



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA – MECATRÓNICA

**DISEÑO DE UN GENERADOR DE PULSOS PARA UN SISTEMA DE
MICROMANUFACTURA POR ELECTROEROSIÓN.**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. OMAR AUGUSTO LEÓN HERNÁNDEZ

TUTORES:
DR. ALBERTO CABALLERO RUIZ, CCADET.
M.I. JOSÉ CASTILLO HERNÁNDEZ, CCADET.

COMITÉ TUTORAL:
DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA, CCADET.
M.I. GERMÁN JORGE CARMONA PAREDES, FI.
M.I. ULISES MARTÍN PEÑUELAS RIVAS, FI.

MÉXICO, D.F. AGOSTO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado

Presidente: Dr. Leopoldo Ruiz Huerta

Secretario: M.I. Ulises Martín Peñuelas Rivas

Vocal: Dr. Alberto Caballero Ruiz

1er. Suplente: M.I. José Castillo Hernández

2do. Suplente: M.I. Germán Jorge Carmona Paredes

Lugar donde se realizó la tesis:

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, CCADET.

Grupo de Micromecánica y Mecatrónica, GMM.

UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Alberto Caballero Ruiz

FIRMA

El presente trabajo de tesis fue realizado gracias al apoyo de: el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica con la dirección del Dr. Alberto Caballero Ruiz, el Grupo de Electrónica bajo la tutela del M.I. José Castillo Hernández y el Grupo de Materiales y Nanotecnología a través del M. en C. José G. Bañuelos Muñetón, pertenecientes al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM; aunado a las aportaciones del comité tutorial que en colaboración proporcionaron los medios junto a los recursos necesarios para su ejecución y conclusión; secundado con el mecenazgo del CONACYT.

Agradecimientos

A mi esposa e hija,
a toda mi familia por su apoyo y buenos deseos, especialmente:

A mi madre, por sus palabras de aliento.

A mi padre, asesor incondicional.

Índice

Índice de Tablas y Figuras	iii
Introducción	1
Capítulo 1.- Antecedentes	2
1.1 Procesos de Manufactura	2
1.2 Manufactura por electrodescarga.	3
1.2.1 Primicias de funcionamiento.....	4
1.3 Trabajos previos y líneas de investigación.....	4
1.4 Aplicaciones	7
Capítulo 2.- Planteamiento del problema	8
2.1 Manufactura de piezas pequeñas.....	8
2.2 ¿Por qué EDM?	8
2.3 Objetivo.....	9
2.4 Alcances	9
Capítulo 3.- Marco teórico	10
3.1 EDM vs μ EDM.....	10
3.2 Principio del funcionamiento.....	11
3.3.1 Proceso de descarga eléctrica.....	13
3.3.2 Variantes del proceso EDM.....	14
3.3.2.1 μ EDM por penetración.	15
3.3.3 Conformación de un equipo EDM.....	16
3.3.4 Electrodos para microEDM por penetración.	16
3.3.5 Fluido Dieléctrico.....	17
3.3.6 Tipos de generadores EDM	18
3.4 Control y detección de chispa.....	20
3.4.1 Formación de arcos eléctricos.....	22

Capítulo 4.- Desarrollo de Sistema Propuesto	23
4.1 Requerimientos del sistema	23
4.1.1 Selección del MosFet.....	24
4.1.2 Selección del Driver para MosFet.	24
4.1.3 Control.....	25
4.1.4 Acoplamiento.	25
4.2 Delimitación de parámetros	26
4.3 Consideraciones de diseño.	27
4.4 Validación de componentes.....	28
4.5 Sistemas adicionales	32
4.5.1 Posicionamiento.....	33
4.5.2 Sensado.	33
4.5.2.1 Convertidor Frecuencia – Voltaje	34
4.5.2.2 Comparadores de nivel.....	37
4.6 Integración de etapas	38
4.6.1 Ajuste al sistema de detección.....	40
4.6.2 Resistencia de Carga.....	45
4.6.3 Ciclo de trabajo	47
Capítulo 5. Pruebas y Resultados.....	49
5.1 Puesta en marcha	49
5.1.1 Posicionamiento.....	49
5.1.2 Control de posicionamiento.....	50
5.2 Pruebas por penetración	52
5.2.1 Variación de fuente VEDM	57
5.2.2 Variación ciclo de trabajo.....	60
5.3 Prueba de Estampado.....	61
5.4 Resultados obtenidos.....	63
Conclusiones.....	68
Trabajo a Futuro	69
Referencias	70

Índice de Tablas y Figuras

Figura / Tabla	Página
Tabla 1.1 Procesos de fabricación no convencionales	1
Figura 1.1. Primer prototipo acoplado a un centro maquinado CNC, (1) en azul tanque de trabajo, (2) en amarillo sistema de posicionamiento, (3) en verde detalle de electrodo y (4) en rojo circuito de control.	4
Figura 1.2. Circuito de relajación RC.	5
Figura 1.3. Circuito de detección y control	5
Figura 1.4. Circuito de conmutación, detección y control EDM.	5
Tabla 1.2. Combinaciones de dieléctrico y materiales de electrodos.	6
Figura 1.5. Detalle de motor piezoeléctrico en blanco, y detalle de control PID en azul	6
Figura 1.6. Detalle de circuito RC. En rojo banco de resistencias con capacitor, en amarillo circuitos de control, en azul lógica de control.	6
Figura 1.7. Microsensor con ranuras de 0.051 mm (izquierda) y Matriz de extrusión 25 mm (derecha).	7
Figura 3.1. Proceso de manufactura por EDM	11
Figura 3.2. Cráter de descarga EDM	11
Figura 3.3. Proceso de desbaste originado por los cráteres superpuestos generados durante el proceso. a) Cráter de descarga b) Topografía de la superficie c) Partículas removidas	12
Figura 3.4. Principales etapas en el proceso de EDM	13
Figura 3.5. Principales variantes de manufactura por micro EDM	15
Figura 3.6. Otras variantes de manufactura por micro EDM	15
Figura 3.7. EDM por penetración o hundimiento	15
Figura 3.8. Representación de las partes de un equipo micro EDM	16
Figura 3.9. a) Aplicación indirecta de dieléctrico, b) y c) aplicación directa de dieléctrico	17
Figura 3.10. Generador estático de pulsos	18
Figura 3.11. Comparación entre dispositivos de conmutación	19
Figura 3.12. Generador de relajación	19
Tabla 3.1. Acciones de control en función del GAP	20
Figura 3.13. Condiciones eléctrica en un equipo micro EDM	21
Figura 3.14. Detalle de tiempos en arco	22
Diagrama 4.1 Sistema de conmutación propuesto	23
Figura 4.1. Forma de onda de tiempos de conmutación MosFet	24
Tabla 4.1. MosFet's y sus características	24
Tabla 4.2. Familia LS vs HC	25
Figura 4.2. Pruebas de cable coaxial armado en columna 1 y de cable coaxial comercial en columna 2	26
Tabla 4.3. Características de dispositivos de circuito de conmutación.	27
Figura 4.3. Detalle de circuito generador estático de pulsos.	27
Figura 4.4. Gen. F., optoacoplador y lógica TTL a 100kHz.	28
Figura 4.5. Gen. F., optoacoplador y lógica TTL a 1MHz	28
Figura 4.6. Gen. F., optoacoplador y lógica TTL a 4MHz.	28
Figura 4.7. Gen. F., optoacoplador y lógica TTL a 5MHz	29
Figura 4.8. Gen. F., optoacoplador y lógica CMOS a 100kHz.	28
Figura 4.9. Gen. F., optoacoplador y lógica CMOS a 1MHz.	28
Figura 4.10. Gen. F., optoacoplador y lógica CMOS a 4MHz.	28
Figura 4.11. Gen. F., optoacoplador y lógica CMOS a 5MHz.	29
Figura 4.12. Driver, Gate e I_{DRAIN} a 1 kHz.	29

Figura 4.13. Driver, Gate e I_{DRAIN} a 100 kHz.	29
Figura 4.14. Driver, Gate e I_{DRAIN} a 300 kHz	29
Figura 4.15. Driver, Gate e I_{DRAIN} a 2 MHz.	29
Figura 4.16. Recomendaciones de fabricante	30
Figura 4.17. Ferritas supresoras de EMI para cableado	30
Figura 4.18. Conmutación a 40 kHz sin ferrita.	30
Figura 4.19. Conmutación a 40 kHz con ferrita	30
Figura 4.20. Conmutación a 100 kHz sin ferrita	31
Figura 4.21. Conmutación a 100 kHz con ferrita	31
Figura 4.22 Conmutación a 420 kHz sin ferrita	31
Figura 4.23 Conmutación a 420 kHz con ferrita.	31
Figura 4.24 Conmutación a 1MHz sin ferrita.	31
Figura 4.25. Conmutación a 1MHz con ferrita	31
Figura 4.26. Conmutación a 2MHz con ferrita	32
Figura 4.27. Conmutación a 3MHz con ferrita	32
Tabla 4.4. Configuración de dispositivos	32
Figura 4.28. ARDUINO y motor piezoeléctrico.	33
Figura 4.29. Detección de condiciones EDM	34
Tabla 4.5. Velocidades originales de respuesta de sistema de sensado.	34
Tabla 4.6. Convertidores de frecuencia a voltaje	35
Figura 4.30. Frente PCB convertidor F/V	35
Figura 4.31. Reverso PCB convertidor F/V	35
Figura 4.32. Prueba PCB convertidor F/V	35
Figura 4.33. Frente y reverso de circuito impreso para convertidor F-V	36
Tabla 4.7. Combinación de parámetros Convertidor F/V convertidor. F-V	36
Grafica 4.1. Linealidad de salida convertidor F/V	37
Tabla 4.8. Selección de comparadores.	37
Figura 4.34. Detalle en osciloscopio de la aplicación de histéresis en comparadores.	38
Figura 4.35. Esquemático de etapas reunidas.	38
Figura 4.36. PCB de generador de pulsos y señales de control	38
Figura 4.37. Circuito general del generador estático y sensado.	39
Tabla 4.9. Puntos de prueba en PCB.	39
Figura 4.38. Comprobación de circuito oscilador, azul oscuro señal de generador de funciones a 500kHz, azul claro salida de optoacoplador, morado salida driver, verde GATE de MosFet.	39
Figura 4.39. Medición de voltaje de GAP en fuente EDM, izq. en generador RC, der. en generador de pulsos.	40
Figura 4.40. Medición de voltaje de GAP en electrodo (DREN)	40
Figura 4.41. Comprobación de puntos de prueba a 500kHz, azul oscuro señal de GATE, azul claro salida de comparador de frecuencia, morado salida comparador de corto circuito, verde corriente de DREN.	41
Figura 4.42. Implementación de resistencia de Shunt	41
Figura 4.43. Ancho de pulso en condición de corto circuito.	42
Tabla 4.10. Niveles lógicos de entrada	42
Figura 4.44. Detalle de pistas de PCB	43
Figura 4.45. Detalle de componentes de PCB	43
Figura 4.46. Distorsión de señales, azul oscuro señal de GATE, morado salida de comparador de frecuencia, azul claro salida comparador de corto circuito.	43
Figura 4.47. Distorsión de señales al simular un corto circuito, azul oscuro señal de GATE, morado salida de comparador de frecuencia, azul claro resistencia de Shunt.	44

