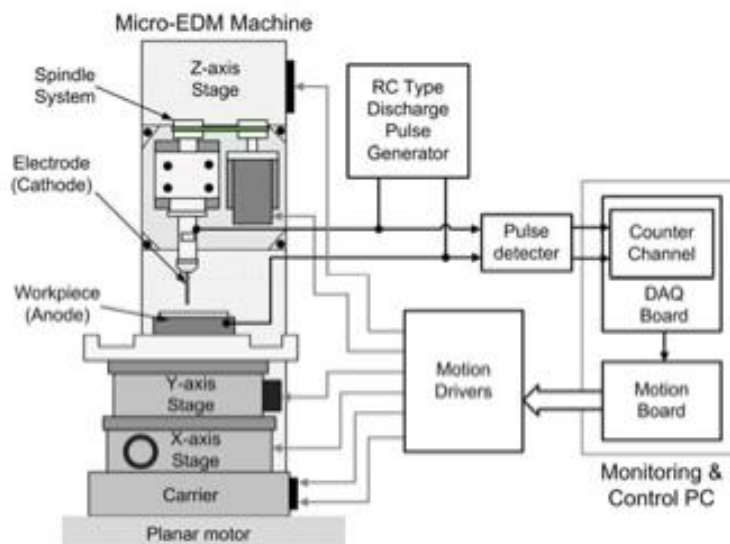


Figura 3-3 Máquina de microelectrósion

3.2.2 Control del *GAP* midiendo voltaje y corriente con control adaptativo

En este método el estado del *GAP* es determinado con el voltaje y la corriente presente en el *GAP*, los cuales una vez que se acondiciona la señal entran a un convertidor Analógico - Digital para así procesarlos en una computadora, estos datos son enviados de la computadora a un convertidor Digital - Analógico para controlar el proceso, en la siguiente figura podremos ver el esquema de control (Figura 3-4)

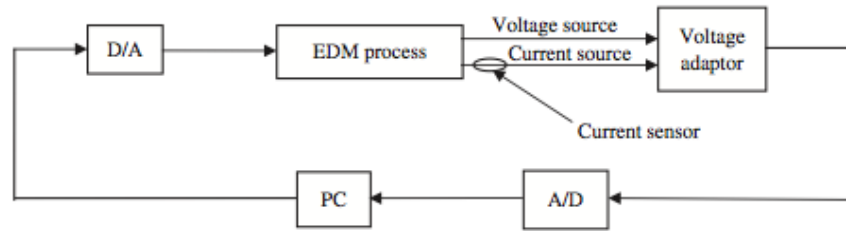


Figura 3-4 Esquema de control con medición de voltaje y corriente

En este método para poder determinar el estado del GAP se usa el siguiente criterio:

$$y = (\tau_{\text{stable arc}} + \tau_{\text{short}}) / (\tau_{\text{spark}} + \tau_{\text{transient arc}} + \tau_{\text{stable arc}} + \tau_{\text{short}}) \quad \text{Formula 5}$$

Donde:

- y: Estado del GAP
- τ_{spark} : Número de chispas en un periodo de tiempo especificado
- $\tau_{\text{transient arc}}$: Número de arcos transitorios en un periodo de tiempo especificado
- $\tau_{\text{stable arc}}$: Número de arcos estables en un periodo de tiempo especificado
- τ_{short} : Número de cortos en un periodo de tiempo especificado

Una vez que se obtiene el valor del estado del GAP (y), se usa un modelo predictivo, con la finalidad de que el sistema de control adaptativo encuentre un método para ajustar el controlador dependiendo las características del proceso de EDM y el entorno, de tal manera que se consiga obtener un proceso estable.

Además del GAP se tiene otra razón por la cual el proceso es inestable, esto es debido a la acumulación de material removido entre la pieza de trabajo y el electrodo. Una manera efectiva de remover dicho material es mover la herramienta, lo cual genera una fuerza que ayuda a sacar el material removido del área de trabajo.

Normalmente, un periodo corto en el brinco de la herramienta mejora la eliminación de material removido, pero reduce la tasa de maquinado; mientras que un periodo largo en el brinco de la herramienta disminuye la tasa de maquinado, además reduce la estabilidad en el maquinado e incrementa el riesgo de tener arco por la gran cantidad de material removido en el *GAP*. (Figura 3-5)

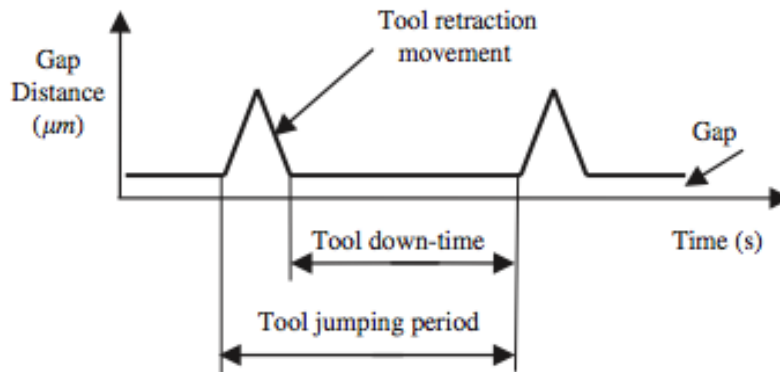


Figura 3-5 Ilustración del movimiento de la herramienta

Por esta razón este esquema de control aparte de mantener el estado del *GAP* para tener un proceso estable genera brinco en la herramienta para poder desalojar el material removido y poder estabilizar de una mejor manera el proceso.

La razón principal de usar un control adaptativo en el proceso de EDM es debido a que el control adaptativo puede modificar su comportamiento en respuesta de la variación del estado del *GAP* durante el proceso y también cambiar las características por perturbaciones. [14]

3.2.3 Control del *GAP* mediante medida directa entre los electrodos.

En este método a diferencia de los que se mencionaron anteriormente se conoce el valor real del *GAP*, no el estado de éste, por lo cual se puede controlar de una mejor manera al tener la capacidad de tener una posición específica durante todo el proceso.

Este método no necesita mover la herramienta para desechar el material removido ya que, debido a su principio de funcionamiento es más fácil desechar dicho material

La forma de operar es la siguiente: por medio de una bomba el fluido dieléctrico se hace pasar por un restrictor, donde se tiene un instrumento para medir la presión para así llegar al electrodo, cabe mencionar que el electrodo es un tubo para que el fluido dieléctrico pueda circular a través de él; debido a que la sección transversal del GAP es mucho menor que la del canal que se tiene en el electrodo, la presión entre el restrictor y la punta del electrodo depende del GAP ; por lo tanto, si la relación entre el GAP y la presión del fluido es conocida antes del proceso de maquinado, podemos determinar el valor absoluto del GAP . (Figura 3-6)

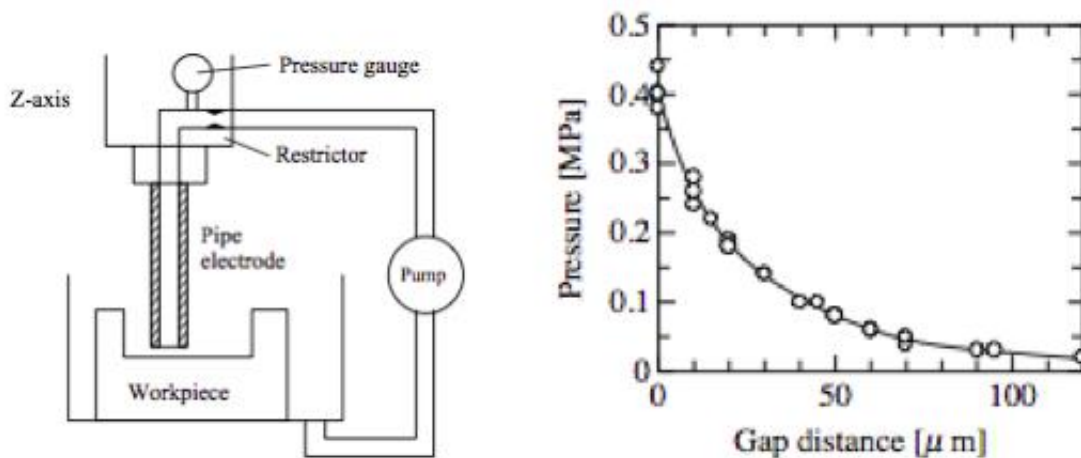


Figura 3-6 Principio de funcionamiento y relación entre el GAP y presión

Ya que la relación entre el GAP y la presión del fluido dieléctrico es única, controlar la distancia del GAP es equivalente a controlar la presión del fluido. Sin embargo, la penetración de la herramienta es controlada con base en la medición de la presión del fluido.

Por lo tanto, en este método la tarea principal del control es mantener el GAP en un cierto valor durante todo el proceso, es por esto que la señal de control de la velocidad de avance de

la herramienta es generada en proporción a la desviación que se tenga en la presión del fluido dieléctrico, con respecto a la presión fijada con base en el *GAP* que se definió para el proceso. [10]

3.3 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos (DOE, del inglés) es una técnica que consiste en realizar una serie de experimentos en los que se inducen cambios deliberados en las variables de un proceso, de manera que es posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida, el diseño de experimentos se basa en las siguientes etapas

1. Reconocimiento del problema. Se entiende como problema tanto una situación no deseable en la que algo está funcionando mal, como una situación que trabaja correctamente, pero que se desea mejorar.
2. Elección de los factores y niveles. Son los factores que se intuye que pueden influir en el problema que se está considerando, en el diseño de experimentos se evaluará cada factor en condiciones diferentes, llamados niveles del factor.
3. Selección de la variable respuesta. Se llama respuesta o variable dependiente a la variable con que se evalúa el problema
4. Elección del diseño experimental. Establecidos los factores y niveles con los que experimenta, es necesario seleccionar las condiciones en las que se deben realizar los experimentos:
 - a. Cantidad de experimentos por realizar
 - b. Condiciones experimentales para cada experimento
 - c. Orden en que éstos deben ser realizados.

La elección de un diseño está directamente asociada con un modelo matemático que relaciona la respuesta con los factores analizados

- Modelo Lineal
 - Factoriales
 - Ortogonales de Taguchi
 - Placket-Burman
 - Etc.

 - Modelo No Lineal
 - Diseños compuestos centrales (CCD)
 - Diseños de Box-Behnken (BBD)
 - Etc.
5. Realización de los experimentos. Para realizar los experimentos, primero hay que asegurarse de que todos los recursos necesarios estén disponibles
 6. Análisis de los datos
 7. Conclusiones y recomendaciones [25]

3.4 Control

El control ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, debido a que los avances en la teoría y la práctica del control aportan los medios para obtener un desempeño óptimo de los sistemas.

Ahora definiremos algunos términos que resultan necesarios para describir los sistemas de control:

- Planta: Cualquier objeto físico que se va a controlar.
- Proceso: Cualquier operación que se va a controlar.

- **Sistemas:** Es una combinación de componentes que actúan en conjunto y realizan un objetivo determinado.
- **Perturbaciones:** Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, en tanto que una perturbación externa se produce fuera del sistema y es una entrada. [17]

3.4.1 Sistemas de control en lazo abierto

Son los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se retroalimenta para compararla con la entrada. En cualquier sistema de control de lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija. Como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración.

En la práctica, el control de lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y no hay perturbaciones internas ni externas (Figura 3-7). [17]

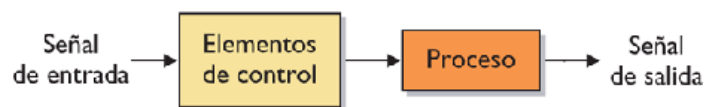


Figura 3-7 Sistema de Control en lazo abierto [18]

3.4.2 Sistemas de control en lazo cerrado

En un sistema de control de lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (señal de salida o una función de la señal de salida y/o sus derivadas o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre

implica el uso de una acción de control retroalimentado para reducir el error del sistema (Figura 3-8). [17]

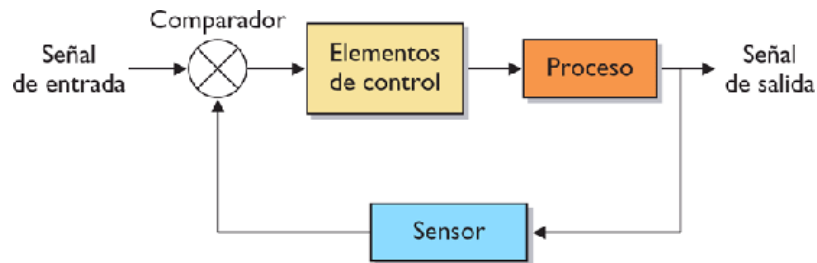


Figura 3-8 Sistema de Control en lazo cerrado [18]

3.4.3 Acciones Básicas de Control

Clasificación de los controladores industriales, de acuerdo con su acción de control:

- *On / Off*. De dos posiciones o de encendido y apagado
- Proporcionales
- Integrales
- PI. Proporcionales - Integrales
- PD. Proporcionales - Derivativos
- PID. Proporcionales - Integrales - Derivativos

3.4.3.1 Acción del Control Proporcional

Para un controlador con acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$$u(t) = K_p e(t) \quad \text{Formula 6}$$

Donde el controlador proporcional es, en esencia, un amplificador con ganancia ajustable.

3.4.3.2 Acción del Control Integral

En el control proporcional de una planta, cuya función de transferencia no posee un integrador ($1/s$), hay un error en estado estable, o desplazamiento (offset), en la respuesta para una entrada escalón. Este offset se elimina al incluir la acción de control integral en el controlador.

En el control integral de una planta, la señal de control, que es la señal de salida a partir de un controlador, es en todo momento el área bajo la curva de la señal de error hasta tal momento. La acción de control integral, aunque elimina el offset o el error en estado estable, puede conducir a una respuesta oscilatoria de amplitud decreciente lenta o, incluso, de amplitud creciente, y ambos casos, por lo general, se consideran inconvenientes.

3.4.3.3 Acción de Control Derivativa

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, aporta un medio para obtener un controlador con alta sensibilidad.

Una ventaja de usar una acción de control derivativa es que responde a la velocidad del cambio del error, y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Por tanto, el control derivativo prevé el error, inicia una acción correctiva oportuna, y tiende a aumentar la estabilidad del sistema.

Aunque el control derivativo no afecta en forma directa el error en estado estable, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite el uso de un valor más grande para la ganancia K , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

Debido a que el control derivativo opera sobre la velocidad de cambio del error, y no sobre el error mismo, es por tal motivo que este nunca se usa solo. Siempre se emplea junto con una acción de control proporcional o proporcional - integral.

3.4.3.4 Acción de Control Proporcional-Integral-Derivativa

La combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativa se denomina acción de control proporcional-integral-derivativa (PID). Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{\partial}{\partial t} e(t) \quad \text{Formula 7}$$

Donde,

K_p = Ganancia proporcional

T_i = Tiempo integral

T_d = Tiempo derivativo

$u(t)$ = Salida del controlador

$e(t)$ = Señal de error.

El diagrama de bloques de un controlador PID aparece en la Figura 3-9

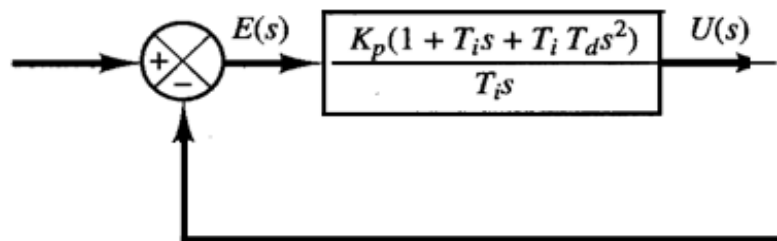


Figura 3-9 Diagrama de bloques controlador PID [17]

Si $e(t)$ es una función rampa unitaria, como la que se observa en la Figura 3-10, la salida del controlador $u(t)$ se convierte en el de la Figura 3-11[17]

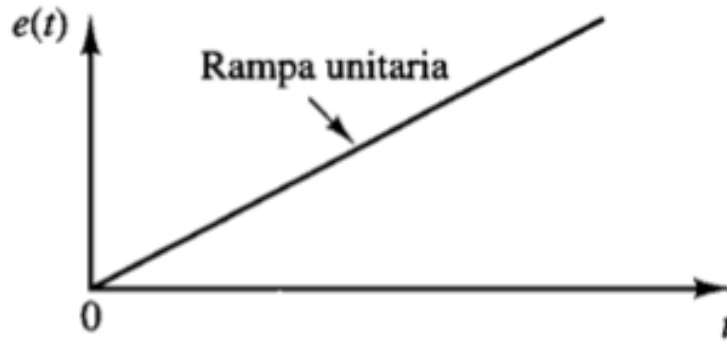
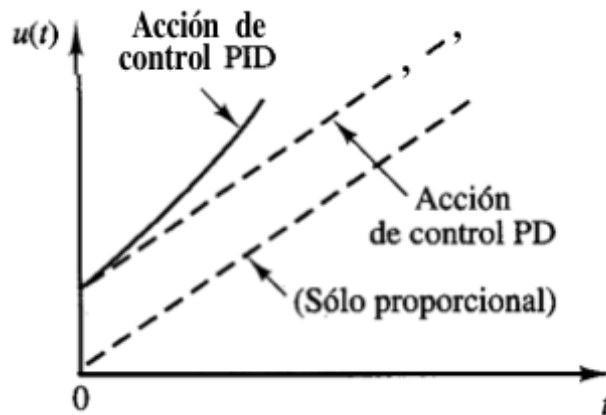
Figura 3-10 $e(t)$ rampa unitaria [17]

Figura 3-11 Salida del controlador [17]

3.4.4 Control PID de plantas

Si se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones en estado transitorio y en estado estable del sistema en lazo cerrado. (Figura 3-12)

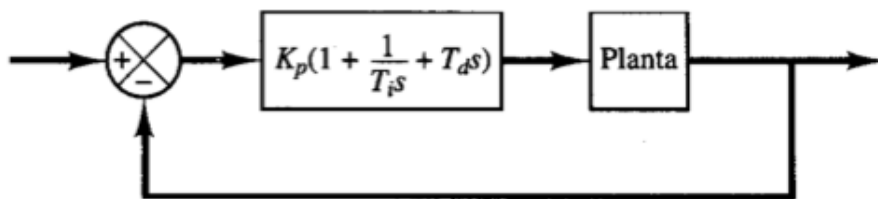


Figura 3-12 Control PID de una planta [17]

Sin embargo, si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso,

debemos recurrir a los enfoques experimentales para la sintonización de los controladores PID, como el método Ziegler-Nichols.

- Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID. Ziegler y Nichols propusieron unas reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo, integral T_i y del tiempo derivativo T_d , con base en las características de respuesta transitoria de una planta específica. Las reglas de Ziegler-Nichols, son muy convenientes cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas.

Existen dos métodos denominados reglas de sintonización de Ziegler-Nichols. En ambos se pretende obtener un 25% de sobrepaso máximo en la respuesta escalón (Figura 3-13)

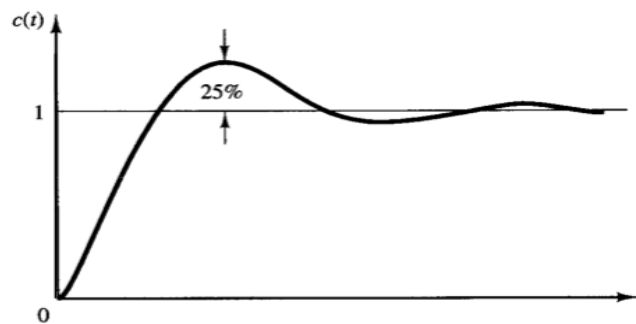


Figura 3-13 [17] Sobrepaso en la respuesta al escalón

- Primer Método. La respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental (Figura 3-14). Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S.

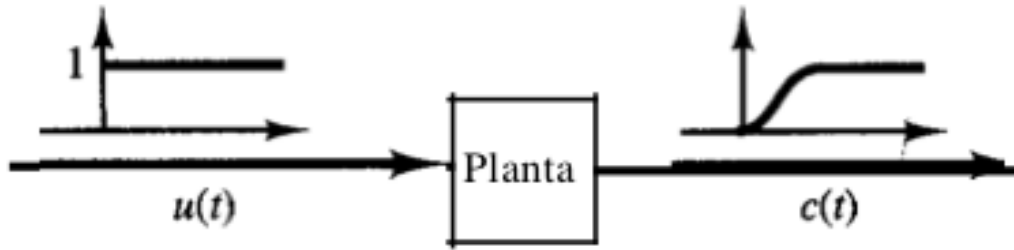


Figura 3-14 Respuesta al escalón unitario de una planta [17]

Si la respuesta no exhibe una curva con forma de S, este método no se puede aplicar; tales curvas de respuesta al escalón unitario se obtienen experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta. La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros:

- El tiempo de retardo (L)
- La constante de tiempo (T)

Estos parámetros se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S, y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y la línea $c(t) = K$, como se puede observar en la Figura 3-15 [17]

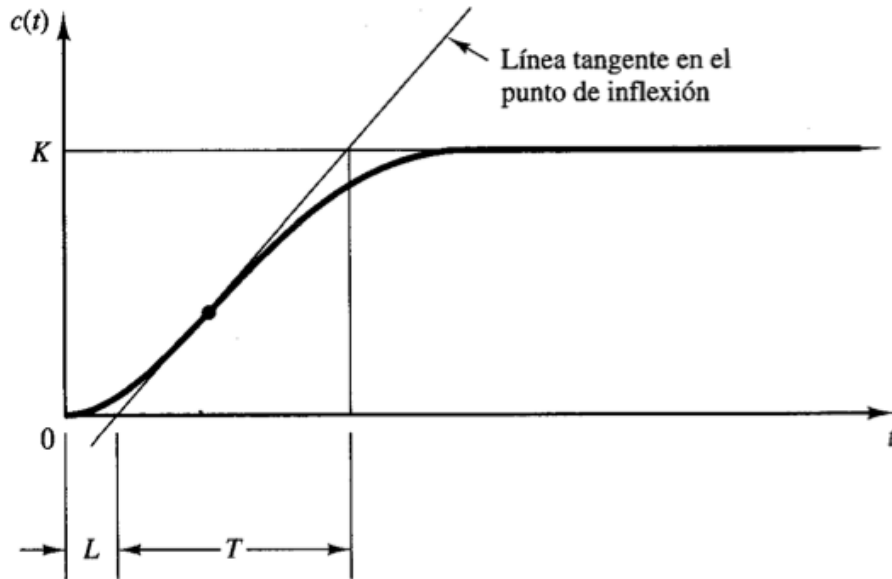


Figura 3-15 Curva de respuesta con forma de S [17]

Una vez obtenidos estos parámetros se utilizan las formulas sugeridas por Ziegler y Nichols para obtener los valores K_p , T_i y T_d . (Tabla 3-1)

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Tabla 3-1 Formulas sugeridas por Ziegler-Nichols para el primer método [17]

- Segundo Método. En este método primero establecemos $T_i = \infty$ y $T_d = 0$, con lo cual solo se usará la acción del control proporcional, después se incrementa K_p de 0 a un valor crítico K_{cr} en donde la salida exhiba primero oscilaciones sostenidas (Figura 3-16). Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar K_p , no se aplica este método (Figura 3-16).