Figura 4.48. Comprobación de conmutación entre DREN y SOURCE.	44
Figura 4.49. Sustitución de resistencia de carga (aluminio)	45
Figura 4.49. Arriba sustitución de resistencia de carga (aluminio), abajo sustitución de resistencia de Shunt (cerámica).	45
Figura 4.50. Gen. Fun. TTL, 1MHz, ciclo trabajo 175ns	46
Figura 4.51. TP1 Salida de optoacoplador (amplitud 5V)	46
Figura 4.52. TP2 Salida de Driver (amplitud 15V)	46
Figura 4.53. TP3 GATE MosFet (amplitud 10V)	46
Figura 4.54. TP4 Censado de señal de frecuencia (5V) en Dren de MosFet	46
Figura 4.55. TP5 Censado de señal de corto circuito (2.8V) en resistencia de Shunt (sin corto)	46
Figura 4.56. TP5 Censado de señal de corto circuito (10V) en resistencia de Shunt (con corto)	46
Figura 4.57. TP6 Salida de comparador de corto circuito (referencia a 5V, sin generar corto)	46
Figura 4.58. TP6 Salida de comparador de corto circuito (referencia a 5V, con corto)	47
Figura 4.59. JP1 Salida de multivibrador (referencia a 3.5V, con corto)	47
Figura 4.60. TP7 Salida de comparador de frecuencia	47
Figura 4.61. JP2 Salida de convertidor F/V, 5V a 1MHz	47
Figura 4.62. Detalle de ciclos de trabajo a) típico (50% activo y 50% inactivo), b) mínimo (17% activo y 83% inactivo).	48
Figura 5.1. Sistema de posicionamiento básico.	49
Figura 5.2. Servomotor lineal.	49
Figura 5.3. Detalle de porta-electrodo y electrodo	50
Figura 5.4. Control de posicionamiento.	50
Tabla 5.1. Modo 1 de control automático.	51
Tabla 5.2. Modo 2 de control automático.	51
Figura 5.5. Diagrama de control ON-OFF y lógica de condiciones micro EDM	52
Figura 5.6. Puesta en marcha de dispositivos.	52
Figura 5.7. Micro EDM en acción.	53
Figura 5.8. Detalle de sonda de corriente en electrodo	53
Figura 5.9. Detalle en microscopio de primer maquinado	54
Figura 5.10. Corto circuito a 100V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V).	54
Figura 5.11. Corto circuito a 90V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM} .	54
Figura 5.12. Corto circuito a 80V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM} .	54
Figura 5.13. Corto circuito a 70V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM} .	54
Figura 5.14. Corto circuito a 60V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM} .	55
Figura 5.15. Corto circuito a 50V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM} .	55
Figura 5.16. Corto circuito a 40V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM} .	55
Figura 5.16. Corto circuito a 40V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM} .	55
Figura 5.18. Corto circuito a 20V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM} .	55
Figura 5.19. Corto circuito a 10V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM} .	55
Figura 5.20. Grafica de resultados de corto circuito a diferentes V_{EDM}	56

Tabla 5.3. Señal de corto circuito a diferentes voltajes EDM	56
Figura 5.21. Micro descargas con un voltaje EDM de 100V	57
Figura 5.22. Micro descargas con un voltaje EDM de 100V	57
Figura 5.23. Primera muestra de micro electroerosión en acero inoxidable con un voltaje EDM de 100V	57
Figura 5.24. Pruebas de microelectroerosión con V_{EDM} de 20V a 100V	57
Figura 5.25. Detalle de microscopio	58
Figura 5.26. Detalle de microscopio $V_{EDM}=100V$	58
Figura 5.27. Detalle de microscopio $V_{EDM}=100V$, sin bomba	58
Figura 5.28. Detalle de microscopio $V_{EDM}=90V$	58
Figura 5.29. Detalle de microscopio $V_{EDM}=80V$	58
Figura 5.30. Detalle de microscopio $V_{EDM}=70V$	59
Figura 5.31. Detalle de microscopio $V_{EDM}=60V$	59
Figura 5.32. Detalle de microscopio $V_{EDM}=50V$	59
Figura 5.33. Detalle de microscopio $V_{EDM}=40V$	59
Figura 5.34. Detalle de microscopio $V_{EDM}=30V$	59
Figura 5.35. Detalle de microscopio $V_{EDM}=20V$	59
Figura 5.36. Menor amplitud de descargas $V_{EDM}=50V$	60
Figura 5.37. Aparición de arcos eléctricos $V_{EDM}=50V$	60
Figura 5.38. Detalle de maquinado con ciclo de trabajo al 14.2%	60
Figura 5.39. Daño en PCB con ciclo de trabajo al 30%	60
Figura 5.40. Detalle de nuevo electrodo con logotipo a maquinar y proceso de μ EDM con logotipo 3D después de 5hrs	61
Figura 5.41. Detalle de electrodo	61
Figura 5.42. Detalle maquinado con impurezas	61
Figura 5.43. Detalle de maquinado en el microscopio	62
Figura 5.44. Detalle de maquinado limpio	62
Figura 5.45. Maquinados con $V_{EDM} = 100V$	63
Figura 5.46. Detalle de maquinados con $V_{EDM} = 50V$	64
Figura 5.47. Detalle de maquinados con $V_{EDM} = 100V$	64
Figura 5.48. Rugosidad promedio de 0.241 μ m con $V_{EDM} = 50V$	65
Figura 5.49. Rugosidad promedio de 0.561 μ m con $V_{EDM} = 100V$	65
Figura 5.50. Descarga de energía de 76.5 μ J con $V_{EDM} = 100V$	66
Figura 5.51. 195 μ J de energía máxima de descarga con $V_{EDM} = 100V$	66
Figura 5.52. 10 μ J de energía mínima de descarga con $V_{EDM} = 100V$	66
Figura 5.53. Detección de condición de corto circuito	67
Figura 5.54. Detección de condición descargas	67
Figura 5.55. Detección de condición de arco	67
Figura 5.57. Detalle de electrodo (1mm \varnothing)	67
Tabla 5.4. Parámetros funcionales de operación	67

Introducción

El avance de la tecnología va de la mano con la creación de nuevas técnicas de manufactura, dentro de las cuales destacan la tendencia a la miniaturización. Para hacer frente a esta propensión podemos elegir entre dos opciones: la primera, consiste en el escalamiento de los “macroprocesos” ya existentes, y la segunda es la aplicación de procesos alternativos en los que la estrategia de manufactura es diferente a la de los procesos convencionales.

Actualmente el micromaquinado por electrodescarga es uno de los procesos no convencionales más utilizado en la industria, principalmente para la fabricación de piezas pequeñas, moldes y troqueles; en el cual su mecanismo de eliminación de material es un proceso energético.

Por éste motivo, el grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM), del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM, ha decidido incursionar desde hace algunos años en el estudio y desarrollo de esta tecnología; en específico sobre el micromaquinado por electroerosión (μ EDM), que en el presente trabajo de tesis se enfoca en el control de descargas.

Para poder entender las características del proceso de esta micromanufactura, en el capítulo uno “Antecedentes” se resumirán: los tipos de proceso alternativos, el proceso EDM, los trabajos que preceden ésta investigación y se hará la identificación de las aplicaciones del proceso.

En el capítulo dos “Planteamiento del problema” se resumirán los pormenores del maquinado de piezas pequeñas, se definirá la línea de investigación a seguir, estableciendo con ello el objetivo de trabajo y sus alcances.

A continuación, en el capítulo tres “Marco teórico” se ampliará la información del proceso de electrodescarga, su principio de funcionamiento, variantes del proceso y los sistemas que componen un equipo EDM; con el fin de sentar las bases que nos permita tomar adecuados criterios de diseño.

En el capítulo cuatro “Desarrollo del sistema propuesto” se mostrará paso a paso la integración del prototipo con el cual se pretende satisfacer el objetivo planteado en el capítulo dos, ilustrándose las etapas con los parámetros y criterios de diseño elegidos.

Una vez construido el prototipo, fue necesario implementarlo y ponerlo en marcha por tanto en el capítulo cinco “Pruebas y Resultados” se mostrarán las evidencias de los resultados obtenidos, además se enlistarán los parámetros de operación y se incluirán algunas mediciones de rugosidad encontrados por medio de un microscopio electrónico.

En las “Conclusiones” se indica el cumplimiento del objetivo planteado en función de los resultados obtenidos, así mismo en “Trabajo a Futuro” se presentan las recomendaciones aplicables a esta misma línea de investigación.

Capítulo 1.- Antecedentes

1.1 Procesos de Manufactura

En el transcurso de las últimas décadas, el rápido desarrollo de las industrias de punta (espacial, electrónica, médica, etc.) han impulsado el crecimiento de las microtecnologías, por ejemplo la fabricación de microcanales para la inyección de tinta, así como las micro perforaciones en sistemas de inyección de combustible, sin pasar por alto el maquinado de semiconductores para componentes electrónicos. Además el deseo de una mejor calidad de vida y una alta eficiencia en el trabajo, han sido los impulsores más importantes de ésta innovación de componentes miniatura (dispositivos mecánicos, sensores, actuadores, circuitos integrados, etc.).

Estos avances incursionan en el uso de materiales y aleaciones difíciles de maquinar mediante *procesos convencionales*, que junto a la necesidad de fabricar geometrías cada vez más complejas y a menores escalas, han motivado el desarrollo de nuevas herramientas, maquinaria y procesos de remoción de material¹; a estos se le conoce como *procesos no convencionales*² de maquinado. A continuación en la tabla 1.1 se muestra un resumen de los tipos de procesos convencionales y no convencionales de manufactura [1].

<p>Procesos MEMS: Micromecanizado en volumen. Micromecanizado superficial. LIGA & micro-moldeo.</p> <p>Procesos asistidos energéticamente: Mecanizado por haz láser (LBM). Mecanizado por microelectroerosión (EDM)³ Mecanizado por haz de electrones / iones (IBM). Maquinado por plasma (PBM), Maquinado por haz electrónico (EBM),</p> <p>Técnicas de replicado: Microconformado. Microinyección de plásticos. Estampado de precisión en caliente (hot embossing). MIM (Metal Injection Moulding).</p>	<p>Procesos Químicos: Maquinado químico (CHM), Maquinado electroquímico (ECM). Micro-maquinado electroquímico (ECMM).</p> <p>Procesos aditivos: Fabricación directa (Rapid Manufacturing).</p> <p>Procesos mecánicos (Maquinado por arranque de viruta): Microfresado. Microperforado. Microrectificado. Micromecanizado con diamante. Maquinado por ultrasonido (USM), Maquinado por chorro de agua (WJM), Maquinado por chorro abrasivo (AJM).</p>
---	---

Tabla 1.1 Procesos de fabricación no convencionales

Generalizando, a la micromanufactura le conciernen métodos de fabricación, tecnologías, equipamiento, estrategias de organización y sistemas de manufactura de productos con características que tengan al menos dos dimensiones en el rango submilimétrico.

¹ Cabe mencionar que considerando los materiales utilizados, los procesos de micromanufactura a veces se clasifican como: fabricación a base de materiales con o sin silicio [6] (elemento más abundante en la tierra, después del oxígeno).

² Algunas de las tecnologías que emplean estos procesos son una versión a escala de las macrotecnologías ya existentes, mientras que otros son procesos innovadores y combinan distintos fenómenos tanto físicos como químicos.

³ Micromanufactura por electrodescarga es sinónimo de micromecanizado por electroerosión.

1.2 Manufactura por electrodescarga

Además de ser uno de los primeros procesos de manufactura no convencionales [22] aplicado para la producción, hoy en día, es un proceso de manufactura utilizado en la industria para el maquinado de alta precisión de todo tipo de **materiales conductores**, tales como: metales (incluidas sus aleaciones), grafito, cerámicas y silicio entre otros; sin importar su dureza. Básicamente, hay dos variantes del proceso: electrodescarga por penetración y electrodescarga por corte de hilo. En la primera se reproduce en la pieza de trabajo la forma del electrodo utilizado, mientras que en la segunda un cable o hilo de metal es usado para cortar un contorno programado sobre la pieza de trabajo. La manufactura por electrodescarga por sus siglas en inglés: Electro Discharge Machining, usa como nombre abreviado (EDM), en el caso de penetración es habitual que la abreviatura sea SEDM (sinking EDM) y en el caso del corte por hilo WEDM (wire EDM). [21].

El reducido valor de las fuerzas en el proceso y la baja tasa de remoción de material por descarga (Unit Removal Rate, UR) [24] [25] hacen de la electroerosión un proceso adecuado para el maquinado de piezas con detalles de dimensiones micrométricas. A esta escala en la electroerosión por penetración es referida como “microelectroerosión”, mientras que en el caso de corte por hilo se habla de “microelectroerosión por hilo” [21]. Los electrodos para micromanufactura por corte por hilo pueden ser producidos hasta con un grosor de $30\mu\text{m}$ y los electrodos de hundimiento pueden ser producidos por microelectroconformado con dimensiones de $25\mu\text{m}$. Por esta razón la erosión de la superficie en la pieza de trabajo es mucho más “fina” que la de la superficie de los moldes fabricados por microfresado; en donde para microEDM la rugosidad típica es de 300 hasta 800nm (R_a) [29].

Por lo tanto, el proceso de μEDM es considerado un proceso energético de remoción de material que simplifica la manufactura de metales duros cuando la forma y/o dimensiones son complicadas (relación de aspecto <100 , rugosidad de $0.3\mu\text{m}$ a $1\mu\text{m}$, precisión de $1\mu\text{m}$ a $3\mu\text{m}$, altura máxima de 3mm a 5mm) [30][11], en comparación con la combinación de los movimientos rotativos característicos de los métodos de trabajo convencionales por arranque de viruta, volviéndolo convenientemente adecuado para fabricar principalmente: micromoldes, micropartes para ensambles, elementos para microfluidos y micro-alojamientos “micro-housings” [29].

En los métodos de manufactura la exactitud está ligada a la precisión de la máquina, pero nótese que en los convencionales por elevada que ésta sea, se encuentra supeditada a la capacidad del operador; mientras que en particular para la electroerosión la simplicidad mecánica del equipo y un alto grado de automatización la hacen independiente de este factor [19].

Cronológicamente es un proceso no convencional en el que a pesar que el fundamento del método es conocido desde hace más de 200 años (Priestley, 1786), no fue sino hasta hace 70 años [3] (segunda guerra mundial) que se comenzaron a vislumbrar sus aplicaciones para EDM [19]. Sin embargo los primeros registros⁴ para microEDM datan de los años 90 en los que se reporta su uso para el desarrollo de sistemas micromecánicos, componentes para medicina no-invasiva y micromecanismos para las industrias farmacéutica y química [4]; por lo que es considerada como una de las tecnologías no convencionales de manufactura más usadas [8].

⁴ Las primeras aplicaciones para microEDM fueron para la remoción de herramientas rotas como machuelos, brocas y cortadoras, sin dañar las piezas de trabajo [4].

1.2.1 Primicias de funcionamiento

Existen diversas teorías acerca del principio del proceso, pero es el modelo termoeléctrico el que por la experimentación práctica ha quedado mejor sustentado [21].

Este método energético se basa en la remoción de material por medio de la fusión y vaporización, debidas al calor introducido por una descarga de arco transitoria, es decir, mediante una serie de descargas eléctricas repetitivas (a pequeños intervalos de tiempo), que tienen lugar entre un electrodo denominado “herramienta” y otro denominado pieza de trabajo, en presencia de un fluido dieléctrico que hace posible evacuar las partículas erosionadas (con forma de pequeñas esferas huecas); en donde el control de la descarga define la calidad del maquinado [21] y ésta a su vez su aplicación.

1.3 Trabajos previos y líneas de investigación

El presente trabajo toma como punto de partida para su desarrollo tres trabajos: una tesis previa y dos líneas de investigación paralelas realizadas por el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) del Centro de Ciencias Aplicada y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM, en el área de micro manufactura por electroerosión.

El primer trabajo lleva por título “Diseño e implementación de una fuente de voltaje con aplicación a micro manufactura por electroerosión” donde el autor reporta la incursión en la investigación de las problemáticas que resuelve este tipo de manufactura y sus principales características, una introducción al proceso de generación de una chispa en un medio dieléctrico se comentan las configuraciones típicas (del año 2001 al 2007), sus principales características y algunas de sus aplicaciones. Este trabajo propuso la construcción de un prototipo de máquina electroerosionadora en dos etapas, que tienen en común: la adaptación de un centro de maquinado vertical CNC (con el fin de usar los carros de desplazamiento X, Y, Z, para posicionamiento de electrodos), además utilizar un tanque contenedor PÍREX para el dieléctrico (figura 1.1).

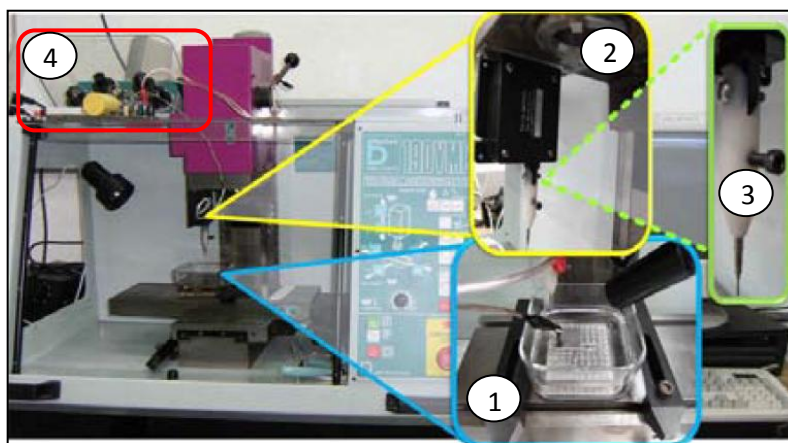


Figura 1.1. Primer prototipo acoplado a un centro maquinado CNC, (1) en azul tanque de trabajo, (2) en amarillo sistema de posicionamiento, (3) en verde detalle de electrodo y (4) en rojo circuito de control.