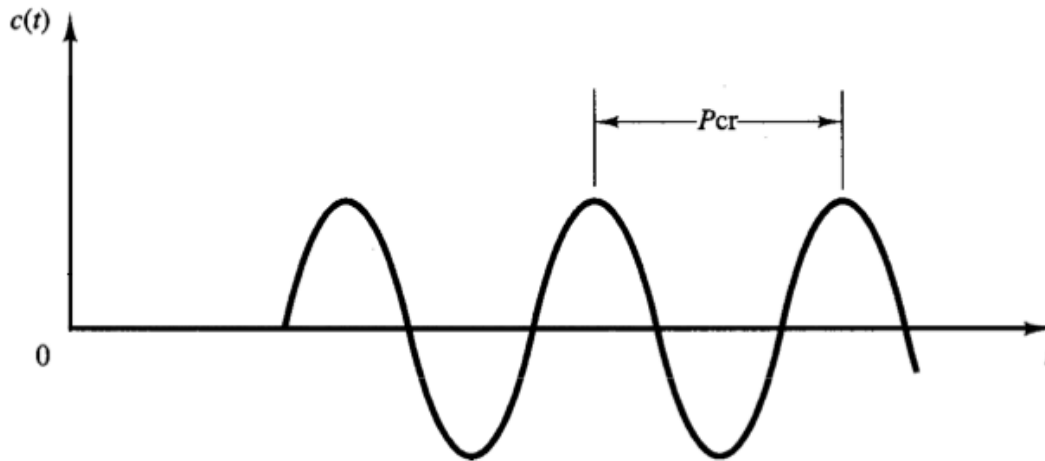


Figura 3-16 Oscilación sostenida con un periodo P_{cr} [17]

Por tanto, la ganancia crítica K_{cr} y el periodo P_{cr} correspondiente se determina experimentalmente, Ziegler y Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros K_p , T_i y T_d de acuerdo con las fórmulas mostradas en la Tabla 3-2. [17]

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Tabla 3-2 Formulas sugeridas por Ziegler-Nichols para el segundo método [17]

3.4.5 Lógica Difusa y Sistemas Difusos

La lógica difusa nace en 1965 cuando Lofti Zadeh publica su artículo “*Fuzzy Sets*” para la revista “*Information and Control*”. En contraste con la lógica tradicional o Aristotélica en la cual solo hay 2 estados “verdadero” o “falso” para referirse a la realidad, la lógica difusa define los conceptos en grados variables de pertenencia, siguiendo patrones de razonamiento similares a los del pensamiento humano, lo cual puede entenderse como la posibilidad de asignar más valores de verdad a los enunciados clásicos de “verdadero” y “falso”, por lo tanto, los sistemas difusos son sistemas basados en conocimientos representados en forma de reglas.

La lógica difusa ha cobrado gran fama debido a la gran variedad de sus aplicaciones, las cuales van desde el control de complejos procesos industriales, hasta el diseño de dispositivos de control de artefactos electrónicos de uso doméstico y entretenimiento, así como también en sistemas de diagnóstico. [19]

3.4.5.1 Conjuntos

Un conjunto clásico se define como una colección de elementos que existen dentro de un universo, donde cada uno de los elementos pertenecen o no a un determinado conjunto, por lo tanto, cada conjunto puede definirse completamente por una función de pertenencia, que opera sobre los elementos del universo, y que le asigna un valor de “1” si el elemento pertenece al conjunto, y de “0” si no pertenece.

Un conjunto difuso se define de forma similar, con la diferencia de que la función de pertenencia de cada elemento puede tener cualquier valor entre el intervalo $[0,1]$, además de que un elemento puede pertenecer al mismo tiempo a más de un conjunto difuso con diferente grado de pertenencia; de aquí que, un conjunto difuso es la generalización de un conjunto clásico. [19] (Figura 3-17)

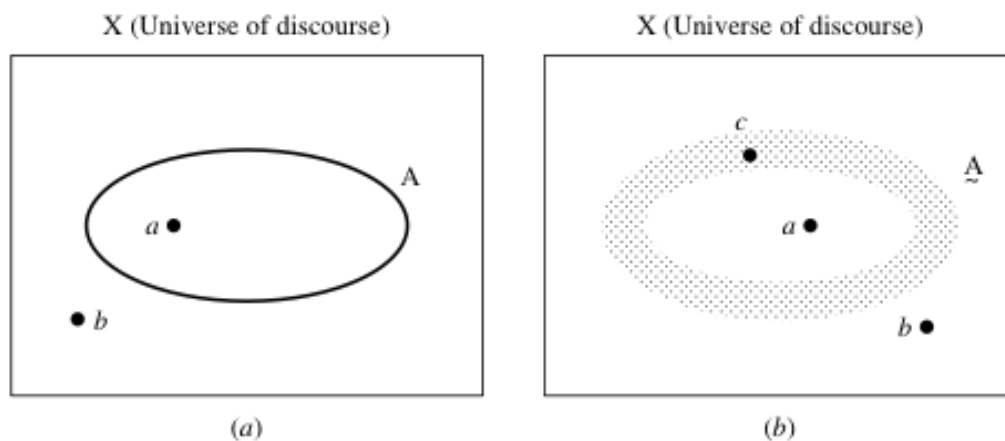


Figura 3-17 a) Conjunto clásico b) Conjunto difuso [20]

Un conjunto difuso A en U puede ser representado como un conjunto de pares ordenados de elementos x , y su grado de pertenencia:

$$A = \{ x, \mu_A(x) \mid x \in U \} \quad \text{Formula 8}$$

Donde U es el universo del discurso continuo (Ej. Todos los números reales $U=R$) [19].

Notación para conjuntos difusos cuando el universo del discurso es discreto:

$$A = \sum \frac{\mu_A(x)}{x} \quad \text{Formula 9}$$

Notación para conjuntos difusos cuando el universo del discurso es continuo:

$$A = \int \frac{\mu_A(x)}{x} \quad \text{Formula 10}$$

Donde la sumatoria no representa una suma aritmética, al igual que la integral no representa integración, sino que denotan la colección de todos los puntos $x \in U$, los cuales tienen asociada una función de pertenencia $\mu_A(x)$ (Figura 3-18).

En ambas notaciones, el numerador es el grado de pertenencia del elemento del conjunto A y el denominador es el elemento del conjunto A . [19,20]

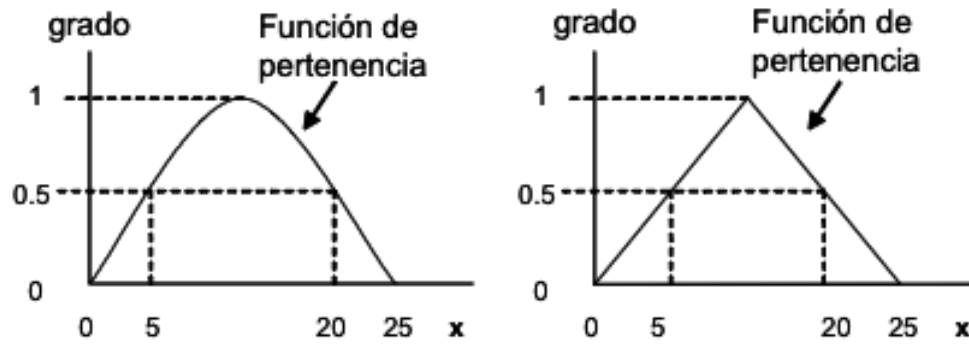


Figura 3-18 Función de pertenencia [19]

En ambas notaciones, el numerador es el grado de pertenencia del elemento del conjunto A y el denominador es el elemento del conjunto A . [19,20]

3.4.5.2 Operadores para conjuntos difusos

Asumimos que A y B son conjuntos difusos definidos en el mismo universo del discurso U .

- Unión (\cup) (Figura 3-19). La unión de A y B es un conjunto difuso en U , denotado por $A \cup B$ cuya función de pertenencia μ está dada por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{MAX} [\mu_A(x) , \mu_B(x)] \quad \text{Formula 11}$$

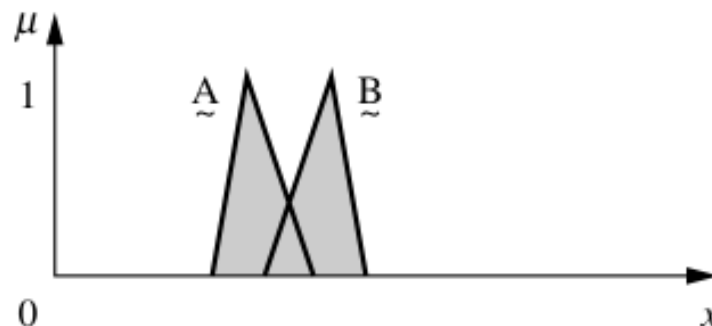


Figura 3-19 Unión de los conjuntos difusos A y B [20]

- Intersección (\cap) (Figura 3-20). La intersección de A y B es un conjunto difuso en U , denotado por $A \cap B$ cuya función de pertenencia μ está dada por:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x) , \mu_B(x)] \quad \text{Formula 12}$$

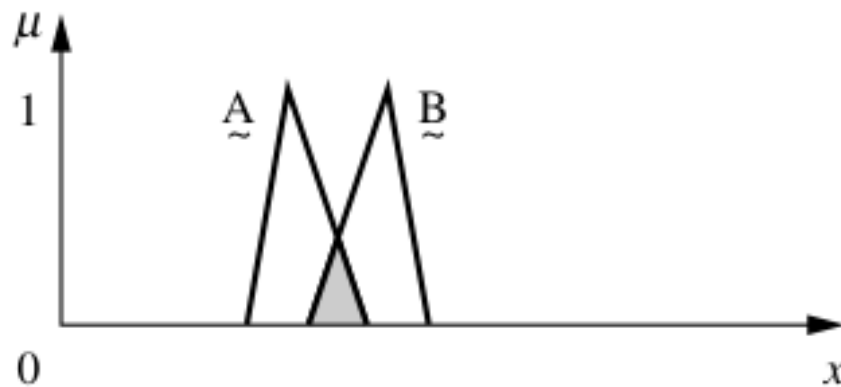


Figura 3-20 Intersección de los conjuntos difusos A y B [20]

- Complemento (\bar{A}) (Figura 3-21). El complemento de A es un conjunto difuso \bar{A} en U , cuya función de pertenencia μ está dada por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \text{Formula 13}$$

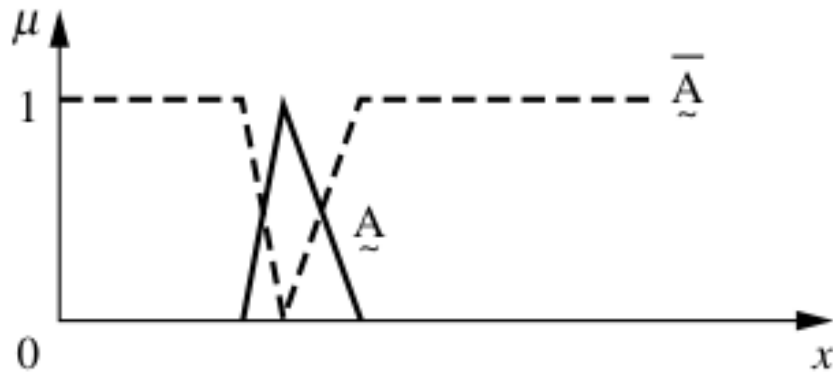


Figura 3-21 Complemento del conjunto difuso A [20]

Las únicas leyes de conjuntos que no cumplen los conjuntos difusos son:

- a) Ley del medio excluido: $A \cup \bar{A} = U$
- b) Ley de la contradicción: $A \cap \bar{A} = \emptyset$ (Figura 3-22)

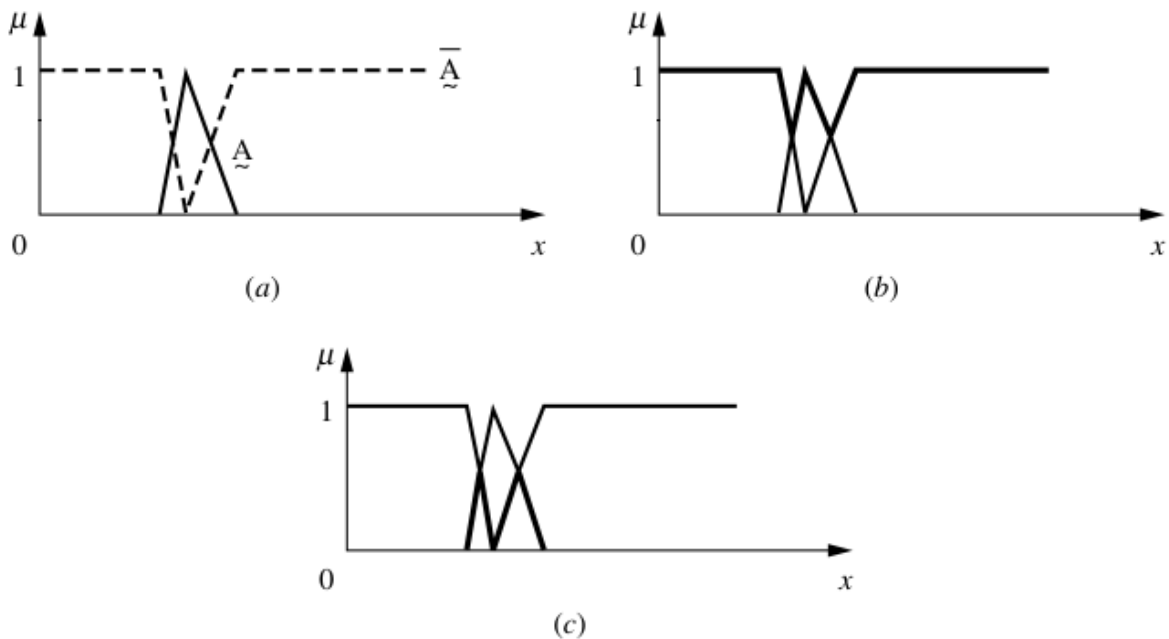


Figura 3-22 a) Conjunto difuso A y su complemento b) Ley del medio excluido

3.4.5.3 Variables lingüísticas

Cuando una variable toma números como sus valores, se tiene un marco de trabajo bien formulado matemáticamente, pero si una variable puede tomar palabras del lenguaje natural como sus valores, esta es llamada “*Variable Lingüística*”, donde las palabras están caracterizadas por conjuntos difusos, definidos en el universo del discurso en la cual la variable está definida.

Una “*Variable Lingüística*” está caracterizada por (X, T, U, M) , donde:

X. Es el nombre de la variable lingüística. (Ej. La temperatura del ambiente)

T. Es el conjunto de valores lingüísticos que X puede tomar (Ej. $T = \{\text{baja, media, alta}\}$)

U. Es el dominio de valores numéricos que puede tomar la variable lingüística X.

(Ej. $U = [0, T_{max}]$)

M. Es una regla semántica que relaciona cada valor lingüístico en T con un conjunto difuso en U

Este concepto es muy importante porque son elementos fundamentales de la representación del conocimiento humano.

3.4.5.4 Sistemas difusos

Ya que los sistemas difusos son sistemas basados en el conocimiento de un experto humano, la parte esencial de un sistema difuso es la base del conocimiento, la cual está conformada por los conjuntos difusos de entrada, reglas Si...Entonces o If...Then y los conjuntos difusos de salida.

Reglas Si...Entonces. La primer parte de esta regla considera premisa(s) o antecedente(s) y puede contener una o varias, referidas a las entradas del sistema, la segunda parte de la regla se denomina la consecuencia y es la acción a ejecutarse, referidas a las salidas del sistema.

SI *premisa* **ENTONCES** *consecuencia*

SI *premisa1 Y premisa2* **ENTONCES** *consecuencia*

Un sistema difuso está construido a partir de un conjunto de reglas difusas, las cuales son obtenidas de expertos humanos, con base en su conocimiento y experiencia. [19]

3.4.5.5 Metodología de diseño de sistemas difusos (Figura 3-23)

1. Identificar las entradas y salidas del sistema difuso
2. Seleccionar el universo del discurso
3. Definir los conjuntos de entrada y salida
4. Escribir las reglas del sistema
5. Optimizar el sistema (Simulación y ajuste)
6. Implementar el sistema

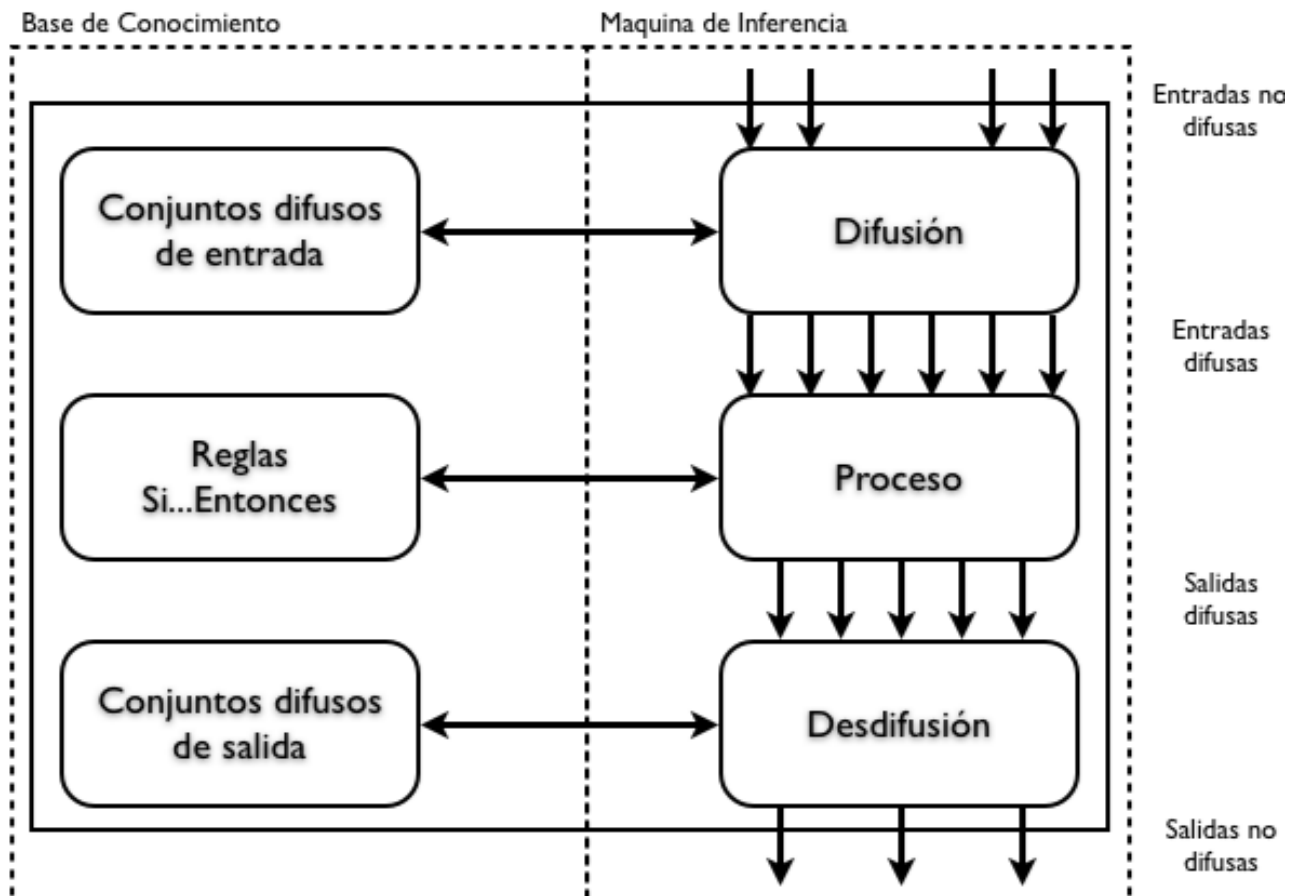


Figura 3-23 Sistema difuso

4. DESARROLLO DEL SISTEMA PROPUESTO

Con base en la experiencia adquirida durante el trabajo desarrollado previamente [6], se identificó que el sistema de electroerosión se puede dividir en 3 principales áreas de investigación:

- Fuente de alimentación
- Propiedades de los materiales utilizados en el proceso
 - o Electrodo
 - o Pieza de trabajo
 - o Fluido dieléctrico
- Control del sistema
 - o Control del proceso
 - o Control de posición del electrodo

4.1 Cambios del primer prototipo y diseño de experimentos del prototipo original

El objeto de estudio del primer prototipo se enfocó en la fuente del sistema de microelectroerosión, por tal motivo, y con la finalidad de continuar la investigación del proceso de micromanufactura por electroerosión, para este trabajo de tesis se decidió trabajar en 2 de las áreas principales:

- Fuente de alimentación. Diseñar un banco de resistencias para modificar la frecuencia máxima del circuito y tener otro parámetro de control
- Control del sistema.
 - o Control del proceso. Desarrollo de un nuevo sistema de control del proceso

- Control de posición del electrodo. Desarrollo de un nuevo mecanismo para el movimiento del electrodo y un nuevo sistema de control de posición.