La primera etapa usa un circuito de relajación RC (figura 1.2) con un arreglo de 4 resistencias de potencia con un valor equivalente de 10Ω , un capacitor $20\ \mu\text{F}$ a 200V de polipropileno y una fuente de alimentación de 30V C.D. Con la cual se definen los parámetros básicos en el EDM resumiéndolos en: corriente de descarga (medida en el electrodo), voltaje de GAP, frecuencia de trabajo de 2.5kHz (valor fijo debido a la carga/descarga del capacitor) y energía de maquinado por descarga de $9\ \mu\text{J}$ (calculada con base a la energía almacenada en el capacitor); así mismo incorpora un circuito de detección de chispa por medio de comparadores y un medio puente H para control de servomotor (figura 1.3).

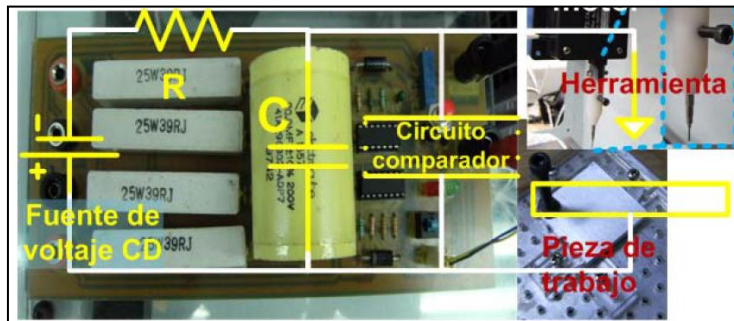


Figura 1.2. Circuito de relajación RC.

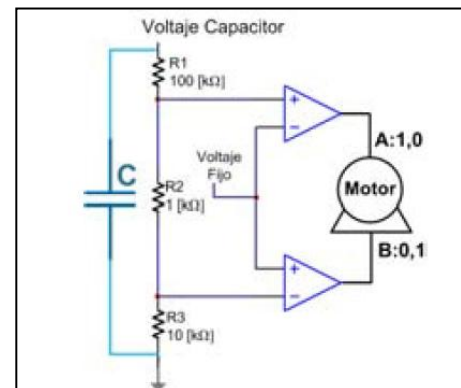


Figura 1.3. Circuito de detección y control

En la segunda etapa se sustituyó el sistema RC por una fuente de conmutación que controla el paso de la corriente por medio de un MosFet con frecuencia de trabajo de 10kHz, fuente de alimentación de 30V-100V C.D., un circuito de detección de chispa por acoplamiento de CD/CD y comparadores, aunado a un control de servomotor por PWM (modulación por ancho de pulso) ver figura 1.4.

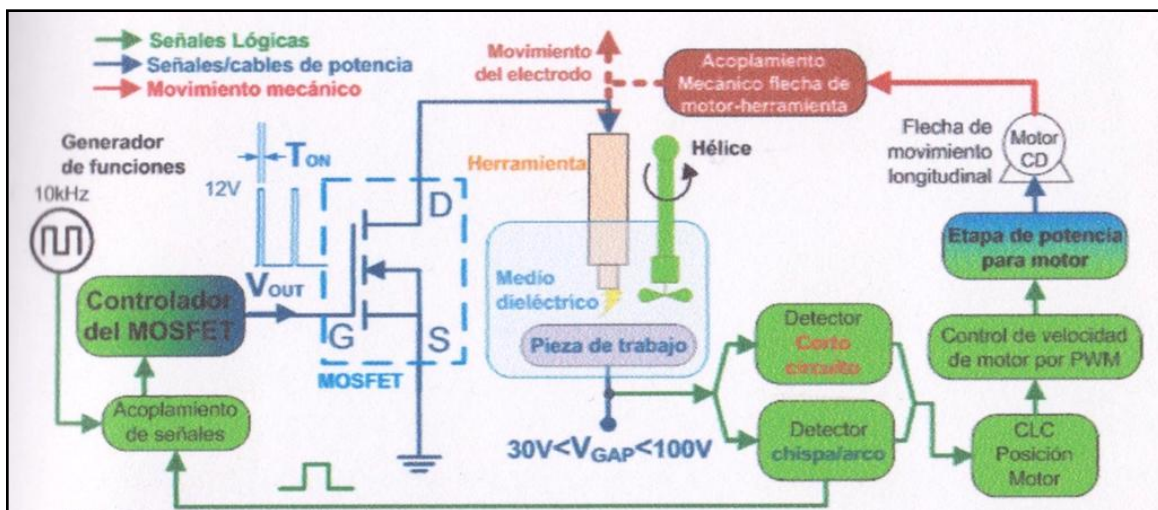


Figura 1.4. Circuito de conmutación, detección y control EDM.

Adicionalmente, se estudió otro trabajo que lleva por título “Investigación de parámetros de operación del proceso de micromanufactura por electrodescarga” el autor explica el proceso de electroerosión su funcionamiento, componentes, diferencias entre la electrodescarga convencional y la microelectrodescarga, así mismo se exponen algunos métodos para controlar el espacio entre el electrodo y la pieza de trabajo (GAP). Proponiendo la utilización de un prototipo de máquina

electroerosionadora en tres etapas, adaptadas a un centro de maquinado vertical CNC como en el primer trabajo de tesis.

Para la primera etapa el autor también retoma la utilización de un circuito de relajación RC con pulsos de corriente a una frecuencia de 2.5KHz, realizando una matriz de experimentos cuantificando la tasa de remoción de material en función del tipo de dieléctrico y el material de los electrodos (tabla 1.2).

No. Exp	Vol. despl. $\times 10^{-3}$ [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	Dieléctrico 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 1.2. Combinaciones de dieléctrico y materiales de electrodos.

En la segunda etapa se sustituyó la resistencia del circuito RC por un banco de resistencias de potencia de 10Ω , obteniendo tres diferentes frecuencias de operación (2.45kHz, 4.699kHz y 6.83kHz), optando trabajar con acero inoxidable en la matriz de experimentación debido a que presenta una mayor dureza.

Para la tercera etapa se reemplazó el servomotor por un motor piezoeléctrico (con resolución de $0.5\mu\text{m}$, permitiendo un GAP de $1\mu\text{m}$ [5]) para el posicionamiento fino de electrodos, más un sensor de posición y un control PID (figura 1.5); así como el antiguo sistema de control de GAP (medio puente H), por un control difuso implementado a través de una tarjeta de desarrollo ARDUINO (figura 1.6).



Figura 1.5 Detalle de motor piezoeléctrico en blanco, y detalle de control PID en azul.

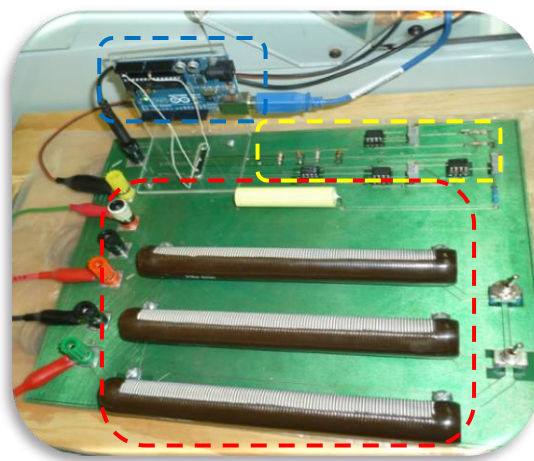


Figura 1.6 Detalle de circuito RC. En rojo banco de resistencias con capacitor, en amarillo circuitos de control, en azul lógica de control.

En la segunda línea de investigación estudiada el autor se enfocó en la filtración y recirculación del fluido dieléctrico durante el proceso de μ EDM. Para contrastar las ventajas de la aplicación de estas características un sistema de micromanufactura.

1.4 Aplicaciones

Las principales aplicaciones del proceso de microelectroerosión son: pequeñas matrices de corte (troqueles) y moldes de precisión [5], componentes de ingeniería médica, sensores, lentes ópticas, relojería (engranajes, perforaciones, etc.), ver detalle en figura 1.7.

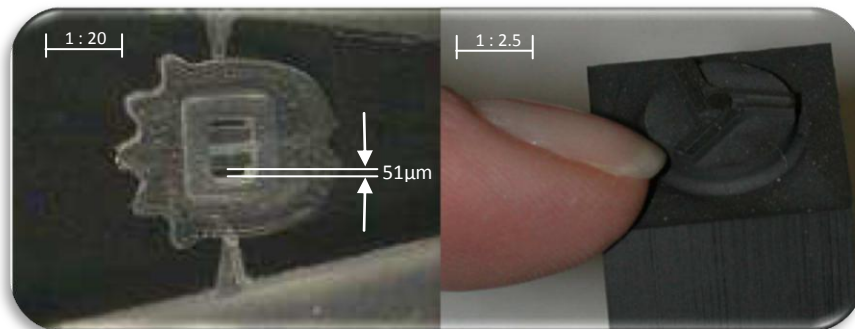


Figura 1.7. Microsensor con ranuras de 0.051 mm (izquierda) y Matriz de extrusión 25 mm (derecha).

El uso de la electroerosión para micromoldes es muy importante porque permite mecanizar metales templados y aleaciones duras que soportan mejor el desgaste que produce la inyección de plásticos.