Por otro lado, se identificó la necesidad de implementar un diseño de experimentos para seguir una metodología durante las mediciones de las pruebas.

4.1.2 Diseño de experimentos

Se elaboró un diseño de experimentos para realizar las pruebas del sistema incluyendo el primer prototipo cuyos resultados se utilizaron para analizar si se presentó una mejora en la eficiencia del sistema. Para el diseño de experimentos se utilizaron las etapas presentadas en el marco teórico (Ver 3.3 Diseño de experimentos)

4.1.2.1 Reconocimiento del problema

El primer prototipo de microelectroerosión no tiene la eficiencia adecuada y se busca mejorar la eficiencia del sistema mejorando la penetración del electrodo en la pieza de trabajo

4.1.2.2 Elección de los factores y niveles

Con base en los resultados que se obtuvieron en las pruebas anteriores, se seleccionó la combinación que removió mayor material

- Dieléctrico. Queroseno
- Materia Prima. Latón
- Electrodo. Cobre

y la que removió menor material

DESARROLLO DEL SISTEMA PROPUESTO

- Dieléctrico. Dieléctrico Comercial
- Materia Prima. Latón
- Electrodo. Cobre

Dado que una de las ventajas en las aplicaciones de la electroerosión es poder maquinar metales de alta dureza, en este diseño de experimentos se eliminará el aluminio utilizado en las pruebas anteriores de las piezas de trabajo y lo sustituiremos por acero inoxidable, con este cambio se definió una tercera combinación con otro fluido dieléctrico.

- Dieléctrico. Aceite
- Materia Prima. Acero inoxidable
- Electrodo. Cobre

Una vez definidas las combinaciones a utilizar se definió un factor al cual se le llamó DPE para representar la combinación del dieléctrico, pieza de trabajo y electrodo utilizado:

Nivel alto DPE1: Dieléctrico (Queroseno), Materia Prima (Latón) y electrodo (Cobre)

Nivel medio DPE2: Dieléctrico (Aceite), Materia Prima (Acero inoxidable) y electrodo (Cobre)

Nivel bajo DPE3: Dieléctrico (Die. comercial), Materia Prima (Latón) y electrodo (Cobre)

El siguiente factor dentro del diseño de experimentos es la frecuencia máxima de maquinado la cual se representará con la letra F, para este factor se definió utilizar 3 valores. En el primer prototipo se tenía una frecuencia máxima de operación de 5[KHz] por tal motivo para los valores de frecuencia máxima se generó un banco de resistencias que nos pueda dar el mismo valor y dos superiores, con lo cual se podría aumentar la tasa de remoción de material:

DESARROLLO DEL SISTEMA PROPUESTO

Nivel bajo F1: 4.901 [KHz] con una resistencia de 10.20 [Ω]

Nivel medio F2: 9.398 [KHz] con una resistencia de 5.32 [Ω]

Nivel alto F3:13.661 [KHz] con una resistencia de 3.66 [Ω]

El último factor dentro del diseño de experimentos fue el voltaje, el cual será representado como V y también se definieron 3 valores, en el prototipo anterior se utilizaron 30 [V], por lo cual se utilizará el mismo valor y 2 valores menores:

Nivel bajo V1: 20 [V]

Nivel medio V2: 25 [V]

Nivel alto V3: 30 [V]

Una vez definidos los niveles de prueba de cada factor (Tabla 4-1) del diseño de experimentos, se elaboró una matriz donde se pueden identificar fácilmente los puntos experimentales que se deben realizar. (Tabla 4-2)

Factor	Unidades Originales			Unidades Codificadas		
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
V	V ₁	V ₂	V ₃	-1	0	1
DPE	DPE ₁	DPE ₂	DPE ₃	-1	0	1
F	F ₁	F ₂	F ₃	-1	0	1

Tabla 4-1 Niveles de prueba para cada factor

	F1						F2						F3					
	DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃		DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃		DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃	
V ₁	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
V ₂	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36

V ₃	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
----------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tabla 4-2 Puntos experimentales o tratamientos propuestos

Para las pruebas se definieron los siguientes valores como constantes

- Duración prueba. 3 [min]
- Diámetro del electrodo. 1[mm]
- Uso de propela para generar flujo del fluido dieléctrico

4.1.2.3 Selección de la variable de respuesta

La finalidad del proceso de microelectroerosión es remover material de la pieza de trabajo, por tal motivo se seleccionó la penetración como variable de respuesta con la cual podremos determinar la eficiencia del proceso

4.1.1 Banco de resistencias

En las pruebas del primer prototipo se observó que el sistema no logró trabajar de manera continua a la frecuencia máxima de la fuente, por tal motivo se diseñó un banco de resistencias el cual permitiera variar el valor de la resistencia del circuito para poder modificar el valor de la frecuencia máxima y utilizarlo como otro parámetro de control en las pruebas.

Para el diseño del banco de resistencias se definieron 3 niveles de operación, por tal motivo sólo se cuenta con 3 valores posibles de resistencia. A continuación, se muestra el circuito implementado para el banco de resistencias (Tabla 4-3)

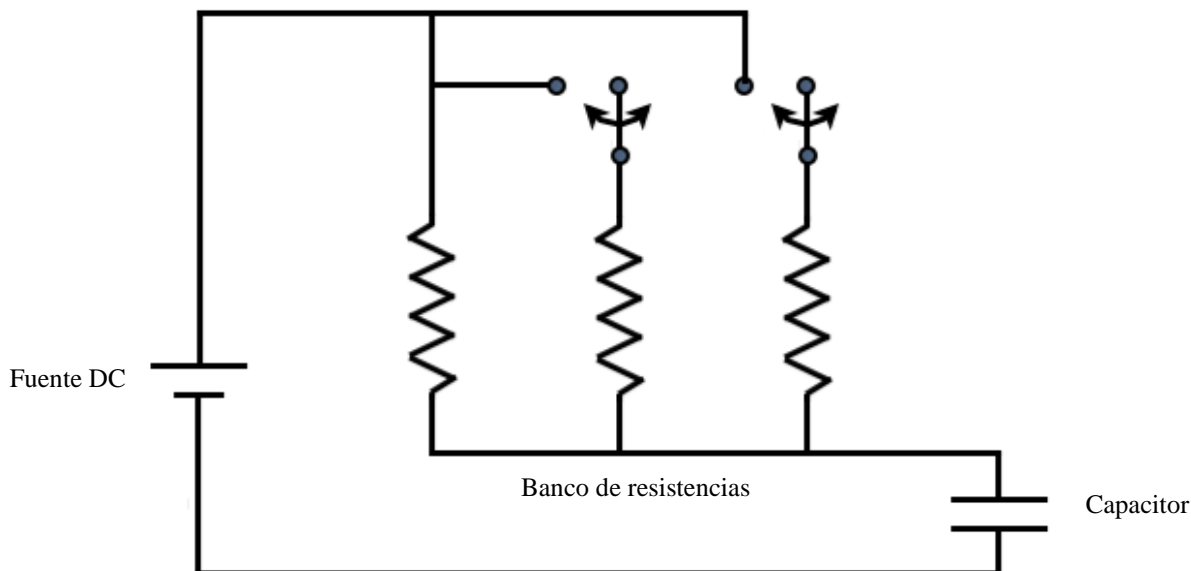


Tabla 4-3 Diagrama del circuito con banco de resistencias

Cada resistencia tiene un valor de $10.2 [\Omega]$, por lo tanto, para calcular los valores de frecuencia máxima para nuestro circuito obtiene primero el tiempo de carga del capacitor:

$$\tau [s] = R [\Omega] * C [F] \quad \text{Formula 14}$$

Donde:

τ = Constante de tiempo del circuito RC

R = Resistencia

C = Capacitancia

Sustituyendo valores

1 resistencia $\approx 10.2[\Omega]$	2 resistencias $\approx 5.32[\Omega]$	3 resistencias $\approx 3.66[\Omega]$
$\tau[s]=10.2[\Omega]*20 \times 10^{-6}[F]=0.204[\text{ms}]$	$\tau[s]=5.32[\Omega]*20 \times 10^{-6}[F]=0.106 [\text{ms}]$	$\tau[s]=3.66[\Omega] *20 \times 10^{-6}[F]=0.0732[\text{ms}]$

Ya que se obtuvo la constante de tiempo es posible calcular la frecuencia máxima teórica de maquinado por medio de la siguiente fórmula:

$$F = \frac{1}{\tau} [Hz]$$

Formula 15

Sustituyendo la constante de tiempo para cada valor de resistencia

una resistencia $\approx 10.2[\Omega]$	dos resistencias $\approx 5.32[\Omega]$	tres resistencias $\approx 3.66[\Omega]$
$F = \frac{1}{0.000204} = 4.901 [KHz]$	$F = \frac{1}{0.0001064} = 9.398 [KHz]$	$F = \frac{1}{0.0000732} = 13.661 [KHz]$

Con esto obtenemos el valor teórico de la frecuencia máxima de maquinado, que se puede obtener para cada valor de resistencia equivalente.

4.1.4 Resultados del diseño de experimentos

La información obtenida al aplicar el diseño de experimentos al sistema propuesto anteriormente servirá como antecedente para comparar los resultados obtenidos en este trabajo de tesis y con esto poder concluir si el nuevo prototipo presenta un incremento en la eficiencia del sistema. El diseño de experimentos consistió en realizar una serie de experimentos en los que se inducen cambios deliberados en las variables del proceso, de manera que es posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida; las variables del proceso que se utilizaron fueron las siguientes:

DPE (Dieléctrico, Materia Prima, Electrodo)

Nivel alto

DPE1: Dieléctrico (Queroseno), Materia Prima (Latón) y electrodo (Cobre)

Nivel medio

DPE2: Dieléctrico (Aceite), Materia Prima (Acero inoxidable) y electrodo (Cobre)

Nivel bajo

DESARROLLO DEL SISTEMA PROPUESTO

DPE3: Dieléctrico (Die. comercial), Materia Prima (Latón) y electrodo (Cobre)

Frecuencia Máxima de Maquinado

Nivel alto

F3: 13.661 [KHz] con una resistencia de 3.66 [Ω]

Nivel medio

F2: 9.398 [KHz] con una resistencia de 5.32 [Ω]

Nivel bajo

F1: 4.901 [KHz] con una resistencia de 10.20 [Ω]

Voltaje

Nivel alto

V3: 30 [V]

Nivel medio

V2: 25 [V]

Nivel bajo

V1: 20 [V]

Con base en esto se realizaron las mediciones y se midió la penetración del electrodo en la pieza de trabajo

	F ₁						F ₂						F ₃					
	DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃		DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃		DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃	
V ₁	0.065	0.084	0.029	0.030	0.511	0.444	0.074	0.052	0.043	0.028	0.847	0.886	0.210	0.168	0.009	0.013	0.749	0.896
V ₂	1.124	1.101	0.068	0.064	1.523	2.126	0.370	0.490	0.058	0.062	0.849	0.713	0.589	0.272	0.041	0.039	0.506	0.487
V ₃	1.840	1.831	0.137	0.148	1.552	1.748	0.441	0.365	0.059	0.067	0.478	0.573	0.047	0.046	0.093	0.119	0.589	0.534

Tabla 4-4 Puntos experimentales o tratamientos resultados [mm]

Máxima penetración

- Penetración = 2.126 [mm]
 - o F₁: 4.901 [KHz] con una resistencia de 10.20 [Ω]
 - o DPE₃: Dieléctrico (Die. comercial), Materia Prima (Latón) y electrodo (Cobre)
 - o V₂: 25 [V]

Mínima penetración

- Penetración = 0.009 [mm]
 - o F₃: 13.661 [KHz] con una resistencia de 3.66 [Ω]
 - o DPE₂: Dieléctrico (Aceite), Materia Prima (Acero inoxidable) y electrodo (Cobre)
 - o V₁: 20 [V]

4.2 Requerimientos del sistema

Para el desarrollo del sistema propuesto se consideraron los siguientes requerimientos:

- Desarrollar un nuevo sistema de posicionamiento para el electrodo con desplazamiento lineal, capaz de ser utilizado en el primer prototipo.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en el diseño de experimentos se identificó que la mínima penetración fue de 9 [μm] la cual en el peor escenario sería por la devastación generada durante el primer ciclo de chispas sin lograr una penetración mayor, por tal motivo se requiere un actuador que tenga una resolución menor a este valor lo cual permitiría tener desplazamientos menores a esta penetración considerando el peor escenario.
- Implementar un sistema de control para el proceso de microelectroerosión.
- Desarrollar una interfaz gráfica que permita controlar el proceso de microelectroerosión.

4.3 Selección del actuador para sistema de posicionamiento para el electrodo

Se buscaron actuadores en el mercado que cumplieran con las especificaciones. En la tabla 4-5 se muestran los actuadores evaluados para la aplicación

Número de Catalogo	T2-7A	M-231.17	M-231.17S	SQL-3.4
Marca	Ray Allen Co., Inc	Physik Instrument	Physik Instrument	New Scale Technologies
Tipo de actuador	Servomotor	Motor DC	Motor a pasos	Piezoeléctrico
Carrera [mm]	17	17	17	20
Resolución [μm]	No Especificada	0.1	0.1	0.5
Temperatura de funcionamiento [C]	No Especificada	-20 a 65	-20 a 65	-30 a 80
Peso [g]	113	170	170	1.2
Alimentación [V] dc	12	12	24	5
Velocidad [mm/s]	No Especificada	1.5	1	4
Longitud [mm]	69.9	134	134	11

Tabla 4-5 Actuadores evaluados para la aplicación.

Para realizar la selección del actuador se definieron cinco especificaciones y se les asignó una ponderación de acuerdo con el impacto en el sistema con base en la experiencia de las pruebas del primer prototipo

- Con impacto en el proceso de microelectroerosión
 - o Resolución 40%
 - o Velocidad 30%
 - o Carrera 20%

- Con impacto en el mecanismo para controlar la posición del electrodo

DESARROLLO DEL SISTEMA PROPUESTO

- Longitud 5%
- Peso 5%

Con base en las ponderaciones definidas se analizaron las especificaciones de los actuadores para seleccionar el actuador a utilizar en el sistema:

- Resolución. Piezoeléctrico con menor resolución que los otros actuadores, pero permite movimientos equivalentes al 6% de la penetración mínima medida en los resultados del diseño de experimentos (Tabla 4-4)
- Velocidad. Piezoeléctrico con mejor velocidad con lo cual se puede mejorar la velocidad del proceso y por consecuencia la tasa de remoción del material
- Carrera. Piezoeléctrico con mayor rango de recorrido lo cual permite trabajar con piezas de mayor espesor
- Longitud. Piezoeléctrico con menor longitud lo cual facilita el diseño del mecanismo para controlar la posición del electrodo
- Peso. Piezoeléctrico con menor peso lo cual facilita el diseño de sujeción del actuador

Especificación	Ponderación	Moto DC	Motor a pasos	Piezoeléctrico
Resolución	40%	1	1	0
Velocidad	30%	0	0	1
Carrera	20%	0	0	1
Longitud	5%	0	0	1
Peso	5%	0	0	1
TOTAL		40%	40%	60%

Como resultado del análisis se determinó el uso del actuador piezoeléctrico

4.3.1 Motor Piezoeléctrico

De acuerdo al análisis para la selección del actuador se determinó utilizar un motor piezoeléctrico (Figura 4-1), el funcionamiento consiste en varios actuadores piezoeléctricos de cerámica unidos a una tuerca, con un tornillo acoplado en su interior, cuando se aplica energía en los actuadores se producen vibraciones ultrasónicas, por lo tanto, también generamos vibraciones ultrasónicas en la tuerca, y debido a estas vibraciones ultrasónicas se produce una fricción entre la cuerda del tornillo y la rosca de la cuerda, con lo cual se mueve al tornillo a través de la tuerca, generando directamente el movimiento rotatorio y movimiento lineal.



Figura 4-1 Motor Piezoeléctrico SQL-3.4 [21]

Características del motor piezoeléctrico:

- Menor pérdida de energía
- Cero juego mecánico
- Muy alta rigidez
- Resolución nanométrica y gran fuerza
- Mantiene la posición al apagarlo [22].

4.4 Selección del controlador para el actuador del sistema de posicionamiento para el electrodo

Al revisar las características del actuador seleccionado se encontró que el fabricante cuenta con un controlador para este motor (MC-1100); al analizar sus especificaciones, se encontró que el controlador cuenta con:

- Conexión a la computadora por medio de conexión USB
- Entrada para sensor de posición
- Control en lazo abierto o en lazo cerrado
- Software para controlar el motor y el sensor

Debido a las funciones del controlador y ser el recomendado para controlar el motor piezoeléctrico, se optó por utilizarlo para realizar el control del motor (Figura 4-2).



Figura 4-2 Controlador para el motor MC-1100[21]

4.5 Selección del sensor para sistema de posicionamiento para el electrodo

Con la finalidad de obtener el máximo desempeño del actuador se desarrolló un sistema de control en lazo cerrado, por lo que fue necesario integrar un sensor de desplazamiento al sistema. Como se mencionó anteriormente el controlador seleccionado está preparado para la entrada de un sensor de posición; al analizar las características del sensor propuesto por el

fabricante, se identificó que es adecuado para el actuador seleccionado; por otro lado, a diferencia de un motor de DC que tiene el encoder acoplado en la flecha, este sensor es externo y nos brinda la flexibilidad de poder montarlo directamente sobre el mecanismo que sostenga al electrodo. Con esto es posible reducir errores en la lectura de la posición del electrodo generados por el mecanismo que se vaya a utilizar, con base en lo mencionado anteriormente se determinó utilizar el sensor de posición NSE-5310.

El sensor consiste en un arreglo lineal de 8 sensores de efecto Hall integrado en un chip, los cuales miden la variación del campo magnético producida al mover un un encoder magnético de tipo lineal.

El campo magnético genera señales sinusoidales internas desfasadas 90 grados, las cuales son filtradas y transformadas en magnitudes que representan la posición, la información de la posición deber ser leída por medio de una interfaz I²C. En la figura 4-3 se muestra el arreglo del sensor de posición (Figura 4-3).

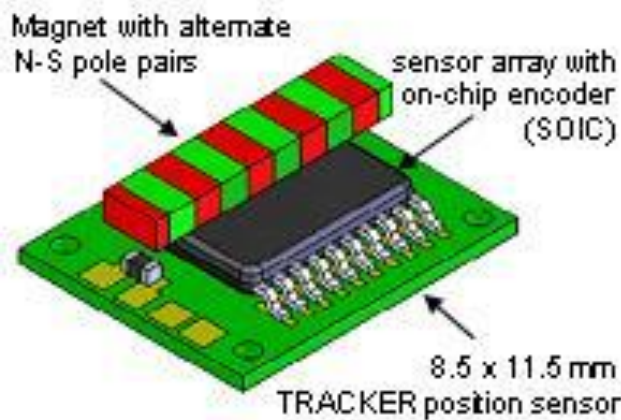


Figura 4-3 Sensor de posición NSE-5310[23]

4.6 Mecanismo para sistema de posicionamiento

Una vez seleccionados los dispositivos que se utilizaron para el sistema de posicionamiento del electrodo, fue necesario diseñar un mecanismo que pueda ser utilizado con el primer prototipo, para cumplir con los requerimientos del sistema.

Para aprovechar la resolución del actuador seleccionado, se propuso diseñar un mecanismo donde se minimizara el efecto de juego mecánico, para tener un control más preciso de la posición; por esta razón, y para aprovechar que el actuador tiene desplazamiento lineal, se pensó en hacer un mecanismo lo más simple posible donde la flecha del motor actuara directamente sobre la pieza que sujeta al electrodo, dado que el movimiento del electrodo es un movimiento vertical, surgió la necesidad agregar un dispositivo para que el elemento móvil del actuador siempre estuviera en contacto con el elemento que desplaza al electrodo. Con base en esta necesidad, se pensó en hacer algo similar al amortiguador de un carro, el cual tiene como una de sus funciones hacer que las ruedas se mantengan en contacto con el suelo.

Un punto importante durante el proceso de electroerosión, así como en el proceso de fresado es evitar variaciones en la perpendicularidad entre la herramienta y la pieza de trabajo durante el maquinado; para mantener el sistema alineado se pensó en poner dos guías en el dispositivo que sujetara el porta electrodo.

A continuación, se explicarán cada una de las partes que conforman al mecanismo propuesto

- Base. Es la pieza principal ya que en ella se colocan 2 barras gorton que se utilizan como guías para permitir el movimiento lineal al porta electrodo, aparte de que se utiliza como soporte para las otras piezas, como son el sensor de posición, porta-motor, conector del motor, etc (Figura 4-5).

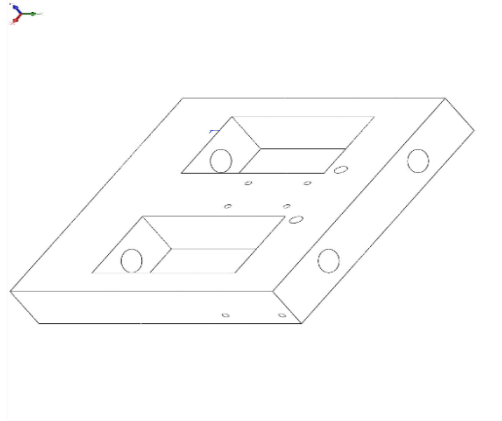


Figura 4-5 Base

- Pieza en U. La llamamos U debido a su forma, esta pieza se utiliza para colocar el porta-electrodos y el encoder magnético que se utiliza como parte del arreglo del sensor de posición. En esta pieza se colocan también los rodamientos lineales que permiten el desplazamiento del portaelectrodos. (Figura 4-6)

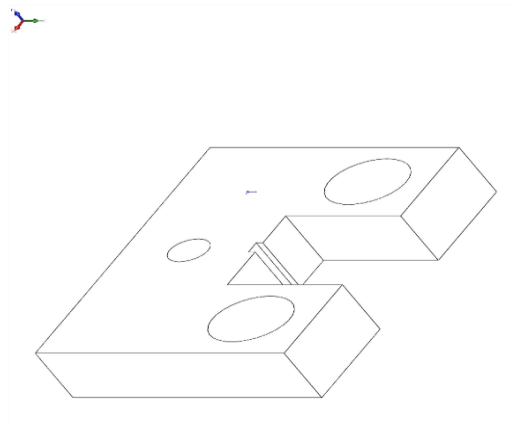


Figura 4-6 U

- Soporte del actuador. Esta pieza es la que sostiene al actuador por encima de la U y debe estar colocada lo más cerca posible ésta, ya que el tornillo del motor piezoeléctrico hace contacto directamente sobre ella y mientras más alejado este se disminuye la carrera del sistema. Se tiene que garantizar que la U y el soporte del motor estén colocados

paralelamente para no tener cargas axiales en el tornillo del motor y evitar un posible dañarlo (Figura 4-6 y Figura 4-7).

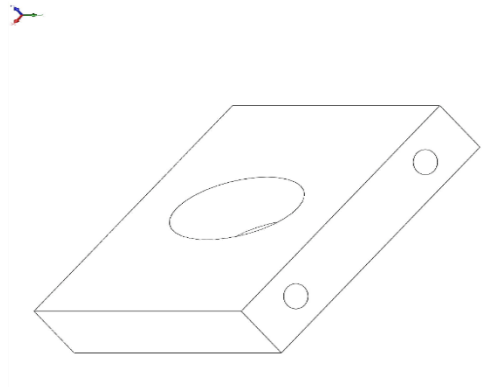


Figura 4-7 Soporte del motor

- Resortes. Se utilizaron dos resortes los cuales van colocados en las barras gorton, un extremo del resorte hace contacto con la base, mientras que el otro extremo está en contacto con el rodamiento lineal. (Figura 4-8)

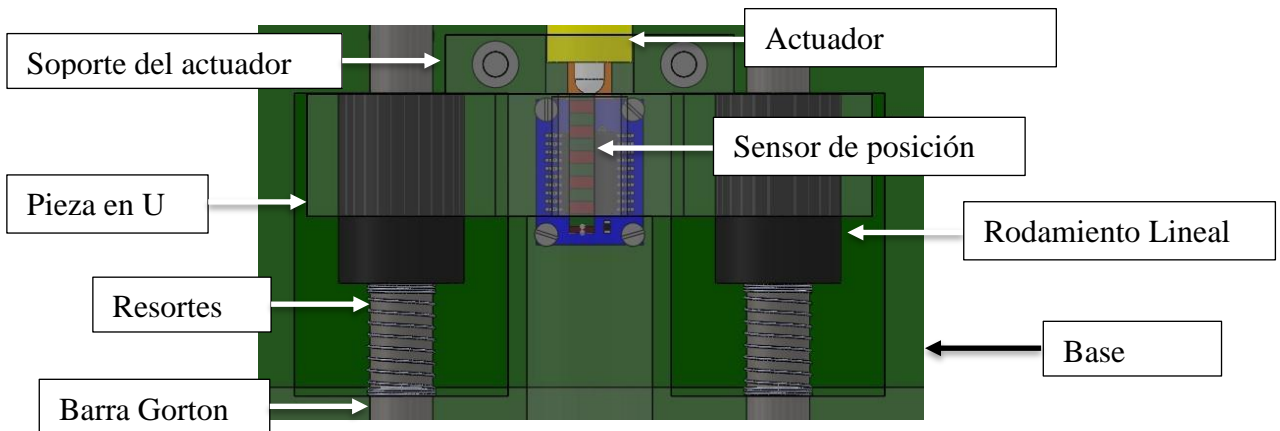


Figura 4-8 Resortes

La función de estos resortes es garantizar que la U siempre esté en contacto con la flecha del actuador piezoeléctrico y así tener un movimiento lineal, mitigando el efecto de juego mecánico. Es importante mencionar que no se realizó el cálculo de la constante del resorte ya que el proveedor de resortes los hace tomando como patrón algún otro

resorte (Ej. El de una pluma), por lo cual la selección de estos resortes se hizo a prueba y error.

- Soporte MC-1100. La función de este soporte es la de sujetar al controlador del actuador (MC-1100), y se localiza en la parte posterior del mecanismo para facilitar la conexión del actuador y del sensor de posición, el cual está colocado entre la base y la U (Figura 4-9).

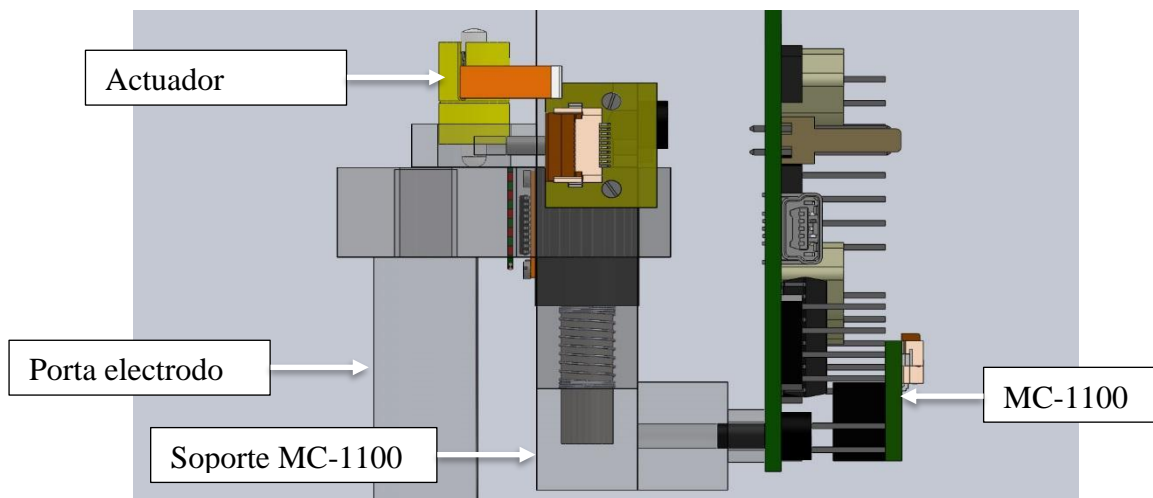


Figura 4-9 Soporte MC-1100

- Porta electrodo. Esta pieza tiene como objetivo sostener el electrodo que se utilizará durante el proceso de micro manufactura por electroerosión, por medio de un tornillo que funciona como prisionero, este tornillo también se utiliza para realizar la conexión entre la fuente y el electrodo. Esta pieza tiene la peculiaridad de que se coloca atornillándola a la U, se diseñó de esta manera para facilitar el montaje / desmontaje de la pieza. (Figura 4-10)

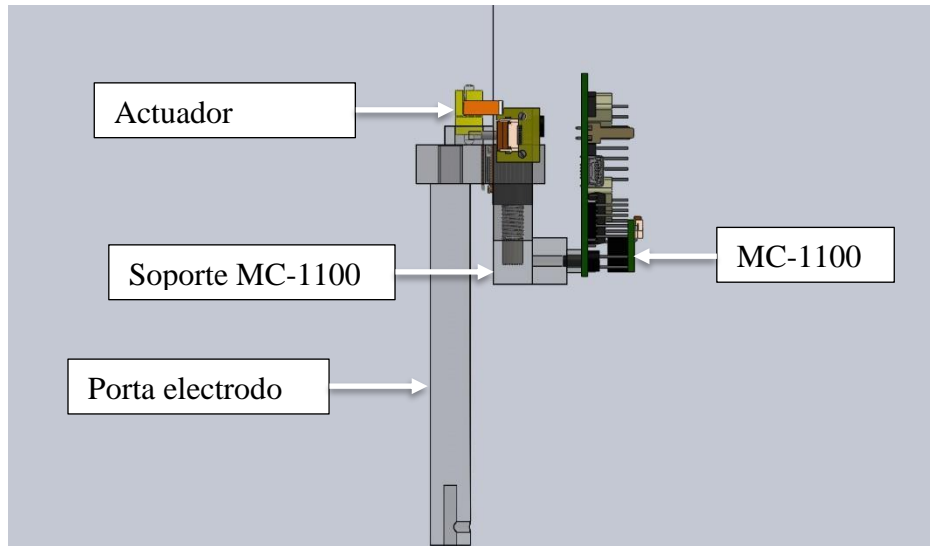


Figura 4-10 Porta-electrodo

A continuación, se muestra el mecanismo propuesto, para ver los planos revisar A.IV Planos (Figura 4-11)

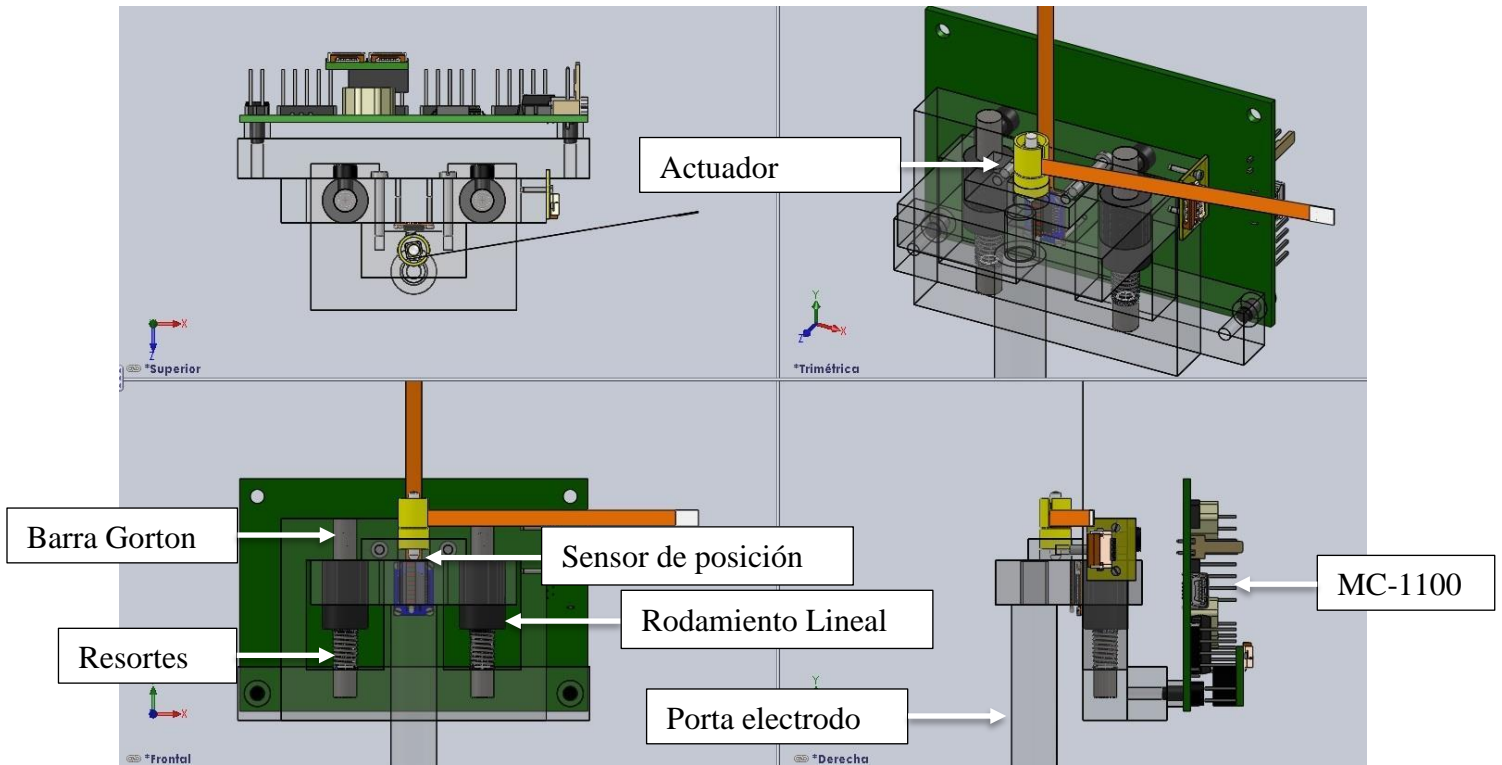


Figura 4-11 Mecanismo

4.7 Controlador del actuador

Como se mencionó anteriormente el controlador MC-1100 incluye un software (*New Scale Pathway*), el cual se utilizó para hacer las pruebas con las que se encontraron los resortes adecuados para el mecanismo, este software fue de gran ayuda para realizar las primeras pruebas y el funcionamiento del mecanismo, aparte de que permitió familiarizarse con todas las funciones que se pueden hacer; entre estas funciones está el control del actuador en lazo abierto o cerrado.

4.8 Sintonización del motor piezoeléctrico

Una vez que se terminó de construir y ensamblar el mecanismo se utilizó el software del controlador MC-1100 para poder realizar la sintonización del motor piezoeléctrico. Para aprovechar todas las características del controlador del motor se utilizó un control PID; ya que no se contaba con un modelo matemático de la planta se decidió utilizar las reglas de Ziegler-Nichols para obtener las constantes K_p , K_i y K_d , con el método de respuesta al escalón unitario.

Para realizar las mediciones de la respuesta al escalón unitario se utilizó el sensor de posición instalado en el mecanismo y por medio del software del controlador del motor se elaboró una gráfica de la posición como respuesta a un escalón unitario (Figura 4-12).

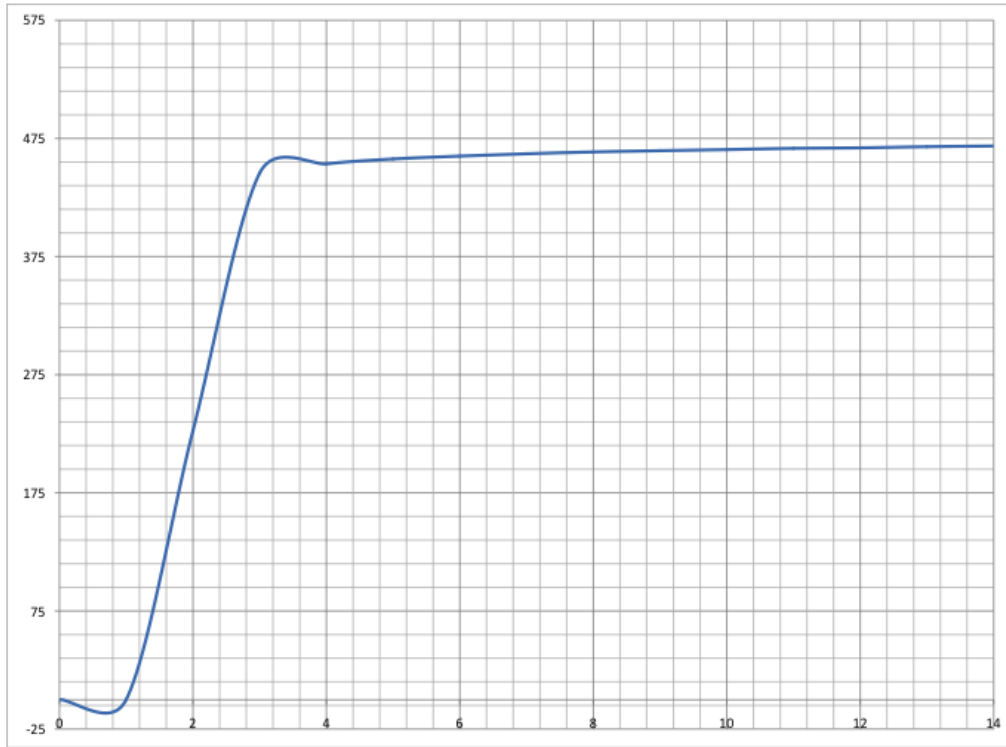


Figura 4-12 Respuesta al escalón unitario

Una vez que se obtuvo la gráfica se determinaron los parámetros L y T como lo indica el método (Figura 3-15), para así obtener K_p , K_i y K_d .

Con base en la gráfica se obtuvo:

$$L = 0.1 \text{ [s]}$$

$$T = 0.21 \text{ [s]}$$

Y utilizando las fórmulas de la Tabla 3-1 se obtuvieron los siguientes valores:

$$K_p = 1.2 \left(\frac{T}{L} \right) = 1.2 \left(\frac{0.21}{0.1} \right) = 2.52 \quad \text{Formula 16}$$

$$T_i = 2 L = 2 \cdot (0.1) = 0.2 \quad \text{Formula 17}$$

$$T_d = 0.5 L = 0.5 \cdot (0.1) = 0.05 \quad \text{Formula 18}$$

Una vez que se obtuvieron T_i y T_d se utilizaron las siguientes fórmulas para obtener K_i y K_d .

$$K_i = \left(\frac{K_p}{T_i} \right) ; K_d = K_p \cdot T_d \quad \text{Formula 19}$$

Por lo tanto:

$$K_i = \frac{2.52}{0.2} = 12.6 \quad \text{Formula 20}$$

$$K_d = 2.52 \cdot 0.05 = 0.126 \quad \text{Formula 21}$$

Estos fueron los valores de las constantes que se utilizaron en el sistema control del actuador piezoeléctrico.

4.9 Control del Proceso

Como se mencionó al inicio del capítulo, se desarrolló el control del sistema, pero para poder empezar a trabajar en él, fue necesario primero cumplir con el requerimiento que debía tener un sistema de posicionamiento para el electrodo con desplazamiento lineal y alcanzar una resolución menor a 9 [μm]. Para esto se desarrollo un nuevo sistema de posicionamiento lineal explicado en la sección 4.6 el cual contaba con un sensor con resolución de 0.5 [μm] y un motor

piezoeléctrico seleccionado con base al análisis revisado en la sección 4.3. Una vez desarrollado este nuevo sistema de posicionamiento que cumplía con los requisitos definidos para el sistema fue posible comenzar a trabajar en el control del proceso al tenerse la planta del sistema completamente definida.

Debido a la gran influencia que tiene el espacio entre nuestra pieza de trabajo y nuestro electrodo durante el proceso de micro manufactura por electroerosión, una de las tareas más importante para tener un proceso estable y óptimo, es tener un buen sistema de control de dicho *GAP*.

4.9.1 Dificultades para controlar el sistema y selección de método de control

A continuación, se describen tres de las más grandes complicaciones para realizar este sistema de control.

1. La generación de un modelo matemático, para analizar el sistema.
2. Debido a que se trata de un proceso de micromanufactura en el cual los voltajes de operación bajos (entre 20[V] y 30[V]), en comparación con otras máquinas de micromanufactura reportadas en la literatura (entre 60[V] y 120[V]), esto provoca que el *GAP* óptimo sea de menores dimensiones, por lo tanto, es más difícil controlarlo ya que es más fácil que se presente una condición de arco o corto, debido a la viruta y/o al pequeño espacio que se tiene entre la pieza de trabajo y el electrodo.
3. La medición del *GAP* es compleja, debido a que sus dimensiones son del orden de micrómetros, y conforme se maquina, el electrodo va penetrando la pieza de trabajo, lo cual dificulta su medición.

Debido a la complejidad del sistema se decidió implementar un sistema de control difuso, el cual se diseñó usando la metodología propuesta en el marco teórico.

4.9.2 Identificación de las entradas y salidas del control difuso

Como se mencionó anteriormente, la medición del *GAP* resulta muy complicada, por tal motivo, se seleccionó como variable de control la frecuencia de las descargas presentes durante el proceso de micro maquinado por electroerosión. La razón principal de haber seleccionado la frecuencia es que es uno de los parámetros principales para evaluar la eficiencia del proceso.

Por otra parte, se determinó usar la derivada de la frecuencia, como una segunda entrada a nuestro sistema de control difuso. La razón de utilizar la derivada como una segunda entrada es porque la derivada nos proporciona información de la razón de cambio de la frecuencia con respecto al tiempo, y esto nos ayuda a predecir el comportamiento del sistema y, por lo tanto, corregirlo.

Una vez que se determinó cuáles serían las entradas a nuestro control difuso se procedió a definir la salida de nuestro control, siendo esta la posición del electrodo ya que al controlar la posición del electrodo podemos incrementar o disminuir el *GAP*, y con esto eliminar condiciones de corto circuito o arco y con esto optimizar el proceso de micromanufactura por electroerosión.

4.9.2.1 Procesamiento y acoplamiento de las señales

Una vez definidas las entradas necesarias para el control difuso, se procedió a diseñar un circuito eléctrico para hacer el procesamiento y acoplamiento de estas, para poder utilizarlas en el microcontrolador seleccionado para realizar el control (Figura 4-13).