Compañías como: *Maroney Company* “en California” es proveedora en exclusiva de componentes especiales para el Ministerio de Defensa y Espacio Americano y para la NASA (sistema de propulsión del Pathfinder en Marte). Han fabricado el espectrómetro de masas más pequeño del mundo. El trabajo de esta empresa es la realización de series de 2 a 3 piezas, siendo el límite máximo 100 piezas. Sus productos también están enfocados a sistemas de palpado a distancia, catéteres arteriales, sistema de medida de insulina, etc. [21].

Con sede en Minnesota, *Speciaty Tool & Engineering* desarrolla sistemas para la industria de discos duros, herramientas para endoscopía y hace moldes de 1.5 mm de longitud con paredes de 38 mm utilizando fresado y EDM con tecnologías de proceso de semiconductores [21].

Helmut Christmann GmbH es una empresa alemana especializada en la producción de moldes, punzones y matrices de alta precisión. Así mismo, tiene otras áreas de trabajo en donde asegura obtener radios de esquina de 0.024 mm con rugosidades medias de 0.04 mm. Los sectores para los que trabaja son: electrónica (contactos, conectores, estructuras conductoras), industria relojera (engranajes), sistemas de refrigeración (microbombas), industria aeroespacial (cámaras de combustión de motores) y ortodoncia (implantes) [21].

Capítulo 2.- Planteamiento del problema

2.1 Manufactura de piezas pequeñas

Obsérvese que en gran medida para obtener piezas y componentes de dimensiones estándar se aplican procesos convencionales de manufactura (corte, desbaste, fresado, torneado, rectificado, pulido, embutido, doblado, troquelado, etc.) en los cuales la pieza de trabajo es conformada por una o varias herramientas hechas de materiales más duros y resistentes que de los que está hecha la pieza a maquinar.

Y cuando hablamos de producir microcomponentes es inevitable pensar en recurrir a la adaptación de estos procesos (principalmente miniaturización) pero esto presenta una serie de dificultades y limitaciones relacionadas normalmente con los efectos de escala [28] y las propiedades de los materiales a trabajar, lo que conduce a la investigación de procesos alternativos de manufactura. Debe de considerarse que las características de los nuevos procesos están acotadas por las formas y/o dimensiones distintivas de cada tipo de aplicación e intrínsecamente se busca que el proceso simplifique la labor de manufactura.

2.2 ¿Por qué EDM?

Al estar basado en un proceso energético de manufactura (no convencional) está prácticamente libre de esfuerzos del proceso, es decir, no es afectado por las propiedades mecánicas de la pieza de trabajo tales como el módulo de Young o su dureza, lo que brinda una alta precisión y libertad geométrica; haciéndolo idóneo para la fabricación de componentes sin que influyan los efectos de escalamiento [27].

El proceso μ EDM es aplicado a todo tipo de campos relacionados con micromanufactura, especialmente para producir económicamente pequeñas partes o lotes de microherramientas y micromoldes; además mediante la combinación de diferentes procesos de mecanizado (como el microfresado y la ablación láser) se puede efficientar el costo de producción en masa [2].

La única condición para que un material pueda mecanizarse con este proceso es que sea un conductor eléctrico (conductividad K mínima 0.01 S/cm.) [2]. Dentro de este grupo de materiales se engloban la mayoría de aleaciones (carburos) y los metales utilizados en la industria mecánica (aceros, aluminio, latón, bronce, cobre, titanio, niobio, etc.). Para determinados semiconductores como el Silicio, Germanio y cerámicas conductoras, su dopaje y estructura determinarán la posibilidad de maquinarse.

Es especialmente útil para fabricar entre otros:

- Micro moldes y engranes
- Micro sensores/actuadores
- Micro dispositivos para fluidos
- Implantes médicos.

El Grupo de Micromecánica y Mecatrónica ha desarrollado una fuente de voltaje orientada a procesos microEDM [12], trabajo con el cual se estudia inicialmente su operación a través de un prototipo para realizar maquinados por penetración en el cual los resultados se reportan obtenidos a bajas frecuencias de operación.

Como continuación de dicho trabajo, esta tesis plantea y caracteriza el comportamiento de los parámetros que afectan el proceso, con la finalidad de realizar mejoras en el acabado superficial de las piezas producidas (proponiendo la frecuencia necesaria de operación para trabajar con micromanufactura por EDM, dando flexibilidad a los parámetros de operación a través del diseño e implementación de un dispositivo electrónico, con la capacidad de poder regular la energía del proceso, expresando algunos resultados en función del acabado superficial obtenido).

2.3 Objetivo

Desarrollar un sistema electrónico de control para la generación de descargas eléctricas y su aplicación en procesos de μ EDM.

2.4 Alcances

- 1) Investigar las características del proceso EDM y microEDM.
- 2) Identificar los tipos de fuentes generadoras de descarga aplicados a EDM.
- 3) Desarrollar un prototipo electrónico que controle las descargas en microEDM.
- 4) Identificar los parámetros que influyen en el prototipo electrónico.
- 5) Realizar pruebas de funcionamiento.
- 6) Reportar los límites de trabajo del sistema electrónico desarrollado.
- 7) Proponer mejoras y trabajo a futuro del sistema propuesto.

Capítulo 3.- Marco teórico

3.1 EDM vs μ EDM

Conceptualmente el proceso de microEDM no difiere de la EDM convencional [4], sin embargo presentan diferencias tanto en el proceso como en los medios utilizados.

1. En un proceso convencional de electroerosión la energía utilizada en cada descarga es del orden de Joules (0.05 a 1 Joules), mientras que en el proceso de microelectroerosión la energía utilizada en cada descarga es del orden de los **microJoules (< 50 μ J)** [2].
2. La diferencia más notable entre microEDM y EDM es que el radio del canal de plasma que se forma en cada descarga deja de ser mucho menor que el tamaño del electrodo, llegando a ser del mismo orden de magnitud. Esto es, el electrodo al ser tan pequeño presenta una capacidad limitada de conducción de calor y una masa pequeña para disipar el calor formado en la zona de descarga, por tanto, una chispa con energía excesiva da lugar a la rotura del hilo o a la volatilización del electrodo en penetración, siendo necesario regular la energía de las descargas. [23].
3. Simultáneamente a las propiedades energéticas el efecto de la presión del dieléctrico sobre el electrodo varía substancialmente respecto al caso normal ya que el electrodo aunque presenta un área de presión menor también presenta una rigidez inferior por lo que el comportamiento del electrodo ante la acción del dieléctrico es más “sensible” y resulta además más difícil evacuar el material eliminado ya que el GAP es mucho más reducido (los fluidos utilizados presentan la misma viscosidad, densidad, etc.). En cada descarga el electrodo se desgasta en mayor proporción que en la electroerosión convencional y queda debilitado, siendo la reducción de la sección efectiva proporcional a la energía de descarga. **En microEDM se busca reducir al máximo la energía de cada chispa con el fin de controlar la cantidad de material removido por descarga** y utilizar electrodos de diámetros muy pequeños [24] [25].
4. El compromiso entre productividad, precisión y reducción de la energía de descarga debe estimarse según la aplicación: en requerimientos de mayor precisión se deberá reducir la energía y cuando sea necesario alcanzar mayor productividad la energía por pulso deberá incrementarse; de estas comparaciones se pueden resumir [4] algunos puntos clave para trabajar con electrodos pequeños:
 - Controlar la energía por pulso.
 - Aumentar la estabilidad del GAP, con el sistema de control (evitar fluctuaciones en la descarga).
 - Aumentar la precisión de posicionamiento de la máquina.

3.2 Principio del funcionamiento

El EDM es un proceso de conformado térmico no mecánico, con el cual se remueve material por medio de descargas eléctricas temporales y espaciadas entre la pieza de trabajo y el electrodo. La frecuencia del **proceso de descarga** causa la fundición y vaporización de material en la superficie de los **electrodos** y para aumentar la remoción de material opera dentro de un **fluido** no conductor (fluido dieléctrico) ver figura 3.1.

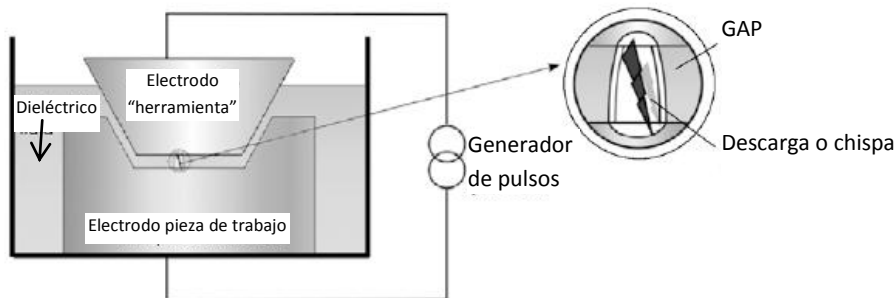


Figura 3.1 .Proceso de manufactura por EDM [3]

Durante el maquinado el electrodo y la pieza de trabajo están posicionados de tal forma que el “espacio de trabajo” (GAP) entre ellos está ocupado con fluido dieléctrico y residuos. Se aplica un voltaje que dependiendo de ancho del GAP y la conductividad del fluido dieléctrico causa una expansión energética del canal de plasma y un flujo de corriente después de superar la resistencia dieléctrica del fluido, ver figura 3.2.

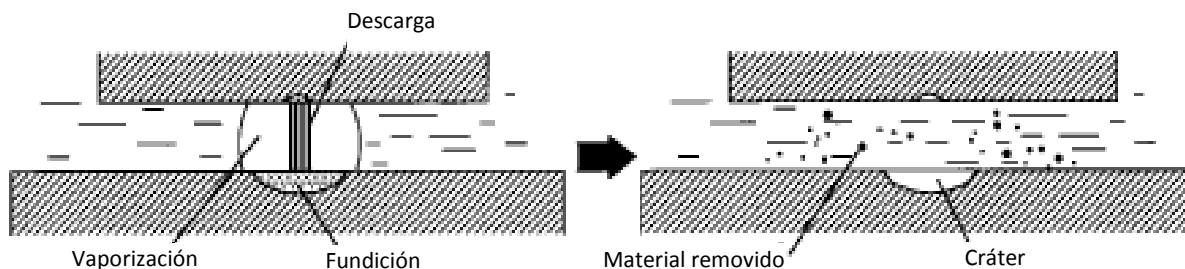


Figura 3.2. Cráter de descarga EDM [3]

La temperatura aproximada dentro del canal de plasma cuando se efectúan los procesos de derretimiento (fusión) y vaporización es de 10,000K.

Al cortar la corriente de la descarga eléctrica, la materia fundida hace erupción abruptamente junto con una implosión del canal de plasma. El resultado de una sola descarga es un cráter en la superficie de los electrodos.

Dependiendo de los parámetros como: tiempo de descarga, corriente de descarga y tipo de dieléctrico, el diámetro típico de un cráter variará alrededor de $1\mu\text{m} \leq a \leq 100\mu\text{m}$.

Y por medio de un **generador de pulsos** se define el tiempo y corriente de descarga que pasará a través de los electrodos.

Nótese que la topografía de la superficie específica del EDM es causada por una multitud de cráteres de descarga superpuestos y el material removido generalmente consiste en partículas de formas esféricas (ver figura 3.3).

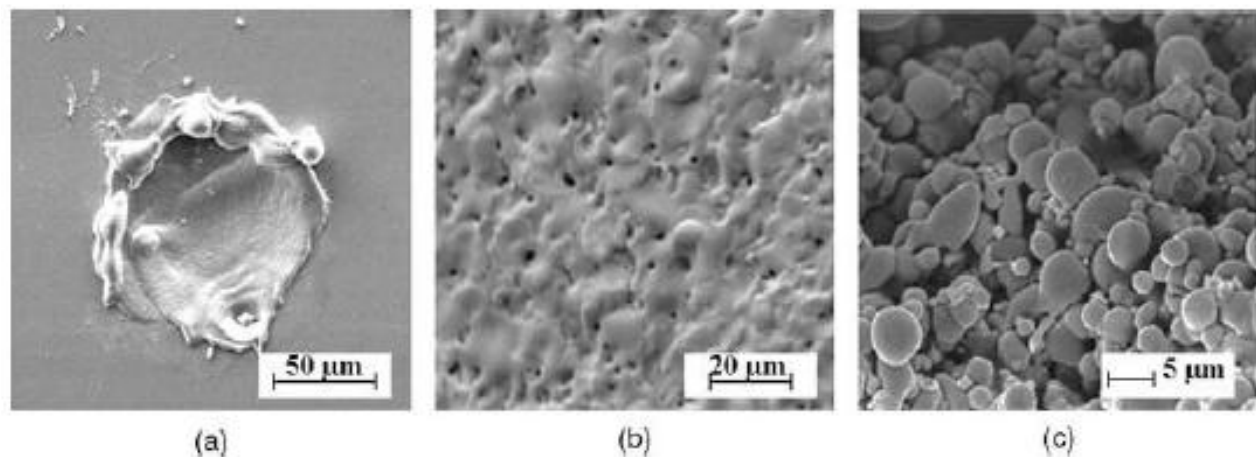


Figura 3.3. Proceso de desbaste originado por los cráteres superpuestos generados durante el proceso. a) Cráter de descarga b) Topografía de la superficie c) Partículas removidas

3.3.1 Proceso de descarga eléctrica

Durante el desarrollo de una descarga se pueden diferenciar claramente cuatro fases (figura 3.4):

1. La fase de creación
2. La fase de ignición
3. La fase de descarga
4. La fase de ruptura

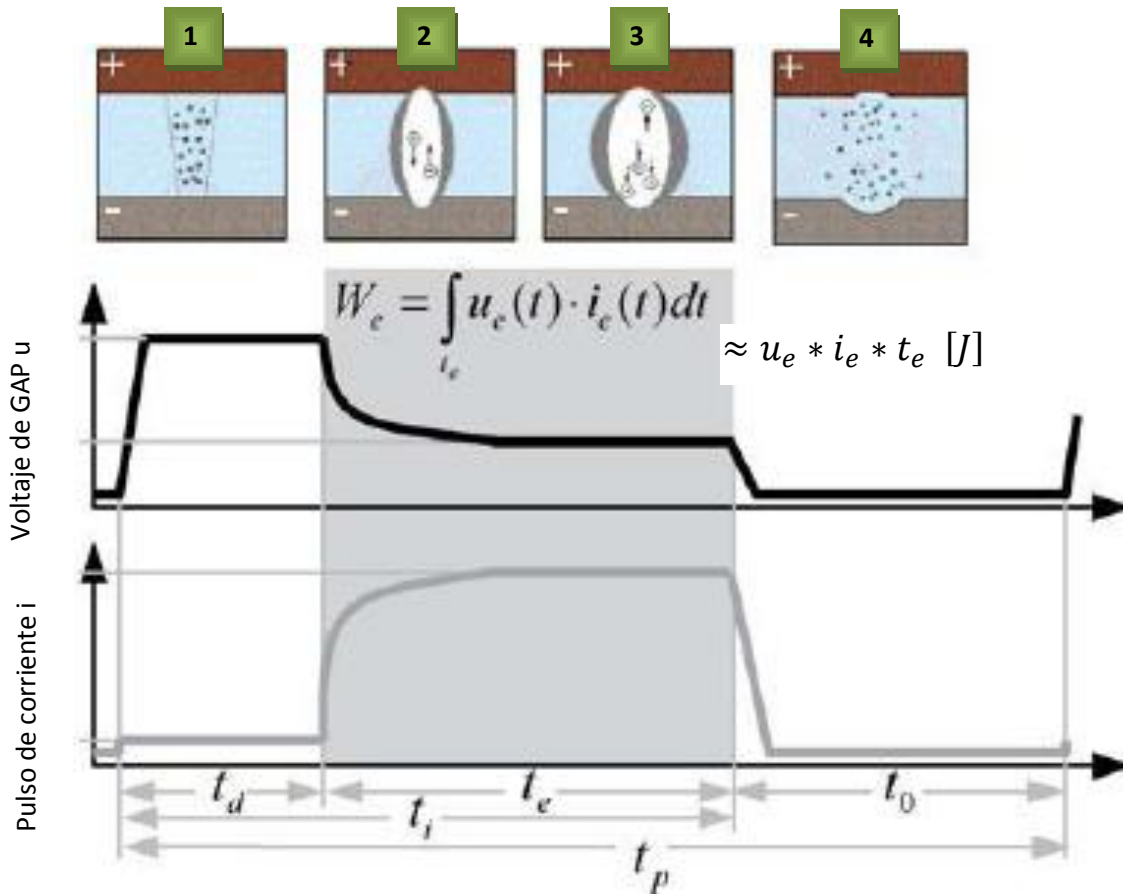


Figura 3.4. Principales etapas en el proceso de EDM

Durante la etapa de **CREACIÓN** de la descarga un voltaje de circuito abierto V_0 es aplicado entre el electrodo y la pieza de trabajo. Este voltaje tiene un nivel de 20V a 400V dependiendo del proceso de maquinado, causando un fuerte campo eléctrico en el GAP en donde se lleva a cabo la aceleración de las cargas libres existentes dentro del fluido dieléctrico (a lo largo de las líneas del campo). Adicionalmente ocurre una emisión de electrones fuera del cátodo (emisión de campo), es decir, los electrones se mueven hacia el ánodo y los iones son atraídos por el cátodo generando un flujo de corriente. Como consecuencia el fluido dieléctrico es calentado hasta temperatura de ebullición, entonces se vaporiza y como resultado se crea el canal de plasma.

En la fase de IGNICIÓN los electrones generan una ionización de partículas o moléculas neutras las cuales incrementan rápidamente el número de portadores de carga y pasando a un determinado umbral causan que la resistencia del fluido dieléctrico sea rebasada. La fase está directamente ligada al cambio de corriente y voltaje, con la creación de un canal de descarga el voltaje de circuito abierto V_o se reduce a un voltaje de descarga V_e , el cual depende de la resistencia óhmica en el GAP y una corriente de descarga I_e comienza a fluir en las superficies del canal de plasma (comúnmente la corriente I_e de descarga para μ EDM está en el rango de 1mA y máximo 1A).

Durante la fase de DESCARGA la energía eléctrica se transforma en energía térmica debido al impacto cinético de los portadores de carga en las superficies de los electrodos. Debido a las diferentes masas de las partículas la cantidad de electrones en el ánodo es menor que la creada por los iones en el cátodo, por lo que el material del ánodo es principalmente removido al inicio de esta fase. Para tiempos largos de descarga t_e la remoción de material de ánodo decrece hasta cero, mientras la remoción de material del cátodo se incrementa. Este fenómeno es conocido como "efecto de polaridad", si el μ EDM opera con tiempos de descarga de muy corta duración ($t_e = 10\text{ns}$ hasta $t_e = 1\mu\text{s}$) el electrodo debe ser polarizado como cátodo para reducir el desgaste del mismo.