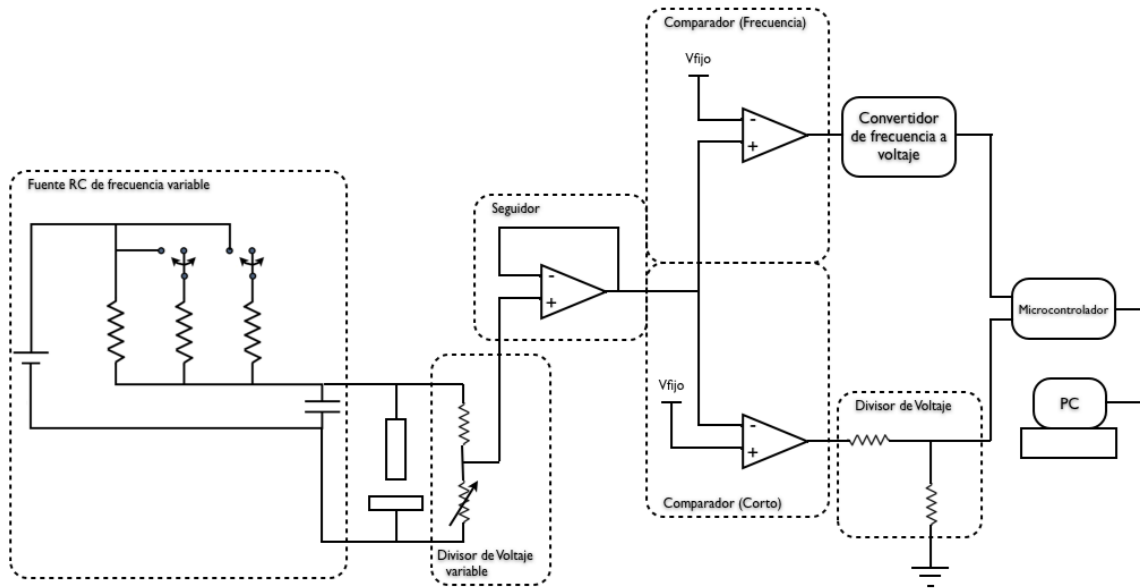


Figura 4-13 Circuito para el procesamiento y acoplamiento de las señales

Como puede observarse en la figura 4-13, el circuito eléctrico está conformado por los siguientes subsistemas:

- Divisor de voltaje variable. Consiste en una resistencia y un potenciómetro conectados en serie y a su vez conectados al electrodo y a la pieza de trabajo, por medio del cual podemos realizar la medición del voltaje del GAP (V_{gap}), para detectar las variaciones que se presentan al momento de ocurrir una descarga. Se utilizó un potenciómetro para poder aumentar o disminuir este voltaje.
- Seguidor. Como podemos ver en la Figura 4-13 la medición del V_{gap} se realiza entre la resistencia y el potenciómetro. Con la finalidad de proteger el circuito, y realizar un acoplamiento de impedancias entre ambas partes del circuito, se utilizó un amplificador operacional en su configuración de seguidor.
- Comparador (frecuencia). A la salida del seguidor tenemos otro amplificador operacional en su configuración de comparador, cuyas entradas son el V_{gap} y un voltaje

fijo contra el que compararemos el V_{gap} . El voltaje fijo se establece por debajo del V_{gap} , para así identificar cuándo se presenta una descarga; al tener una disminución en el V_{gap} , la salida de este comparador nos dará un pulso, con el que se puede obtener la frecuencia de maquinado.

- Convertidor de frecuencia a voltaje. A la entrada de este circuito tenemos el tren de pulsos generado por el comparador (frecuencia), y la función de este circuito es convertir el tren de pulsos en un voltaje equivalente al valor de la frecuencia de maquinado. Este circuito está calculado para tener una salida de 0[V] a 5[V], donde 5[V] equivalen a la frecuencia máxima de operación que es de 13.661[KHz].
- Comparador (corto). Al igual que en el comparador pasado se realizará una comparación entre el V_{gap} y un voltaje fijo, siendo este último diferente al del comparador anterior. El voltaje fijo de este comparador debe tener un valor menor al voltaje fijo del comparador pasado, ya que en este comparador se quiere detectar la presencia de corto o arco, lo que representa una caída mayor de voltaje en comparación con una chispa. La salida de este comparador nos dará una señal digital "1" ó "0".
- Divisor de voltaje. El divisor de voltaje tiene como función disminuir el voltaje de salida del comparador (corto) de 10[V] a 5[V], para así tener un voltaje TTL el cual puede ser utilizado directamente a la entrada del microcontrolador.
- Microcontrolador. Se utilizan dos entradas del microcontrolador, una de ellas es una entrada digital para monitorear la presencia de un arco o corto durante el maquinado. La segunda entrada, es una entrada analógica con la cual medimos el voltaje equivalente a la frecuencia aproximada de operación, para después internamente convertirlo en el valor de la frecuencia.

El circuito completo, así como los valores de los componentes utilizados se pueden consultar en el apéndice C.

4.9.3 Universo del discurso y conjuntos difusos

Para las señales de entrada se fijaron cinco funciones de pertenencia y para la señal de salida se fijaron siete funciones de pertenencia. A continuación, se muestran las variables lingüísticas asociadas a cada función de pertenencia (tabla 4-6).

Frecuencia (F)	Derivada de la frecuencia (dF)	Desplazamiento del electrodo (desp)
Muy baja	Grande negativa	Grande negativo
Baja	Pequeña negativa	Mediano negativo
Media	Cero	Pequeño negativo
Alta	Pequeña positiva	Cero
Optima	Grande positiva	Pequeño positivo
		Mediano positivo
		Grande positivo

Tabla 4-6 variables lingüísticas asociadas a cada función de pertenencia

Es importante aclarar que el desplazamiento positivo en el sistema es un movimiento vertical descendente; por otro lado, cuando se tiene una derivada negativa implica una disminución en la frecuencia de chispa y las derivadas positivas un aumento en la frecuencia de chispa.

- Entradas. Para la frecuencia de chispa se definieron las siguientes funciones de pertenencia, acotadas en el intervalo [0 100] representando el porcentaje de la frecuencia máxima. (Figura 4-14).

- Frecuencia muy baja. Definida para valores de frecuencia de chispa por debajo del 60% de la frecuencia máxima de chispa del sistema
- Frecuencia baja. Definida para valores de frecuencia de chispa entre 50% y 75% de la frecuencia máxima de chispa del sistema
- Frecuencia media. Definida para valores de frecuencia de chispa entre 65% y 85% de la frecuencia máxima de chispa del sistema
- Frecuencia alta. Definida para valores de frecuencia de chispa entre 80% y 95% de la frecuencia máxima de chispa del sistema
- Frecuencia optima. Definida para valores de frecuencia de chispa entre 90% y 100% de la frecuencia máxima de chispa del sistema

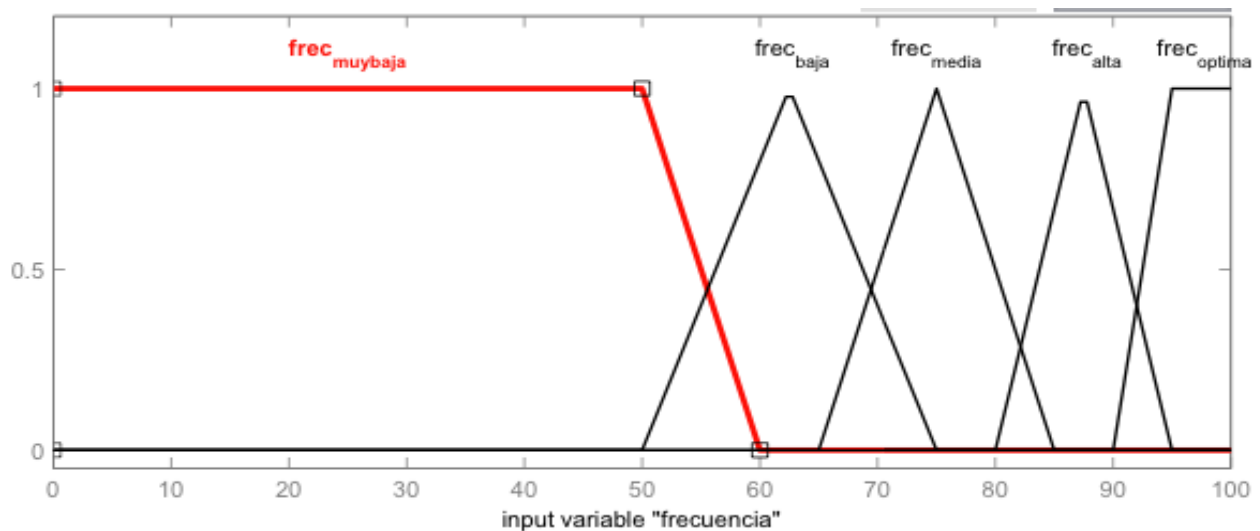


Figura 4-14 Conjuntos difusos para la frecuencia

Para la derivada de la frecuencia se definieron las siguientes funciones de pertenencia, acotadas en el intervalo $[-100\ 100]$ (Figura 4-15).

- Derivada de la frecuencia grande negativa. Definida para valores de derivada de la frecuencia de chispa entre -100 y -50
- Derivada de la frecuencia pequeña negativa. Definida para valores de derivada de la frecuencia de chispa entre -70 y -10

- Derivada de la frecuencia cero. Definida para valores de derivada de la frecuencia de chispa entre -25 y 25
- Derivada de la frecuencia pequeña positiva. Definida para valores de derivada de la frecuencia de chispa entre 10 y 70
- Derivada de la frecuencia grande positiva. Definida para valores de derivada de la frecuencia de chispa entre 50 y 100

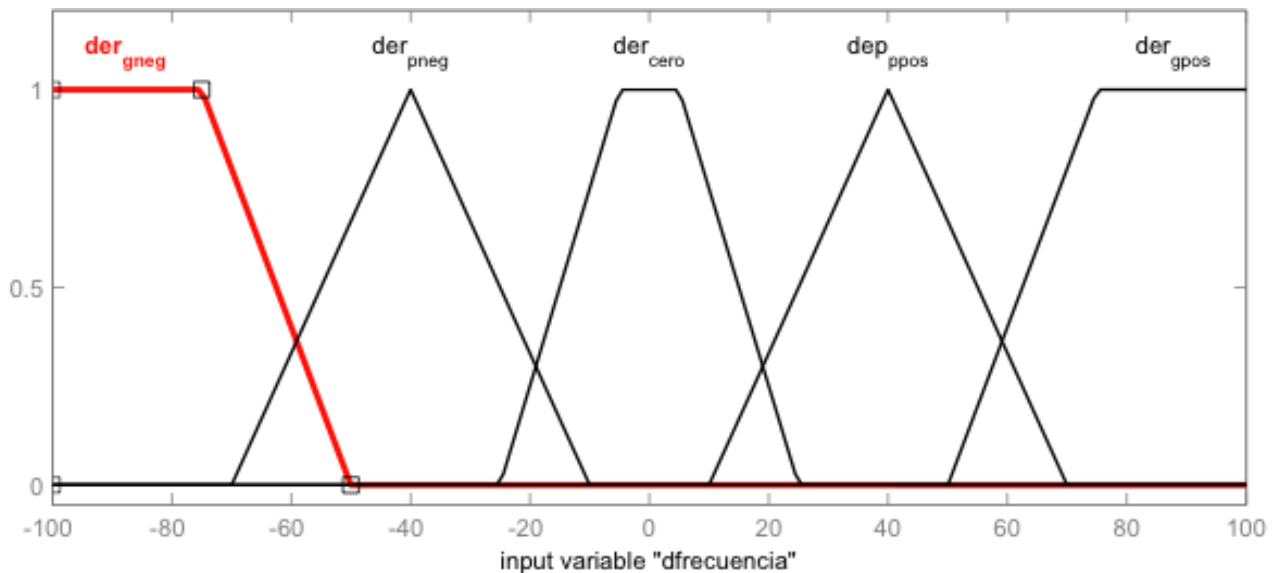


Figura 4-15 Conjuntos difusos para la derivada de la frecuencia

- Salida. Para el desplazamiento del electrodo se definieron las siguientes funciones de pertenencia, acotadas en el intervalo $[-2 \ 8]$ y sus unidades son $[\mu\text{m}]$ (Figura 4-16)
 - Desplazamiento grande negativo. Definida para valores de desplazamiento entre $-2 [\mu\text{m}]$ y $-1 [\mu\text{m}]$
 - Desplazamiento mediano negativo. Definida para valores de desplazamiento entre $-1.5 [\mu\text{m}]$ y $-0.5 [\mu\text{m}]$
 - Desplazamiento pequeño negativo. Definida para valores de desplazamiento entre $-1 [\mu\text{m}]$ y $0 [\mu\text{m}]$

- Desplazamiento cero. Definida para valores de desplazamiento entre -0.75 [μm] y 0.75 [μm]
- Desplazamiento pequeño positivo. Definida para valores de desplazamiento entre 0.5 [μm] y 1.5 [μm]
- Desplazamiento mediano positivo. Definida para valores de desplazamiento entre 1 [μm] y 5 [μm]
- Desplazamiento grande positivo. Definida para valores de desplazamiento entre 4 [μm] y 8 [μm]

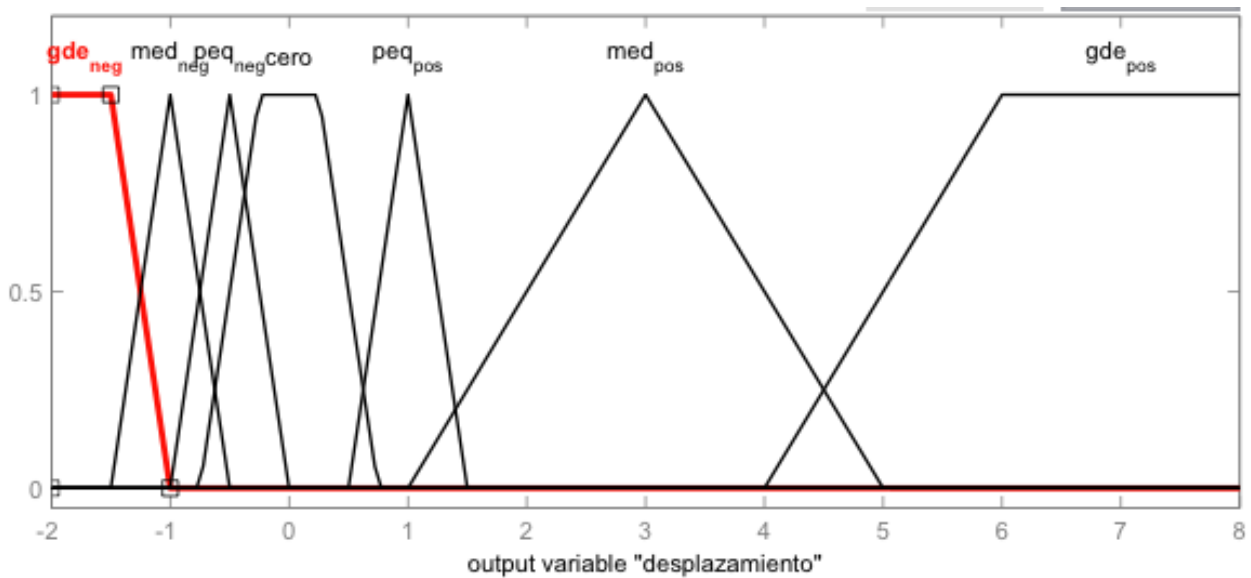


Figura 4-16 Conjuntos difusos para el desplazamiento de el electrodo

4.9.4 Reglas del sistema difuso

Una vez definidas las funciones de pertenencia de las entradas y la salida, se procedió a definir las reglas SI...ENTONCES, para así tener completa la base de conocimiento de nuestro sistema difuso, con base en la experiencia obtenida a través de las pruebas del primer prototipo.

Para este sistema de control se agregó otra entrada, con la que podemos identificar si el sistema se encuentra en arco o cortocircuito, condiciones que se quieren evitar por su impacto negativo

DESARROLLO DEL SISTEMA PROPUESTO

en la eficiencia del proceso, y con base en esta entrada seleccionar la FAM (*Fuzzy Associative Memory*) que se utilizará, si la que se diseñó para las condiciones de circuito abierto o chispa, o la diseñada para las condiciones de arco o corto. Se buscó que durante el proceso no se presentaran ni cortos ni arcos, pero con base en las pruebas realizadas se observó la dificultad de eliminar estas condiciones en el proceso, por tal motivo, se agregó esta segunda FAM para poder manejar esas condiciones apropiadamente.

A continuación, se presentarán las 2 FAM diseñadas para este sistema (Tabla 4-7).

ARCO O CORTO						
dF	F	Frecuencia muy baja	Frecuencia baja	Frecuencia media	Frecuencia alta	Frecuencia optima
Der. gde. negativa		Desp. med. positivo	*	*	*	*
Der. peq. negativa		Desp. peq. positivo	*	*	*	*
Cero		Desp. gde. positivo	*	*	*	*
Der. peq. positiva		Desp. gde. positivo	*	*	*	*
Der. gde. positiva		Desp. gde. positivo	*	*	*	*

**Don't Care* Para frecuencia baja, media, alta y óptima no importan los valores ya que al estar en Arco o Corto no es posible obtener esos valores de frecuencia.

CHISPA O CIRCUITO ABIERTO						
dF	F	Frecuencia muy baja	Frecuencia baja	Frecuencia media	Frecuencia alta	Frecuencia optima

DESARROLLO DEL SISTEMA PROPUESTO

Der. gde. negativa	Desp. gde. negativo	Desp. gde. negativo	Desp. gde. negativo	Desp. peq. negativo	CERO
Der. peq. negativa	Desp. gde. negativo	Desp. gde. negativo	Desp. med. negativo	Desp. peq. negativo	CERO
Cero	Desp. gde. negativo	Desp. gde. negativo	Desp. med. negativo	Desp. peq. negativo	CERO
Der. peq. positiva	Desp. med. negativo	Desp. peq. negativo	CERO	CERO	CERO
Der. gde. positiva	Desp. peq. negativo	CERO	CERO	CERO	CERO

Tabla 4-7 FAMs

A continuación, se muestra la superficie de control del sistema de control difuso propuesto, generada con el software MATLAB (Figura 4-17). La superficie de control representa los valores de desplazamiento (Salida) que se comandaran con base a las entradas de frecuencia y derivada de la frecuencia que se presenten en el sistema

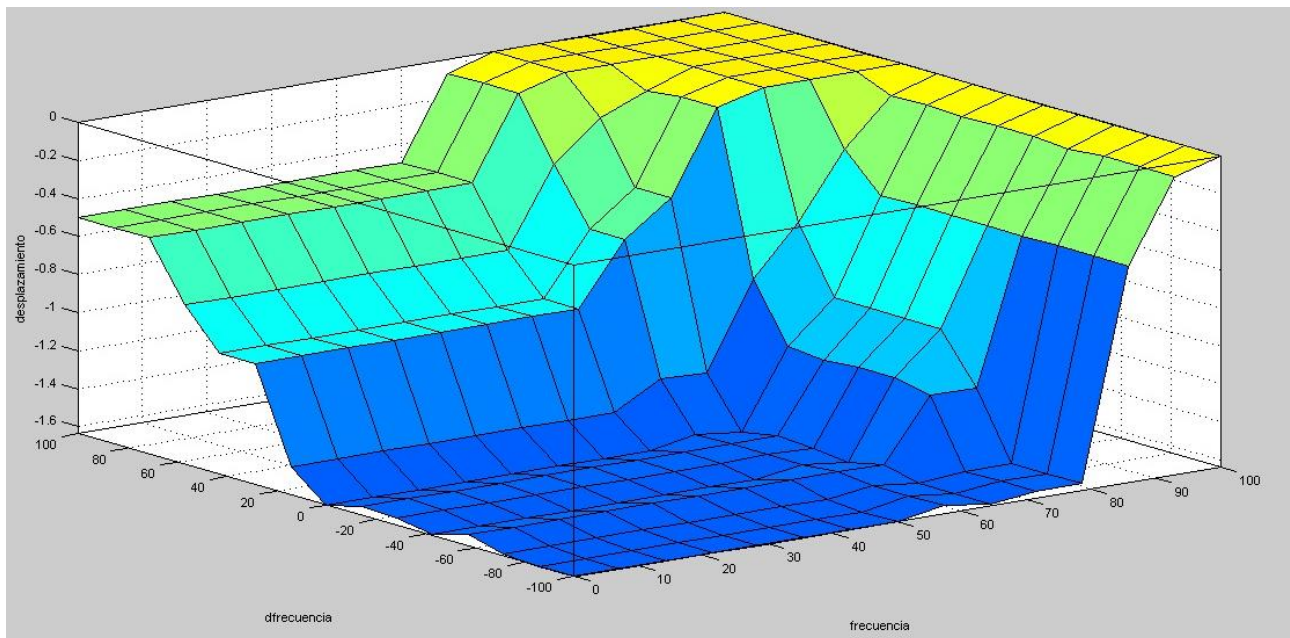


Figura 4-17 Superficie de control

4.9.5 Optimización del sistema (Simulación y ajuste)

Se realizaron simulaciones en MATLAB para ver la respuesta del sistema en condiciones críticas y se analizaron los resultados para optimizar el sistema. También se realizaron algunas pruebas con el sistema de control implementado en el sistema de micromaquinado por electroerosión, y se obtuvieron algunos cambios en las funciones de pertenencia, principalmente en las de la salida.

Las funciones de pertenencia y las FAM's mostradas anteriormente son las que se obtuvieron después de realizar las simulaciones y las pruebas antes mencionadas, siendo estas las que quedaron implementadas en nuestro sistema de control.

4.9.6 Implementación del sistema de control difuso

El proceso de desfusión se realizó utilizando el método COG o centro de gravedad, por medio de la siguiente fórmula.

$$Z^* = \frac{\sum \mu(Z_i) \cdot Z_i}{\sum \mu(Z_i)}$$

Formula 22

Donde:

Z^* es el valor característico de desfusión o salida no difusa.