La primera remoción de material se lleva a cabo durante la fase de RUPTURA. Al apagarse la fuente de voltaje EDM (por conmutación) la corriente de descarga causa el colapso del canal de plasma, enseguida una baja presión inducida reduce la temperatura de ebullición del material derretido en la superficie de los electrodos y el material es vaporizado o erupciona explosivamente debido a las fuerzas hidromecánicas. La cantidad de material removido depende de la cantidad de energía en la descarga W_e , la cual está definida por:

$$W_e = \int_0^{t_e} V_e(t) i_e(t) dt \cong V_e \cdot i_e \cdot t_e \quad [\mu J]$$

Después de la descarga el GAP se desioniza y limpia de partículas por la circulación del fluido dieléctrico durante el intervalo de tiempo t_o del pulso. Este ancho de pulso es generalmente establecido por ser tan largo como la duración del t_i .

3.3.2 Variantes del proceso EDM

Las diferentes variantes de μ EDM lo hacen un proceso de maquinado muy flexible y existen tres de gran relevancia para la industria (figura 3.5).

- a) **Microhundimiento de troquel:** El diseño del electrodo es usado para manufacturar formas libres y en 3 dimensiones.
- b) **Maquinado por descarga eléctrica con microalambres:** Operación para cortar contornos definidos mediante el uso de un alambre fino como electrodo.
- c) **Taladro por descargas microeléctricas:** opción especial de microhundimiento de troquel que opera con un electrodo giratorio para producir micro perforaciones por ejemplo, las boquillas para sistemas de inyección de combustible.

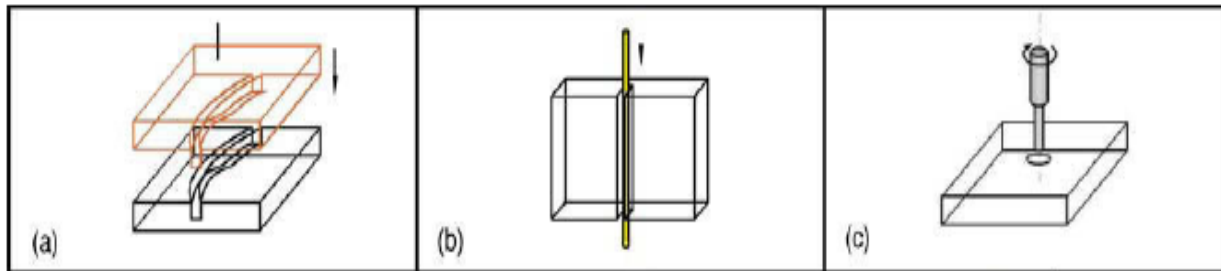


Figura 3.5. Principales variantes de manufactura por micro EDM

También hay procesos con menos relevancia como lo son: (Figura 3.6):

- d. **Fresado por micro descarga eléctrica (μ EDM-milling)**
- e. **Esmerilado por micro descarga eléctrica (μ EDM-Grindig)**
- f. **Esmerilado por descarga eléctrica de micro alambre (μ WEDG)**

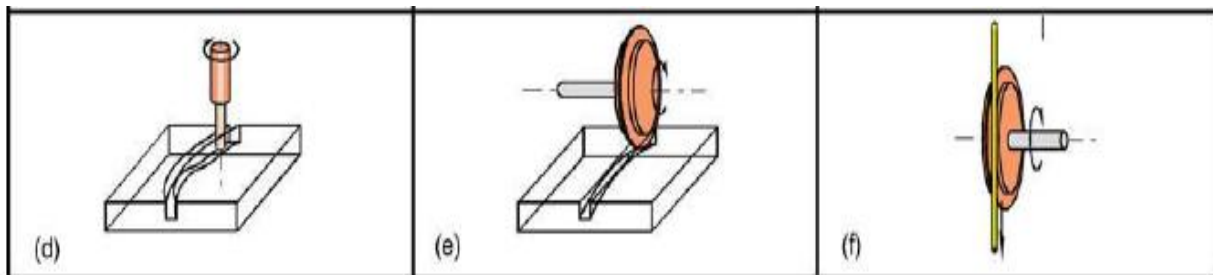


Figura 3.6. Otras variantes de manufactura por micro EDM

En general las variaciones en el proceso de μ EDM están ganando importancia en el micromaquinado por que con esta opción de electrodos con forma 3D no hay necesidad de maquinar nada más.

3.3.2.1 μ EDM por penetración

Este proceso es caracterizado por replicar la forma que tiene el electrodo en la pieza de trabajo (figura 3.7). La trayectoria del movimiento del electrodo es básicamente sólo axial y el maquinado es realizado en numerosas etapas para cubrir una gran superficie y la calidad geométrica.

Para permitir una adecuada tasa de remoción de material las máximas frecuencias de los pulsos generados f_p son de 10 MHz. Además de una duración de descarga muy corta el electrodo se polariza como cátodo y el de trabajo del ánodo [2].

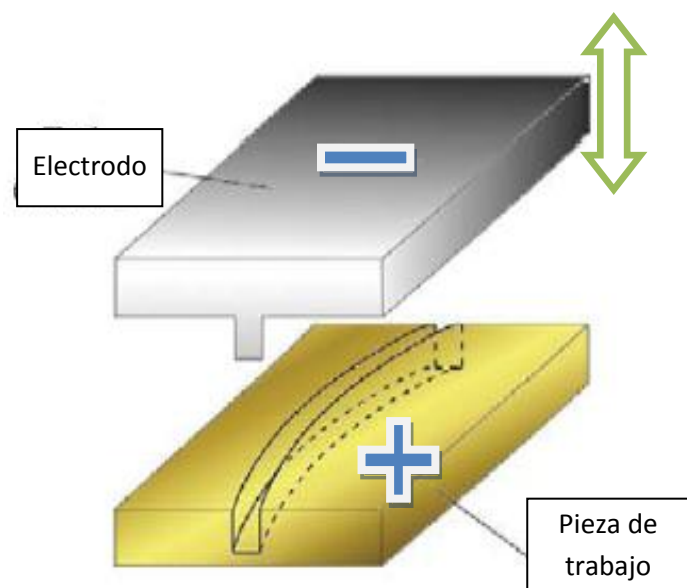


Figura 3.7. EDM por penetración o hundimiento

3.3.3 Conformación de un equipo EDM

Las partes que constituyen en general un equipo de micro EDM [2] se muestran a continuación (figura 3.8)

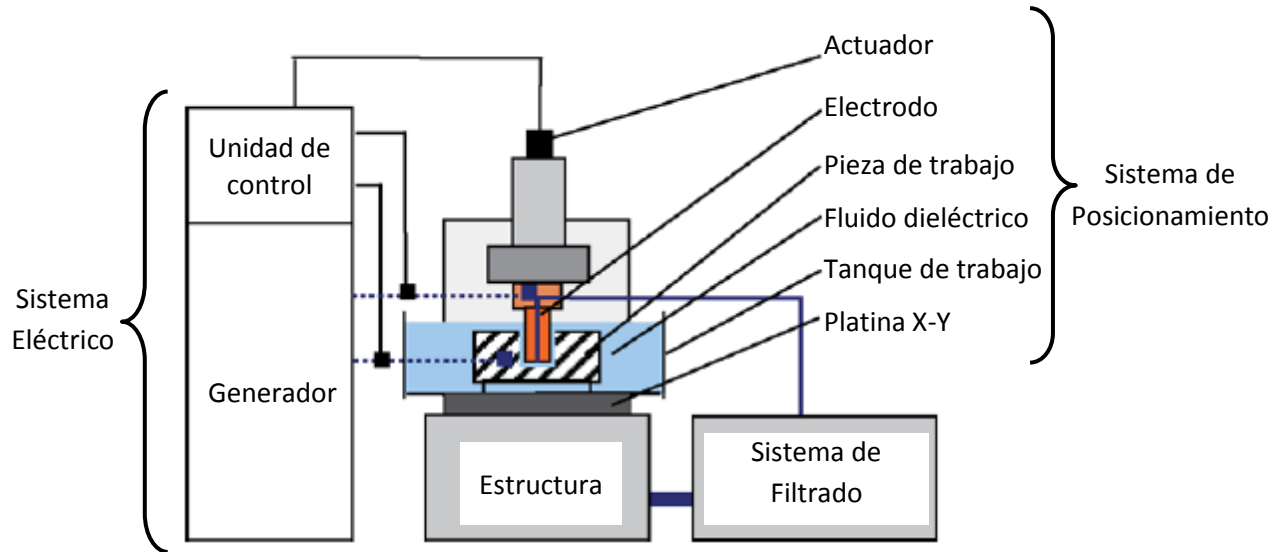


Figura 3.8. Representación de las partes de un equipo micro EDM

3.3.4 Electrodo para microEDM por penetración

En los equipos de electroerosión por penetración los materiales utilizados habitualmente para el electrodo son: grafito, tungsteno y carburos cementados, porque tienen una alta temperatura de fusión así como una alta conductividad eléctrica y térmica. Para microEDM la exactitud de la forma en la pieza de trabajo es principalmente influenciada por el desgaste del electrodo; observándose que los electrodos elaborados con estos materiales presentan un desgaste relativo del 30% al incrementar la intensidad del voltaje; el cual es notorio en los bordes de las estructuras **lo que da lugar a otro tipo de materiales como el cobre.**

En microEDM se pueden encontrar electrodos hechos de estos mismos materiales con diámetros de hasta $\varnothing 0.20$ mm. Por debajo de esta medida los de cobre no son recomendables ya que es difícil maniobrar con ellos (introducirllos en soportes y guías) sin deformarlos plásticamente.

Los de latón son una buena opción por precio para trabajos como taladros rectos, aunque la manipulación es complicada no son adecuados para realizar trabajos de fresado ya que son poco rígidos e introducen errores en el mecanizado.

Los de grafito también son una buena opción ya que es muy fácil de mecanizar, pero se debe considerar su fragilidad al manipularlo.