Z_i es la salida correspondiente al valor de pertenencia de entrada (Singleton).

$\mu(Z_i)$ es el valor de pertenencia.

La implementación de este sistema de control difuso se realizó en un microcontrolador ATMEL utilizando la tarjeta de ARDUINO, donde la salida de nuestro sistema de control difuso se enviará a una PC para ser procesada por el software que se desarrolló para este sistema, el

código fuente del programa del microcontrolador se encuentra en el apéndice *B.I Programa del sistema de control difuso*

A continuación, se presenta un diagrama de flujo del sistema de control implementado (Figura 4-18)

- Entradas del sistema
 - Estado del sistema
 - Corto o arco Entrada digital
 - Chispa o circuito abierto Entrada digital
 - Voltaje equivalente al valor de la frecuencia de chispa Entrada analógica
- Salida del sistema
 - Valor de distancia y dirección en la que se debe desplazar el motor piezoeléctrico
- Control implementado
 1. Calculo de la frecuencia de chispa con base a la entrada de voltaje
 2. Calculo de la diferencia en la frecuencia de chispa respecto a la medición anterior
 3. Con el dato de frecuencia y derivada de la frecuencia se calcula la pertenencia a cada conjunto difuso propuesto en la sección 4.9.3
 4. Validación del estado del sistema si esta en condición de Corto
 - Condición de corto se evalúan las reglas propuestas para corto o arco
 - Condición de no corto se evalúan las reglas propuestas para chispa o circuito abierto
 5. Desdifusión utilizando el método COG o centro de gravedad revisado en la sección 4.9.6
 6. Se obtiene como resultado el valor de distancia y dirección en la que se debe desplazar el motor piezoeléctrico y es enviada a la PC que controla el sistema de posicionamiento

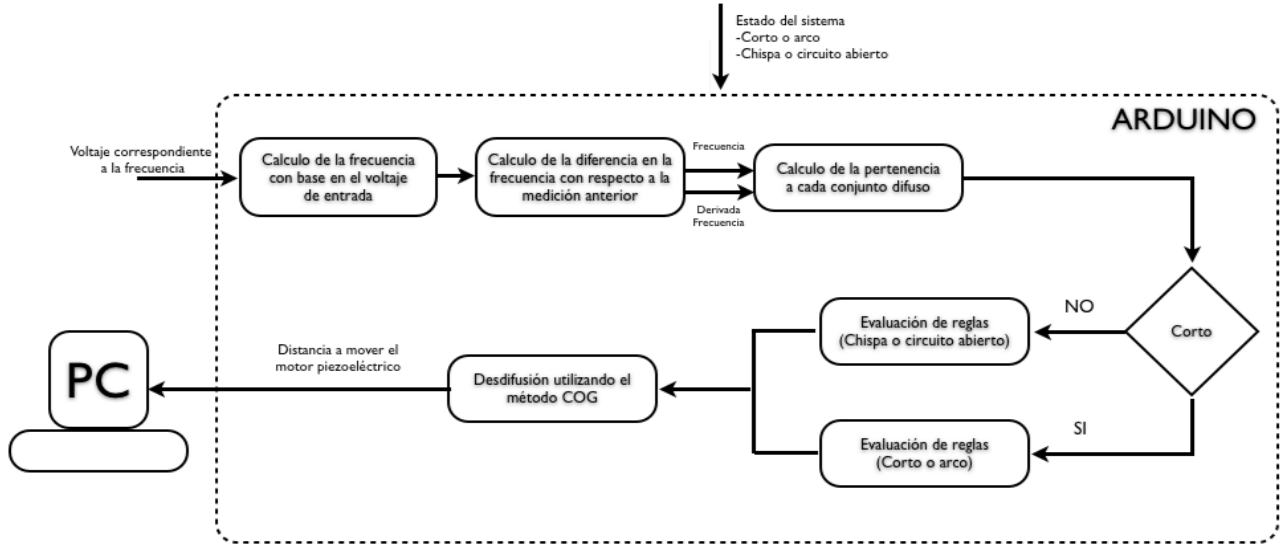


Figura 4-18 Diagrama de flujo de la implementación del sistema de control difuso

4.9.7 Implementación del sistema de control de posicionamiento

Con base en las especificaciones de la tarjeta MC-1100, dentro del software de control de la tarjeta se tiene la opción de utilizar las librerías de comando Active X, por medio de las cuales podemos realizar la comunicación entre la tarjeta MC-1100 y una PC, con la ventaja de poder desarrollar una interfaz y no tener que utilizar el software del fabricante para realizar el control del motor. Una vez que se conocieron las funciones del controlador MC-1100 se establecieron qué funciones o parámetros conformaron el sistema.

Uno de los requerimientos fue desarrollar una interfaz gráfica para el sistema, por lo cual aprovechando el active X, se determinó el uso del programa Microsoft C# para desarrollar la interfaz gráfica del sistema, que permitiera realizar la operación del sistema de una manera sencilla y amigable. (Figura 4-19)

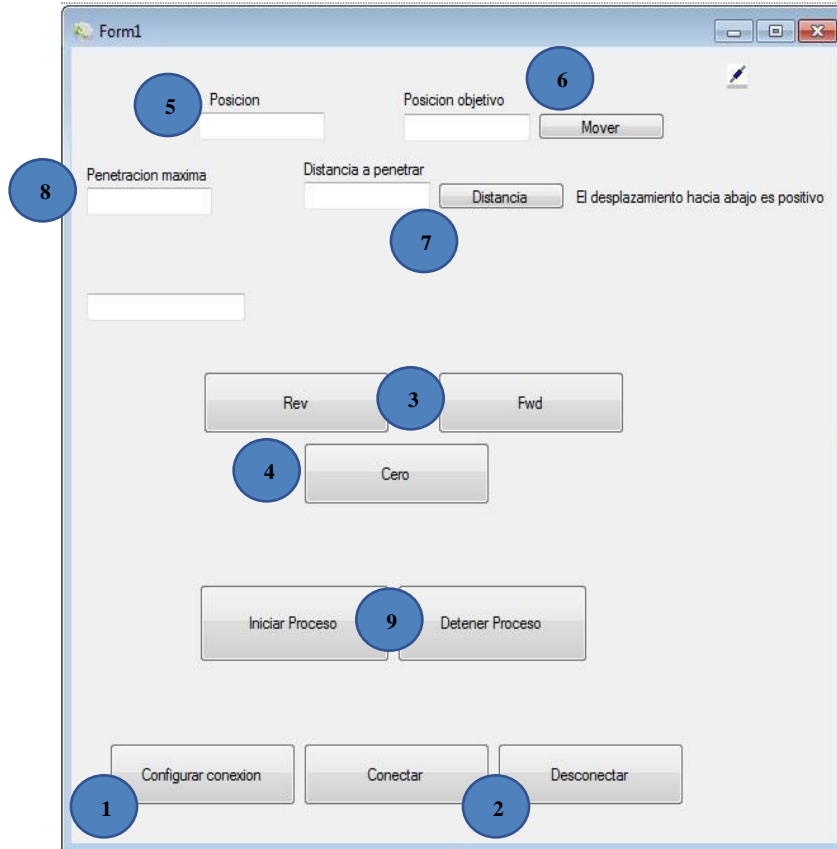


Figura 4-19 Interfaz Gráfica

Las partes que conforman este software son las siguientes

1. Configuración de la tarjeta MC-1100
2. Conectar / Desconectar la tarjeta MC-1100
3. Control Jog del motor
4. Establecer posición cero (Home)
5. Posición actual del electrodo
6. Ir a posición objetivo
7. Penetración deseada
8. Penetración máxima realizada
9. Iniciar / Detener maquinado

A continuación se muestra un diagrama general del sistema de control de proceso revisado en los puntos anteriores (Figura 4-20).

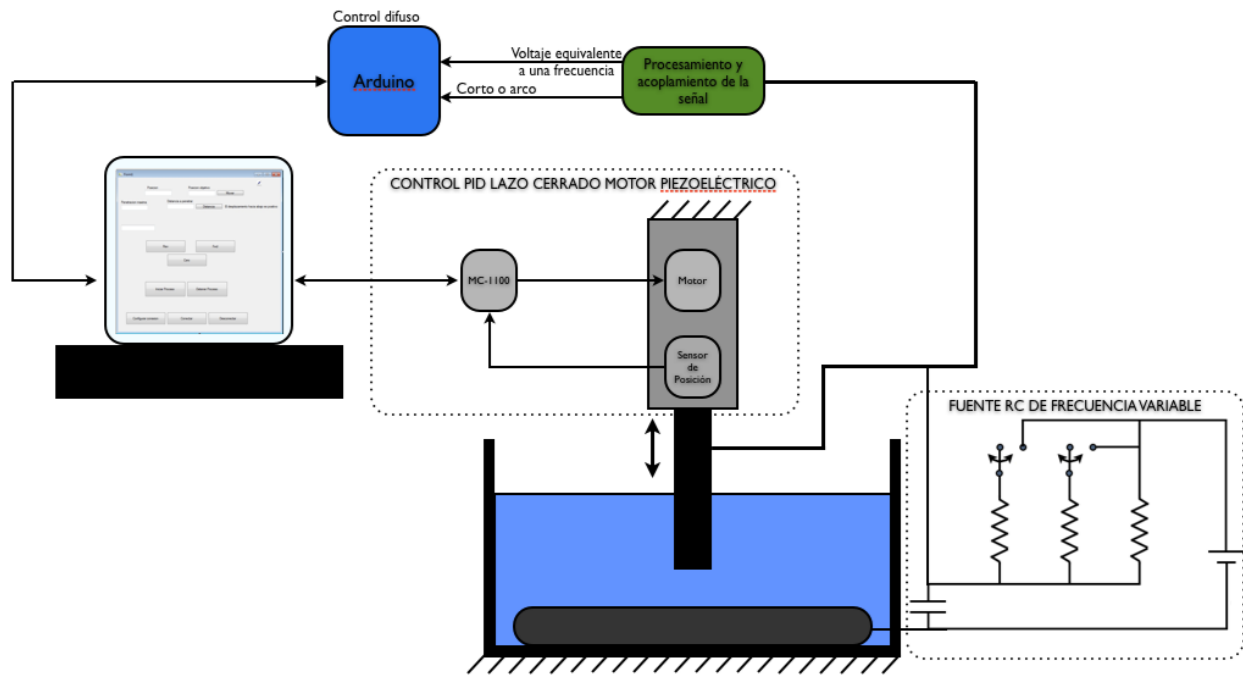


Figura 4-20 Diagrama de bloques del sistema de control

5. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA

Se utilizó la matriz del diseño de experimentos mencionada en el capítulo 4, y con base en ésta se realizaron los experimentos bajo las mismas condiciones de trabajo que las pruebas realizadas con el primer prototipo, con la finalidad poder comparar los resultados (Ver Tabla 4-1).

5.1 Resultados del diseño de experimentos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con el primer prototipo y los resultados con el nuevo sistema de control propuesto

1er prototipo																		
F ₁						F ₂						F ₃						
	DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃		DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃		DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃	
V ₁	0.07	0.08	0.03	0.03	0.51	0.44	0.07	0.05	0.04	0.03	0.85	0.89	0.21	0.17	0.01	0.01	0.75	0.9
V ₂	1.12	1.1	0.07	0.06	1.52	2.13	0.37	0.49	0.06	0.06	0.85	0.71	0.59	0.27	0.04	0.04	0.51	0.49
V ₃	1.84	1.83	0.14	0.15	1.55	1.75	0.44	0.37	0.06	0.07	0.48	0.57	0.05	0.05	0.09	0.12	0.59	0.53

Sistema control difuso																		
F ₁						F ₂						F ₃						
	DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃		DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃		DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃	
V ₁	0.5	0.45	0.02	0.04	0.52	0.49	0.25	0.3	0.05	0.08	0.46	0.56	0.22	0.21	0.05	0.04	0.15	0.18
V ₂	0.88	0.97	0.13	0.1	1.14	1.08	0.77	0.66	0.22	0.2	0.59	0.68	0.8	0.72	0.21	0.19	0.71	0.7
V ₃	0.91	1.02	0.78	0.83	0.93	1.13	0.84	0.95	0.92	0.94	0.73	0.88	1.29	1.23	0.92	0.86	0.92	1.18

De manera general podemos observar que de las cincuenta y cuatro pruebas realizadas se presentó un aumento en la penetración en treinta y nueve pruebas lo que representa un 72 [%] de las pruebas y una disminución en la penetración en quince pruebas lo que representa el 28 [%]

	F ₁						F ₂						F ₃					
	DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃		DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃		DPE ₁		DPE ₂		DPE ₃	
V ₁	666%	437%	-24%	20%	2%	9%	232%	477%	19%	179%	-46%	-37%	5%	23%	456%	231%	-79%	-80%
V ₂	-22%	-12%	85%	63%	-25%	-49%	109%	35%	276%	215%	-31%	-5%	36%	165%	400%	395%	40%	44%
V ₃	-51%	-44%	472%	459%	-40%	-35%	90%	160%	1454%	1296%	52%	53%	2634%	2563%	894%	624%	56%	121%

Al analizar el impacto en la penetración para cada uno de los factores determinados en los 3 niveles definidos podemos observar lo siguiente:

- Frecuencia. En el primer prototipo se observó que los cambios en la frecuencia presentaron un aumento en el segundo nivel de frecuencia propuesto en el diseño de experimentos, a diferencia de los resultados obtenidos con el nuevo sistema de control en el cual para el nivel de frecuencia uno y dos fue muy similar y se presentó un aumento para el tercer nivel. En el primer prototipo el aumento en la frecuencia disminuye la eficiencia del proceso lo cual no concuerda con la teoría del proceso por lo cual podemos concluir una ineficiencia en el control, por otro lado, en el nuevo sistema de control un aumento en la frecuencia generó un aumento en la eficiencia lo cual es el comportamiento deseado ya que un aumento en la frecuencia implica una mayor tasa de remoción de material, también se presentó una disminución en la varianza de los resultados, con lo cual podemos concluir un mejor control del proceso (Ver Figura 5-1).
- Voltaje. En el primer prototipo se observó que los cambios en voltaje aumentaron la eficiencia en la penetración, estos mismos resultados se observaron con el nuevo sistema de control. Esto concuerda con la teoría del proceso ya que aumentar el voltaje se aumenta la energía disponible durante cada chispa con lo cual aumenta la capacidad de remoción de material, por otro lado, se observaron mayores incrementos en la eficiencia del proceso con el nuevo sistema de control, con lo cual podemos concluir un mejor control del proceso (Ver Figura 5-1).
- DPE. El comportamiento de los resultados entre los dos prototipos fue similar presentando el desempeño más alto con el nivel 2 del factor y desempeño más bajo con el nivel 1, este comportamiento es el comportamiento deseado ya que el factor DPE

consiste en las propiedades de los materiales usados como dieléctrico, pieza de trabajo y electrodo y este fue el mismo para ambos prototipos (Figura 5-1).

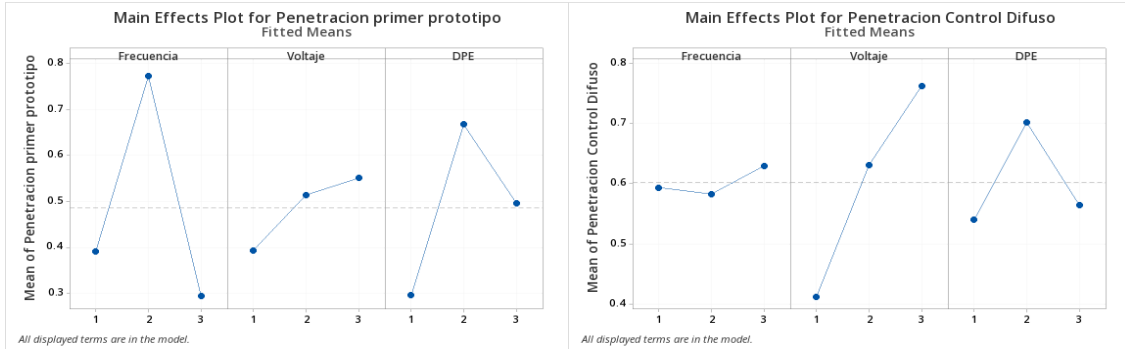


Figura 5-1 Impacto en la penetración para cada uno de los factores

Se realizó un análisis con un gráfico de Pareto con base a los valores absolutos de los efectos estandarizados desde el efecto más grande hasta el más pequeño para determinar la importancia de los factores, donde podemos observar que para el primer prototipo los factores de frecuencia y DPE son los más relevantes para el proceso con una diferencia entre cada uno de ellos del 34[%], para el prototipo con el nuevo sistema de control los factores más relevantes son el voltaje y DPE con una diferencia entre cada uno de ellos del 64 [%]. (Figura 5-2)

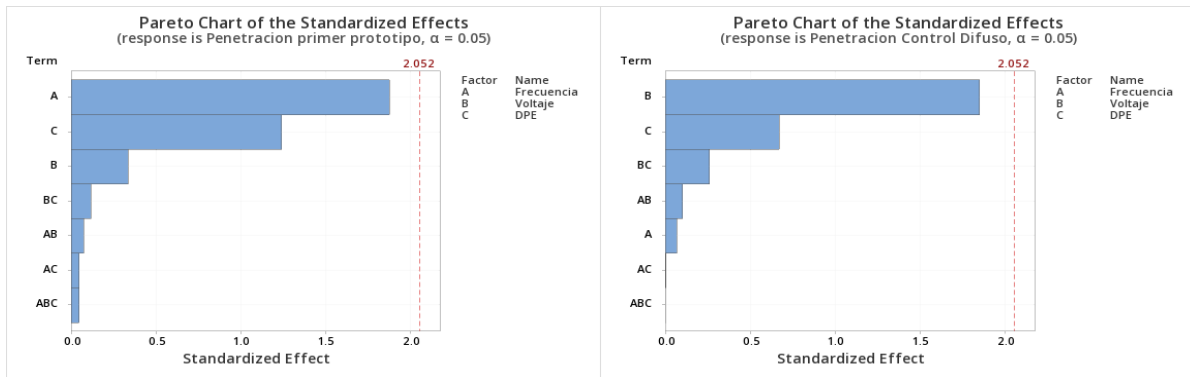
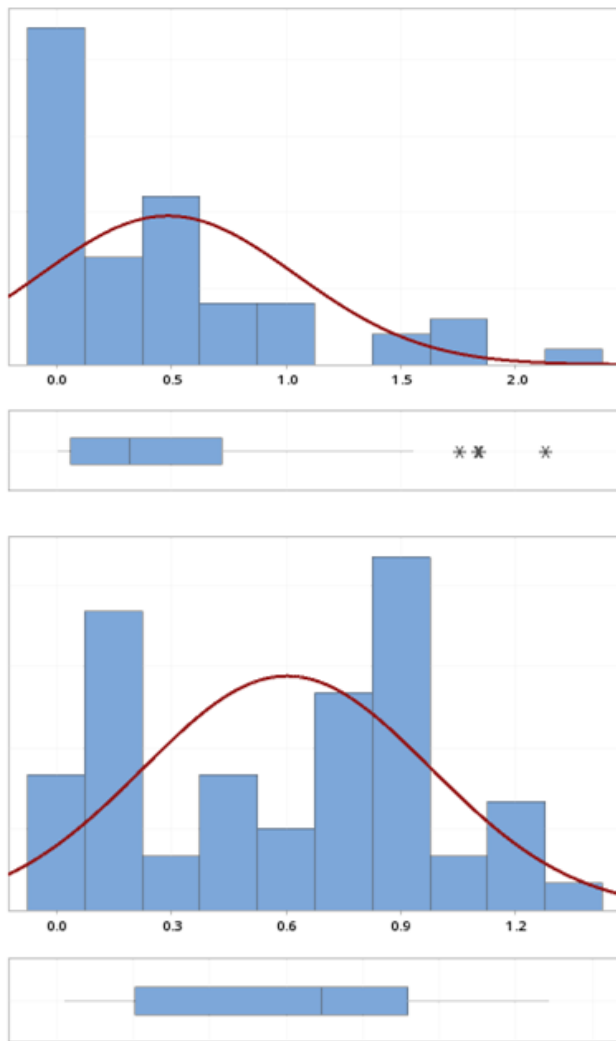


Figura 5-2 Pareto de resultados

Por otro lado, al analizar los resultados se encontró un aumento en el promedio de penetración de 0.486 [mm] a 0.602 [mm], una disminución en la desviación estándar de 0.554 [mm] a 0.374 [mm] y un aumento en la mediana de 0.318 [mm] a 0.69 [mm]. (Figura 5-3)



Anderson-Darling Normality Test

A-Squared	3.73
P-Value	<0.005
Mean	0.48680
StDev	0.55412
Variance	0.30705
Skewness	1.43246
Kurtosis	1.31480
N	54

Minimum	0.00900
1st Quartile	0.06125
Median	0.31850
3rd Quartile	0.72200
Maximum	2.12600

95% Confidence Interval for Mean
0.33555 0.63804

95% Confidence Interval for Median
0.08721 0.50029

95% Confidence Interval for StDev
0.46581 0.68407

Anderson-Darling Normality Test

A-Squared	1.28
P-Value	<0.005
Mean	0.60230
StDev	0.37484
Variance	0.14051
Skewness	-0.09480
Kurtosis	-1.27804
N	54

Minimum	0.02200
1st Quartile	0.20650
Median	0.69050
3rd Quartile	0.91775
Maximum	1.28500

95% Confidence Interval for Mean
0.49998 0.70461

95% Confidence Interval for Median
0.46699 0.81765

95% Confidence Interval for StDev
0.31510 0.46275

Figura 5-3 Análisis de resultados

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

6.1 Conclusiones

Se logró incrementar la eficiencia del sistema al maquinar acero inoxidable, con respecto al primer prototipo, logrando una penetración de 0.935 [mm] con un electrodo de 1 [mm] de diámetro utilizando una fuente de 30 [V] de corriente directa, siendo este el resultado más importante, debido a la dureza del acero inoxidable. De las cincuenta y cuatro pruebas realizadas se presentó un aumento en la penetración en treinta y nueve pruebas lo que representa un 72 [%] de las pruebas y una disminución en la penetración en quince pruebas lo que representa el 28 [%]. Se tuvieron aumentos en la penetración del electrodo de hasta 894 [%], mientras que la mayor disminución en la penetración fue de – 80 [%]

Al llevar a cabo las pruebas pudimos observar que el sistema lograba salir fácilmente de la condición de corto circuito, en comparación con el primer prototipo, gracias a esto se logró mejorar la eficiencia del sistema, así como a reducir la energía utilizada por el mismo.

Al observar el voltaje del *GAP* durante las pruebas, se pudo observar que el sistema alcanzó valores más altos en la frecuencia de maquinado, logrando alcanzar la frecuencia máxima del sistema de 13.661 [KHz], con respecto a su predecesor que tenía una frecuencia máxima posible de 5 [KHz], el sistema lograba operar de forma adecuada en intervalos de tiempo más largos, en comparación con el prototipo pasado, una vez que teníamos una condición de corto o arco en el sistema, respondía de forma adecuada para regresar a una condición óptima de operación.

6.2 Trabajo a futuro

Como se mencionó en el capítulo 4 el sistema de electroerosión se puede dividir en 3 áreas principales de investigación:

- Fuente de alimentación
- Propiedades de los materiales utilizados en el proceso
 - o Electrodo
 - o Pieza de trabajo
 - o Fluido dieléctrico
- Control del sistema
 - o Control del proceso
 - o Control de posición del electrodo

Por tal motivo las recomendaciones para el trabajo a futuro de agruparan de la misma manera

6.2.1 Fuente de Alimentación

Se propone cambiar el capacitor de la fuente RC, para incrementar la frecuencia máxima de operación del sistema para este prototipo. Pero sería ideal que se trabajara de manera independiente en el desarrollo de otra fuente para el sistema.

6.2.2 Propiedades de los materiales

Como se mencionó en el capítulo anterior, se identificó que en el caso del acero inoxidable la penetración estaba directamente relacionada con el voltaje de operación, a diferencia de las pruebas realizadas con las otras combinaciones.

Por otro lado, se identificó la influencia del fluido dieléctrico en el proceso al comparar los resultados de los factores DPE1 y DPE3, donde se presentaron cambios representativos en los resultados y la única variable que cambió fue el fluido dieléctrico.

6.2.3 Control del sistema

Incorporar mediciones de acabado superficial y consumo de energía del sistema

6.2.3.1 Control del proceso

- Electrónica. El circuito implementado cuenta con un convertidor de frecuencia a voltaje, el cual se calcula con base en la frecuencia máxima de operación, que en este sistema es de 13.661[KHz], pero dado que se cuenta con banco de resistencias, es posible variar la frecuencia máxima de operación de nuestro sistema. Al seleccionar un valor menor disminuimos la resolución, ya que la salida de nuestro convertidor no utiliza todo el intervalo de 0[V] a 5[V], por esta razón se propone rediseñar esta parte del circuito para tener la misma resolución, para diferentes frecuencias de operación.
- Interfaz. Se propone agregar una opción dentro de la interfaz, para que el usuario pueda seleccionar la frecuencia máxima de operación de la fuente, ya que en el sistema actual es necesario cambiar el valor de esta frecuencia a través del programa del microcontrolador.
- Control difuso. Ya que el sistema difuso opera con base en los conocimientos representados en forma de reglas, es posible mejorar el control difuso, por tal motivo se propone agregar un sistema que ayude a mejorar la eficiencia del control difuso como puede ser una red neuronal.
- Proceso μ EDM. Se mencionó que, para las pruebas desarrolladas en este trabajo de tesis, se agregó una propela para mover el fluido dieléctrico, pero se observó que no era eficiente, por tal motivo, se propone diseñar un sistema para recircular el fluido dieléctrico.

6.2.3.2 Control de posición del electrodo

- Sistema de posicionamiento fino. Puesto que la selección de los resortes se realizó a prueba y error, se propone retomar el diseño de esta parte del mecanismo para optimizarlo, ya que conforme desciende nuestro electrodo es necesario que el motor aplique más fuerza para poder desplazar el electrodo.

7. APÉNDICES

Apéndice A Sistema para el posicionamiento fino

A.I Especificaciones Motor piezoeléctrico SQL-3.4 [21]

- Travel Range 7 mm, 20 mm
- Housing Dimensions \varnothing 6.83 x 11.02 mm
- Motor Body Dimensions 3.4 x 3.4 x 10 mm
- Resolution 0.5 μ m
- Stall Force 200 gram force (2 N)
- Speed @ 1/2 stall force 4 mm/s
- Input Power to motor (moving) * 1000 mW typical
- Input Power to controller (moving)* ~2.5 W max (MC-1100 controller)
- Input Power (stationary) OFF POWER HOLD (0 mW, 0 V to hold position)
- Operating Temperature -30 to +80°C
- Storage Temperature -40 to +85°C
- Shock Resistance 2500 G's
- Cable/Connector Flex circuit
- Lifetime (load-dependent)** > 70,000 cycles
- Motor Controller MC-1100 drive card
- Operating Frequency ~ 115 KHz
- Capacitance per Phase ~ 1.29 nF
- Weight 1.2 grams (0.7 grams without screw)

A.II Especificaciones Sensor Magnético NSE-5310[23]

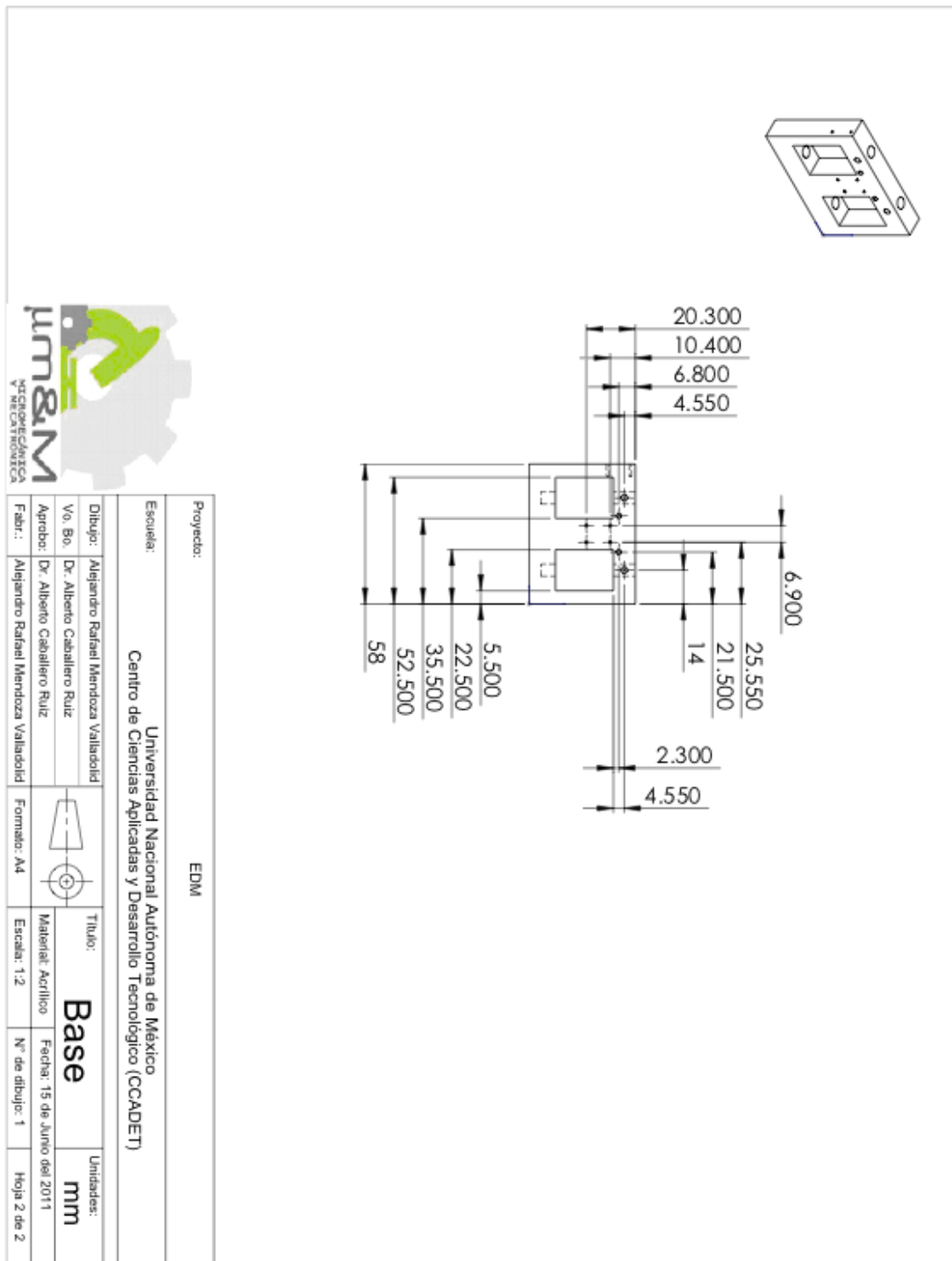
- Supply Voltage 3 - 3.6 V
- Supply Current 21 mA max
- Resolution 0.5 μ m @ 12 bits per 2 mm pole pair
- Repeatability better than 2 μ m (bi-directional)
- Integral error* \pm 20 μ m
- Differential error* \pm 0.97 μ m (10 bit, no missing codes)

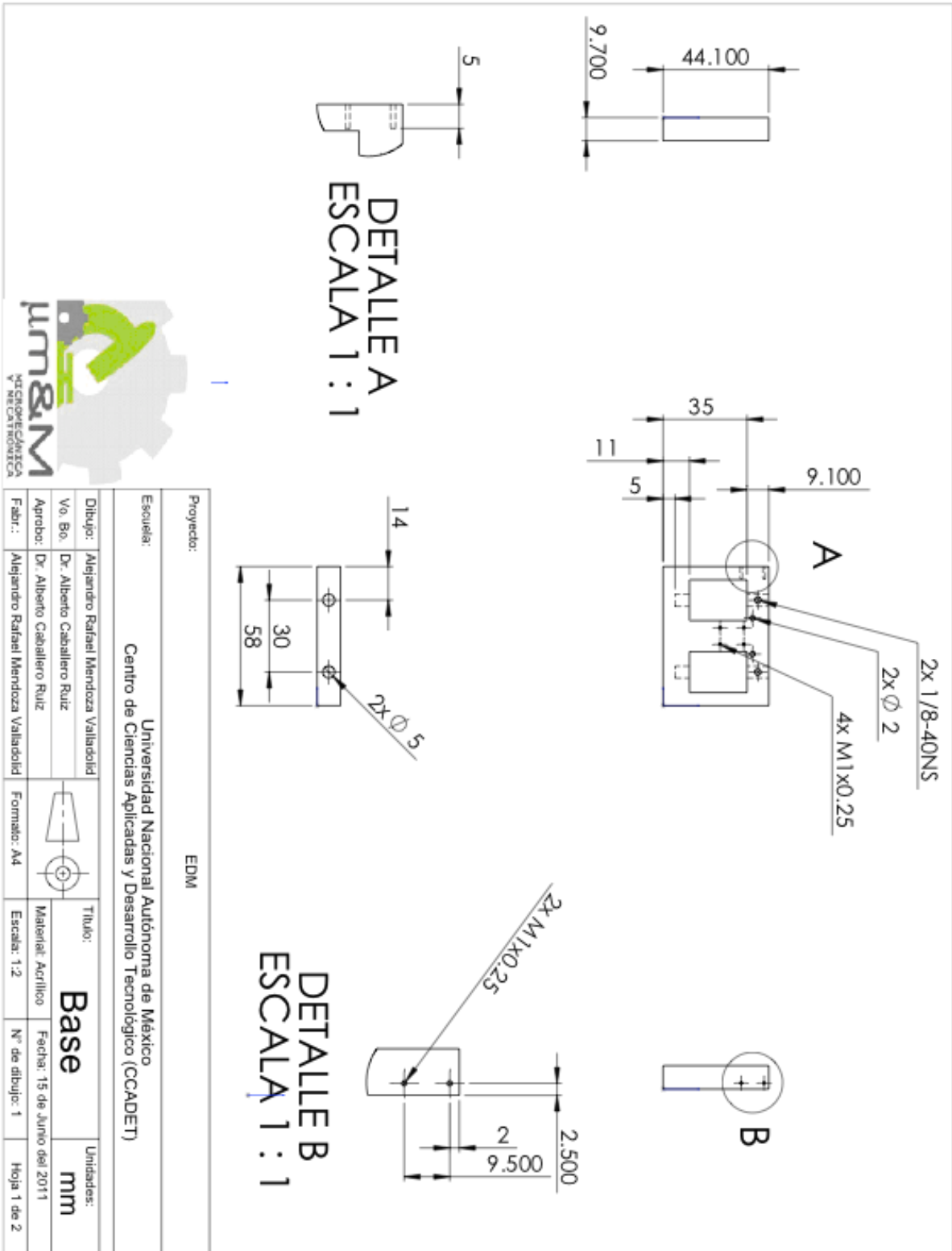
- Hysteresis 2-8 LSB with incremental output/ 12 bit res. 0 for absolute serial output
- I2C read-out frequency 400 kHz (typ) to 800 kHz (max)
- Stroke (linear) magnetic strip length minus 3 mm
- Operating Temperature -40 to +125° C
- Storage Temperature -55 to +125° C
- Humidity non-condensing 5 to 85%
- Dimensions - NSE-5310 2.5 x 3.9 x 0.6 mm (*chip-on-board*) 4.3 x 6.5 x 1.1 mm in TSSOP
- Dimensions - TRK-1T02 mounted on PCB 8.5 x 11.5 x 1.61 mm (*Total height ~3 mm with magnet and air gap*)
- Thermal pkg resistance 114.5°C/W (still air) absolute max.

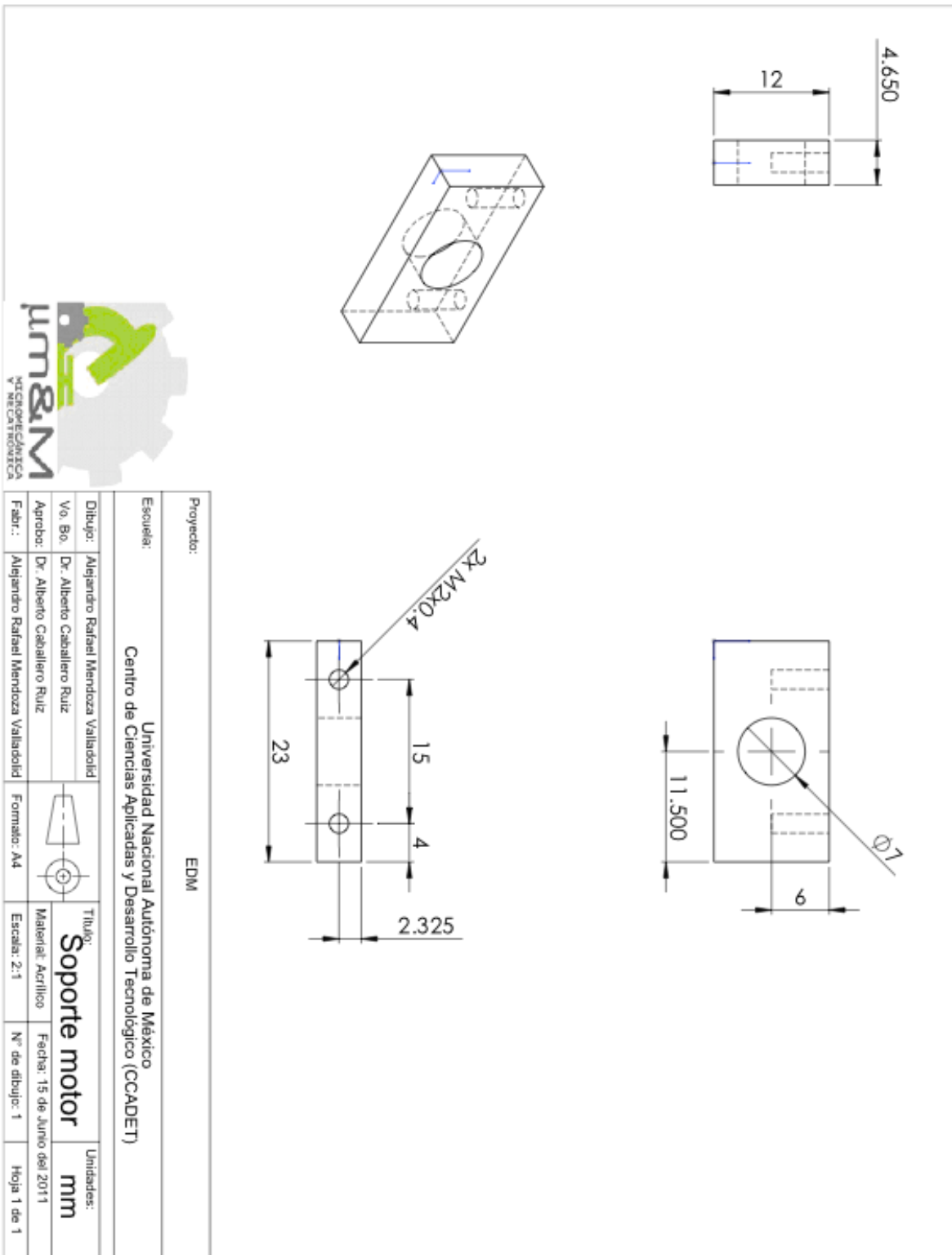
A.III Especificaciones Controlador MC-1100[21]

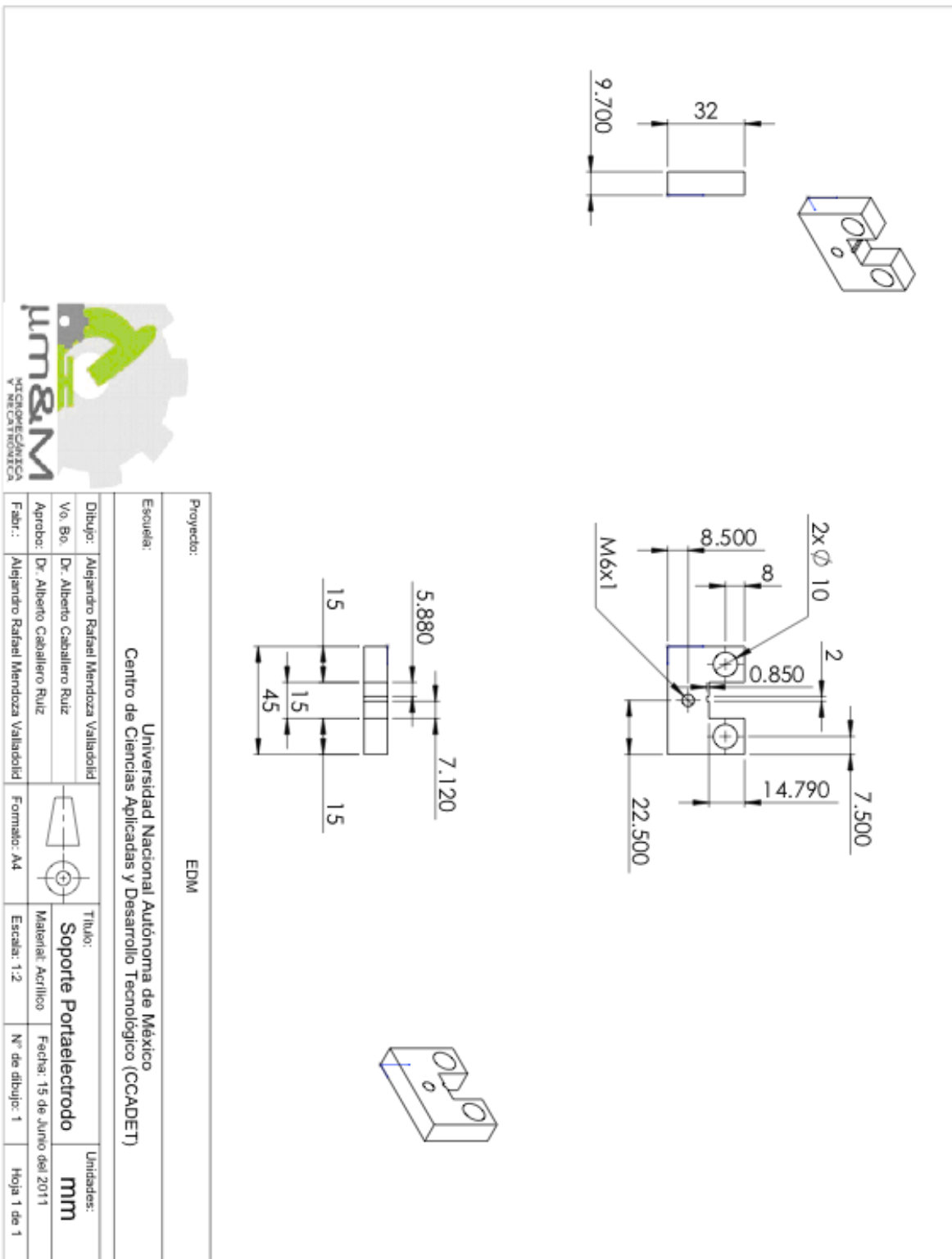
- Input Power 5 V DC 500 mA max*
- Input Signals - USB or RS-232C connection to PC - analog input (0 to 3.3 V)
- Control Software New Scale Pathway Software with graphical user interface, scripting interface and ActiveX command library.
- Output Signals Motor Phase 1, Motor Phase 2, Ground
- Position Sensor Input Digital (quadrature RS-422) or Analog (0-3.3V) port
- A/D Converter Resolution 10 bits
- Closed Loop Commands Speed, Move to Target, Step, Zero, Enable Reference Mark and more
- Open Loop Commands Speed, Run, Stop, Timed Step(s) and more
- Dimensions (l x w x h) 2" x 3" x 0.8" (50.8 x 76.2 x 20.3 mm)

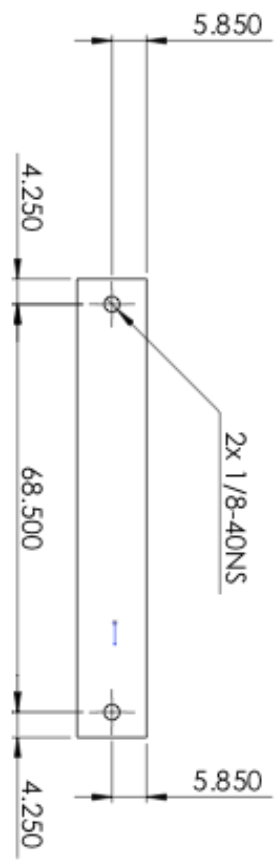
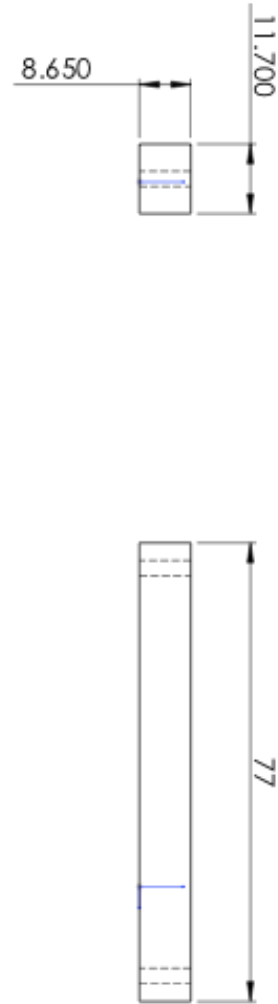
A.IV Planos





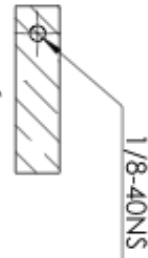
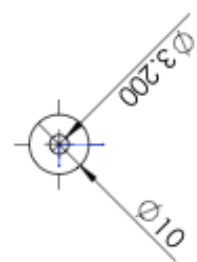
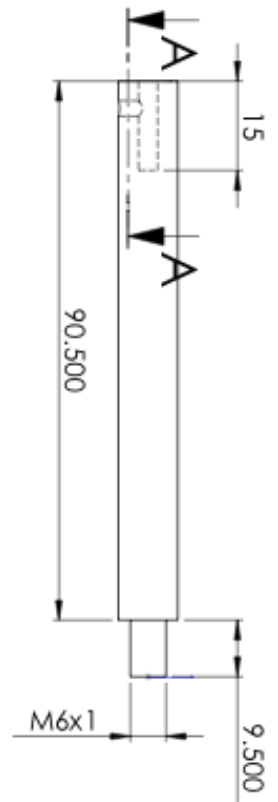




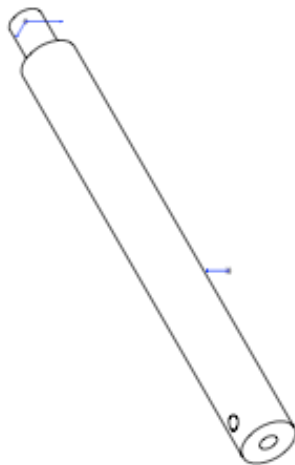


Proyecto:		EDM	
Escuela:		Universidad Nacional Autónoma de México Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET)	
Dibujo:	Alejandro Rafael Mendoza Valladolid		
Vo. Bo.	Dr. Alberto Caballero Ruiz		
Aprobo:	Dr. Alberto Caballero Ruiz		
Fabr.:	Alejandro Rafael Mendoza Valladolid	Formato:	A4
Título:		Soporte MC-1100	
Material:		Acrílico	
Fecha:		15 de Junio del 2011	
Nº de dibujo:		1	
Unidades:		mm	
Hoja:		1 de 1	





SECCIÓN A-A



Proyecto:	EDM		
Escuela:	Universidad Nacional Autónoma de México Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET)		
Dibujo:	Alejandro Rafael Mendoza Valladolid	Formato:	A4
Vº. Bo.:	Dr. Alberto Caballero Ruiz	Título:	Portaelectrodo
Aprobo:	Dr. Alberto Caballero Ruiz	Materia:	Acritico
Fabr.:	Alejandro Rafael Mendoza Valladolid	Fecha:	15 de Junio del 2011
		Escala:	1:1
		Nº de dibujo:	1
		Unidades:	mm
			Hoja 1 de 1



Apéndice B Sistema de control

B.I Programa del sistema de control difuso

```

volatile float Fi=0;    //Variable para la frecuencia de inicio
//Variables para almacenar el grado de pertenencia de cada particion del universo del discurso de variable de salida
volatile float gde_neg=0;
volatile float med_neg=0;
volatile float peq_neg=0;
volatile float Cero=0;
volatile float peq_pos=0;
volatile float med_pos=0;
volatile float gde_pos=0;
volatile float Z=0;    //Variable para almacenar el valor de la desdifusion(Salida)
int analogPin = 3;
int valor=0;
int corto=7;          //Pin que se utilizara para detectar corto circuito o arco
void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Se abre el puerto serial y se define la velocidad de operacion
  pinMode(corto,INPUT); //Declaracion del pin que se usara como entrada para ver cuando ahi corto
}
void loop()
{
  float F=0;          //Variable para almacenar el valor de la frecuencia medida
  float D=0;          //Variable para almacenar el valor de la derivada de la frecuencia
  float val = 0;
  int estado=0;

  //Inicializamos en cero las variables que sirven para almacenar el grado de pertenencia y el valor de la desdifusion
  gde_neg=0;
  med_neg=0;
  peq_neg=0;
  Cero=0;
  peq_pos=0;
  med_pos=0;
  gde_pos=0;

  //Inicializamos en cero la variable que sirve para almacenar el valor de la desdifusion
  Z=0;
  //If en el cual se realiza la difusion de las entradas no difusas (%F, DF), se utilizo un IF para que la difusion
  //solo se realice cuando el puerto serial reciba datos y así no lo este ejecutando siempre

  //if(Serial.available(>0)
  if(true==true)
  {
    //Variables para almacenar el grado de pertenencia de cada variable de entrada despues de realizarse la difusion
    float F_mbaj=0;
    float F_baj=0;
    float F_med=0;
    float F_alt=0;
    float F_opt=0;

    float D_gdeneg=0;
    float D_peqneg=0;
    float D_cero=0;
    float D_peqpos=0;
    float D_gdepos=0;
    //Leemos del puerto serie el valor de la frecuencia que este caso es un voltaje entre [0,5]
    //dicho voltaje es una representacion de la frecuencia que se tiene la cual podemos conocer
  }
}

```



```

//aplicando la siguiente formula  $F=(V*13699)/45651385$ 
//F=Serial.read();
val = analogRead(analogPin);
val=(val*5)/1023; //Para tener el valor del ADC entre 0 y 5V
F=(val*13660)/4.31; //Para pasar el valor de voltaje a frecuencia
F=(F*100)/13660; //Para tener el valor de voltaje en porcentaje
//Una vez leido el valor del puerto serie se elimina la informacion que se tiene en el puerto serie
//Serial.flush();

//Con estos If's realizamos la Difusion de las entradas no difusas
if(F<=50)
{
  F_mbaj=1;
}

if(F>50 && F<=60)
{
  F_mbaj=0.1*(60-F);
}

if(F>=50 && F<=62.5)
{
  F_baj=0.08*(F-50);
}

if(F>62.5 && F<=75)
{
  F_baj=0.08*(75-F);
}

if(F>=65 && F<=75)
{
  F_med=0.1*(F-65);
}

if(F>75 && F<=85)
{
  F_med=0.1*(85-F);
}

if(F>=80 && F<=87.5)
{
  F_alt=0.1333*(F-80);
}

if(F>87.5 && F<=95)
{
  F_alt=0.1333*(95-F);
}

if(F>=90 && F<=95)
{
  F_opt=0.2*(F-90);
}

if(F>95)
{
  F_opt=1;
}

//Una vez realizada la difusion de la frecuencia la almacenamos en la variable de la frecuencia final
//ya que anteriormente

```

```
//Ff=F;
//D=Ff-Fi;

D=F-Fi;
if(D<=-50)
{
  D_gdeneg=1;
}

if(D>-50 && D<=-40)
{
  D_gdeneg=(-0.1)*(D+40);
}

if(D>=-45 && D<=-25)
{
  D_peqneg=0.05*(D+45);
}

if(D>-25 && D<=-5)
{
  D_peqneg=(-0.05)*(D+5);
}

if(D>=-10 && D<-5)
{
  D_cero=0.2*(D+10);
}

if(D>=-5 && D<=5)
{
  D_cero=1;
}

if(D>5 && D<=10)
{
  D_cero=0.2*(10-D);
}

if(D>=5 && D<=25)
{
  D_peqpos=0.05*(D-5);
}

if(D>25 && D<=45)
{
  D_peqpos=0.05*(45-D);
}

if(D>=40 && D<50)
{
  D_gdepos=0.1*(D-40);
}

if(D>=50)
{
  D_gdepos=1;
}

Fi=F;
//Fi=Ff;
```

```

//Se verifica si esta en corto
estado=digitalRead(corto);

//Se realiza la evaluacion de reglas(min) y la agregacion de reglas(MAX) en una sola instruccion
//y estos datos son los que se utilizaran para la desdifusion por medio del metodo COG o centro de gravedad
//Dependiendo si se encuentra en corto o no es la evaluacion de reglas que se realizara

if(estado==0)//(Voltaje de chispa o circuito abierto)
{
gde_neg=max(min(D_gdeneg,F_mbaj),gde_neg);
gde_neg=max(min(D_gdeneg,F_baj),gde_neg);
gde_neg=max(min(D_gdeneg,F_med),gde_neg);
peq_neg=max(min(D_gdeneg,F_alt),peq_neg);
Cero=max(min(D_gdeneg,F_opt),Cero);

gde_neg=max(min(D_peqneg,F_mbaj),gde_neg);
gde_neg=max(min(D_peqneg,F_baj),gde_neg);
med_neg=max(min(D_peqneg,F_med),med_neg);
peq_neg=max(min(D_peqneg,F_alt),peq_neg);
Cero=max(min(D_peqneg,F_opt),Cero);

gde_neg=max(min(D_cero,F_mbaj),gde_neg);
gde_neg=max(min(D_cero,F_baj),gde_neg);
med_neg=max(min(D_cero,F_med),med_neg);
peq_neg=max(min(D_cero,F_alt),peq_neg);
Cero=max(min(D_cero,F_opt),Cero);

med_neg=max(min(D_peqpos,F_mbaj),med_neg);
peq_neg=max(min(D_peqpos,F_baj),peq_neg);
Cero=max(min(D_peqpos,F_med),Cero);
Cero=max(min(D_peqpos,F_alt),Cero);
Cero=max(min(D_peqpos,F_opt),Cero);

peq_neg=max(min(D_gdepos,F_mbaj),peq_neg);
Cero=max(min(D_gdepos,F_baj),Cero);
Cero=max(min(D_gdepos,F_med),Cero);
Cero=max(min(D_gdepos,F_alt),Cero);
Cero=max(min(D_gdepos,F_opt),Cero);

Z=(gde_neg*(-1.5)+med_neg*(-1)+peq_neg*(-0.5)+Cero*(0))/(gde_neg+med_neg+peq_neg+Cero);
Z=Z*(-1);
}

else//(Voltaje de arco o corto)
{
med_pos=max(min(D_gdeneg,F_mbaj),med_pos);
peq_pos=max(min(D_gdeneg,F_baj),peq_pos);
peq_pos=max(min(D_gdeneg,F_med),peq_pos);
peq_pos=max(min(D_gdeneg,F_alt),peq_pos);
peq_pos=max(min(D_gdeneg,F_opt),peq_pos);

peq_pos=max(min(D_peqneg,F_mbaj),peq_pos);
peq_pos=max(min(D_peqneg,F_baj),peq_pos);
peq_pos=max(min(D_peqneg,F_med),peq_pos);
peq_pos=max(min(D_peqneg,F_alt),peq_pos);
peq_pos=max(min(D_peqneg,F_opt),peq_pos);

gde_pos=max(min(D_cero,F_mbaj),gde_pos);
peq_pos=max(min(D_cero,F_baj),peq_pos);
peq_pos=max(min(D_cero,F_med),peq_pos);
peq_pos=max(min(D_cero,F_alt),peq_pos);
peq_pos=max(min(D_cero,F_opt),peq_pos);
}

```

```

gde_pos=max(min(D_peqpos,F_mbaj),gde_pos);
Cero=max(min(D_peqpos,F_baj),Cero);
Cero=max(min(D_peqpos,F_med),Cero);
peq_pos=max(min(D_peqpos,F_alt),peq_pos);
peq_pos=max(min(D_peqpos,F_opt),peq_pos);

gde_pos=max(min(D_gdepos,F_mbaj),gde_pos);
Cero=max(min(D_gdepos,F_baj),Cero);
Cero=max(min(D_gdepos,F_med),Cero);
peq_pos=max(min(D_gdepos,F_alt),peq_pos);
peq_pos=max(min(D_gdepos,F_opt),peq_pos);

Z=(Cero*(0)+peq_pos*(1)+med_pos*(3)+gde_pos*(6))/(Cero+peq_pos+med_pos+gde_pos);
Z=Z*(-1);
}

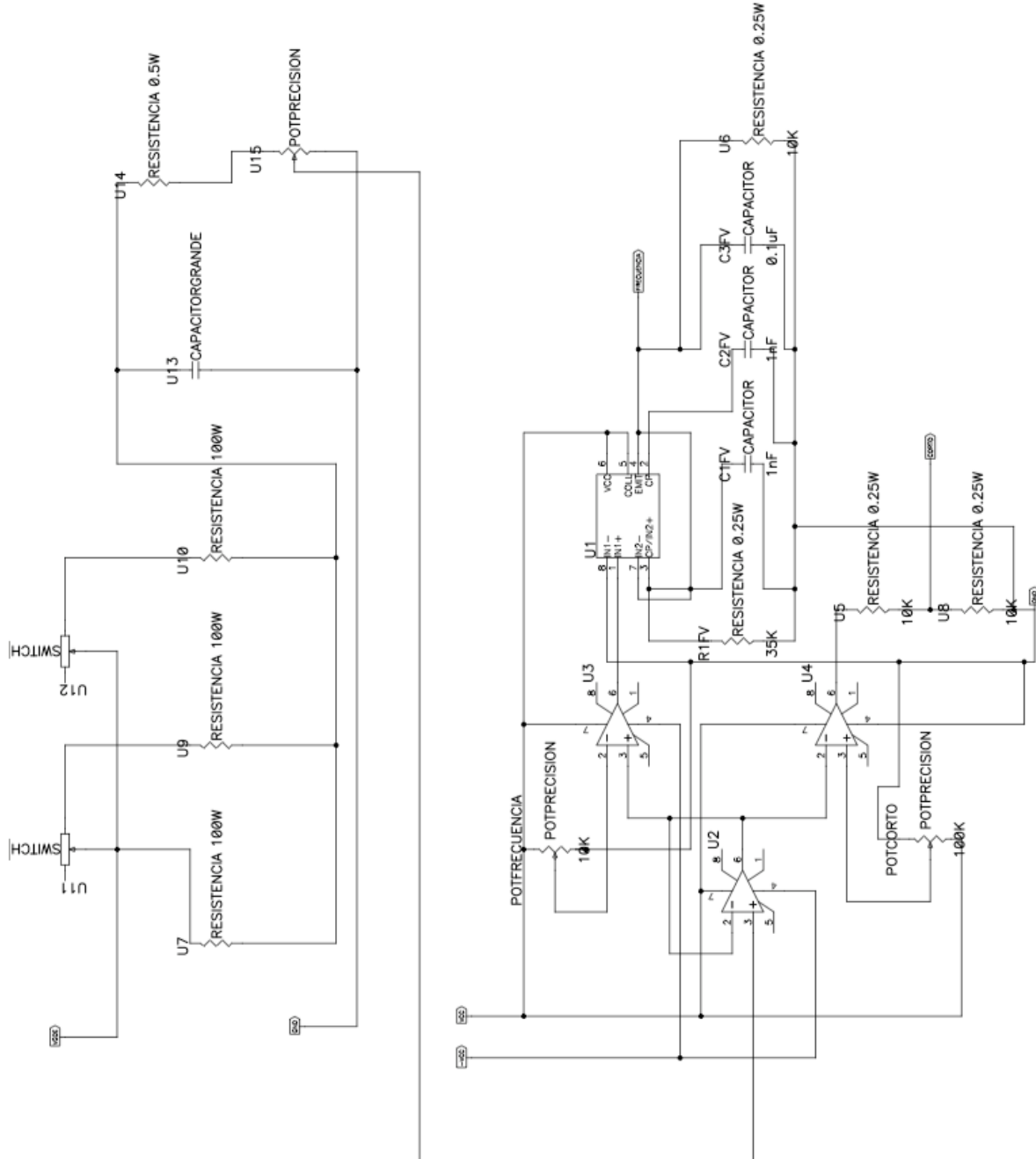
//Se utiliza este if para que solo se lea el puerto cuando C# solicite un dato
//y se guarda en una variable el dato que se recibio de C# para despues verificar si el dato recibido
//coincide con el dato que envia C# cuando solicita un dato, una vez leído el dato se limpia el puerto serie
if (Serial.available() > 0)
{
  valor=Serial.read();
  Serial.flush();
}

//Se utiliza este if para que solo se envíen datos cuando el programa de C# los solicite y así no saturar el puerto
if(valor==49)
{
  digitalWrite(13,HIGH);
  Serial.println(Z,3);
  valor=0;
  Serial.flush();
}
if(valor==48)
{
  digitalWrite(13,LOW);
  Serial.println(Z,3);
  valor=0;
  Serial.flush();
}
}
}

```

Apéndice C Electrónica

C.I Diagrama del circuito



8. Referencias

- [1] Molera Solà, Pedro. Electromecanizado. Electroerosión y mecanizado electroquímico. Ed. Marcombo, Ediciones Tecnicas 1989
- [2] Camprubí Graell, Albert. Electro - erosión. Fundamentos de su Física y su Técnica. Ed. Marcombo, Ediciones Tecnicas 2007
- [3] Laboratorio de control y sistemas de fabricación. Introducción a la electroerosión. Universidad de Navarra
- [4] Gandarias, Endika. Microtecnologías: Pasado, Presente y Futuro. Micromanufacturing
- [5] <http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/edm/6-diferencias-entre-macro-y-micro>
- [6] Zamora Vázquez, Angelica. Diseño e implementación de una fuente de voltaje con aplicación a micromanufactura por electroerosión. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009
- [7] <http://www.smaltec.com/applications.cfm>
- [8] http://www.mountainmolds.com/pics/omega_gage.jpg
- [9] http://www.aculon.com/cms/images/su8_litografia1.jpg
- [10] Shinya Hayakawa, Masahiro Takahasi, Fumihito Itoigawa, Takashi Nakamura. Study on EDM phenomena with in-process measurement of gap distance. Journal of Materials Processing Technology 149 (2004) 250-255
- [11] Shawn P. Moylan, Srinivasan Chandrasekar, Gilbert L. Benavides. High-Speed Micro-Electro-Discharge Machining. SANDIA REPORT Unlimited Release Printed September, 2005
- [12] <http://www.scielo.br/img/revistas/jbsmse/v29n4/a04fig02.gif>
- [13] Jae Won Jung, Seok Hoon Ko, Young Hun Jeong, Byung-Kwon Min, Sang Jo Lee. Real time Gap Control for Micro-EDM: Application in a Microfactory. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Vol.9 No.1 pp. 3-6
- [14] Ming Zhou, Fuzhu Han. Adaptive control for EDM process with a self - tuning regulator. International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) 462 - 469
- [15] Xiaoyou Zhang, Tadahiko Shinshi, Go Kajiwara, Akira Shimokohbe, Yoshihito Imai, Hidetaka Miyake, Takayuki Nakagawa. A 5-DOF controlled maglev local actuator and its application to electrical discharge machine. Precision Engineering 32 (2008) 289-300.
- [16] <http://www.ilustrados.com/publicaciones/multimedia/circui90.gif>
- [17] Ogata, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna, 3ed., Ed. Pearson
- [18] http://www.kalipedia.com/popup/popupWindow.html?tipo=imagen&titulo=Sistema+de+control+en+lazo+cerrado&url=/kalipediamedia/ingenieria/media/200708/21/informatica/20070821klpinginf_38.Ees.LCO.png !
- [19] Ortiz Rodríguez, Floriberto. Modelado y control PD-difuso en tiempo real para el sistema barra-esfera. Tesis de Maestría, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 2004
- [20] J. Ross, Timothy, Fuzzy Logic With Engineering Applications. 2da Ed., Ed. John Wiley & Sons, Ltd
- [21] <http://www.newscatech.com/motorsforoem-SQL34.html>
- [22] http://www.newscatech.com/squiggle_overview.html

[23] http://www.newscatech.com/Tracker_overview.html