Los de tungsteno son los únicos que pueden encontrarse en dimensiones inferiores a $\varnothing 0.20$ mm (hasta $\varnothing 0.10$ mm). Su manipulación es complicada en las dimensiones más pequeñas pero la elevada rigidez del tungsteno facilita pasar el electrodo por los soportes y guías de sujeción.

En resumen el material elegido debe ser fácil de maquinar por que la característica de todas las formas de los electrodos es que son hechas con un proceso de fresado.

3.3.5 Fluido Dieléctrico

Si las descargas eléctricas se diesen en un gas o en aire el efecto erosivo sería muy pequeño, ya que la descarga se ramificaría, perdiéndose todo su efecto [20]; por lo tanto el fluido dieléctrico tiene muchas ventajas en el proceso EDM.

1. Aísla al electrodo de la pieza de trabajo para lograr una elevada densidad de corriente en el canal de plasma.
2. Enfría la superficie caliente de los electrodos.
3. Ejerce una presión contraria a la expansión del canal de plasma.
4. Al limpiar o irrigar con fluido dieléctrico la zona de GAP remueve las partículas después del proceso de descarga y previene el establecimiento de vínculos (vías) entre las partículas que podrían causar interrupciones por corto circuito en el proceso o un daño excesivo en la superficie de los electrodos.

En general se utilizan agua desionizada y fluidos basados en hidrocarburos (reduce el tamaño del GAP y la ramificación en las descargas, pero implica mayores problemas de limpieza).

Lo habitual es utilizar agua desionizada en electroerosión por hilo y aceite en las máquinas de electroerosión por penetración convencionales. En el caso de microelectroerosión, ambos dieléctricos se llegan a utilizar en ambas modalidades del proceso.

El aceite tiene una mayor resistividad respecto al agua lo que facilita la generación de descargas de menor energía (mejorando el acabado superficial) y permite que el GAP sea menor que en el agua (de 2 a 20 μm), además no oxida la pieza de trabajo y no sufre electrolisis [4].

En μEDM la circulación del dieléctrico a través del electrodo es prácticamente imposible a causa de sus diminutas dimensiones, sin embargo la circulación se puede realizar por estrategias indirectas (figura 3.9).

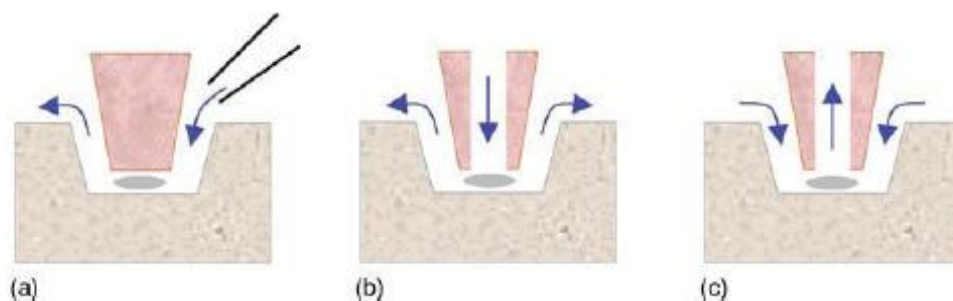


Figura 3.9. a) Aplicación indirecta de dieléctrico, b) y c) aplicación directa de

3.3.6 Tipos de generadores EDM

Las máquinas modernas de μ EDM ocupan uno de dos tipos de generadores [2] para cumplir con un amplio rango de aplicaciones.

1. Generador estático de pulsos Fig. (3.10):

- Caracterizado por una fuente de corriente o voltaje controlado la cual genera pulsos de descargas regulares e individuales.
- Su fuente de energía está conectada directamente a las vías de descarga por medio de **elementos electrónicos de conmutación**.
- La forma de pulso, la duración t_i del pulso y la duración de la descarga t_e pueden ser ajustados y controlados para la realización de un relativo bajo desgaste o consumo del electrodo.
- En contraste con los generadores de relajación los generadores de pulso estático permiten el ajuste del tiempo t_e y corriente I_e de descarga. Además son normalmente usados para procesos intensivos de remoción de material (en donde el tiempo t_e y la corrientes I_e son amplios).

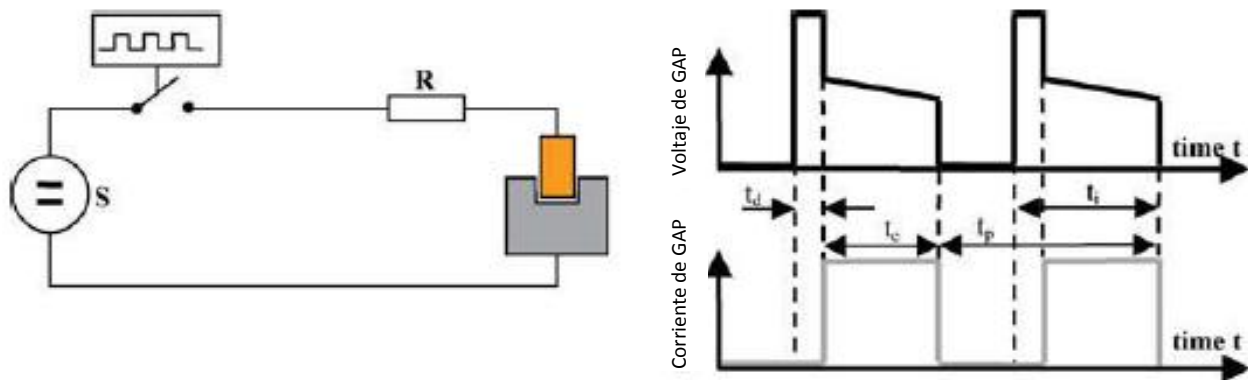


Figura 3.10. Generador estático de pulsos

Los posibles elementos electrónicos para conmutación en un generador estático de pulsos son comparados en la figura 3.11, y su selección estará en función de las características o especificaciones requeridas.

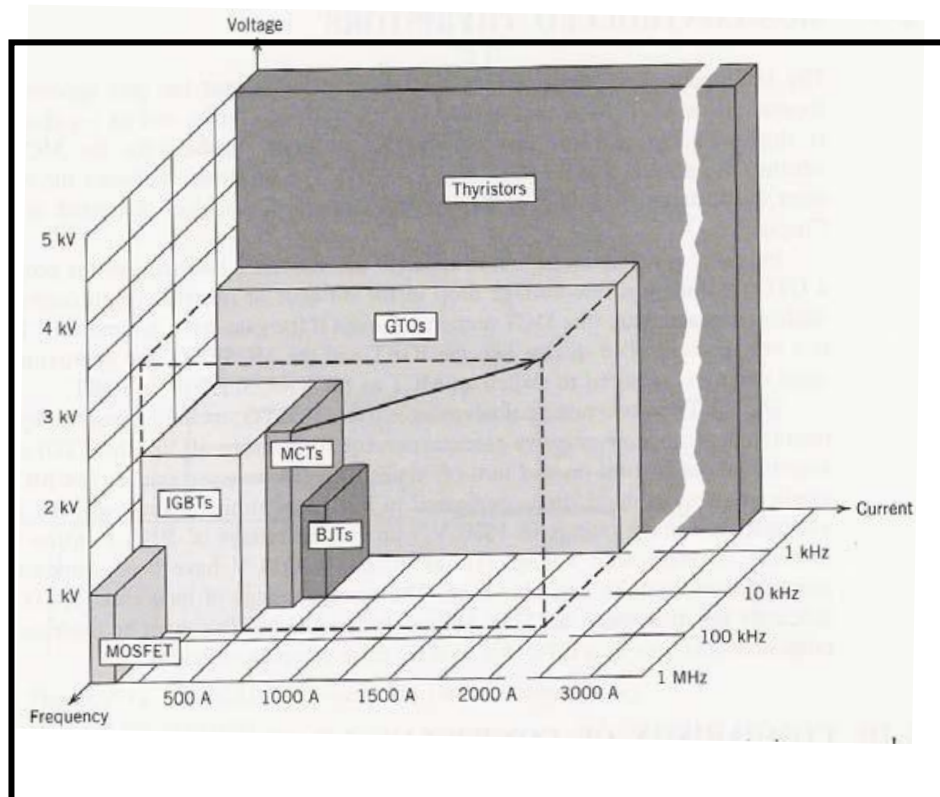


Figura 3.11 Comparación entre dispositivos de conmutación

2. Generador de relajación Fig.(3.12):

- Su principio de configuración es la conexión directa entre la fuente de corriente en combinación con diferentes elementos de almacenamiento de energía (circuitos RC, RLC o LC), en donde el GAP sirve como un interruptor.
- La frecuencia del pulso depende de la capacidad del voltaje a la que se carga y descarga el capacitor. Después de exceder la resistencia eléctrica del dieléctrico una descarga oscilante se realiza, su duración t_e y la corriente de descarga I_e dependen del valor de la capacitancia y no pueden ser controlados independientemente como en el caso del generador estático de pulsos.
- Con una descarga muy pequeña de energía de $W_e = 0.1\mu J$ y pulsos de alta frecuencia por arriba de f_p del orden de MHz, un generador de relajación puede usarse para micromaquinado y acabados precisos de superficie. [2]

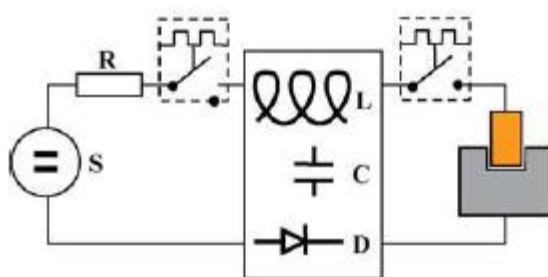
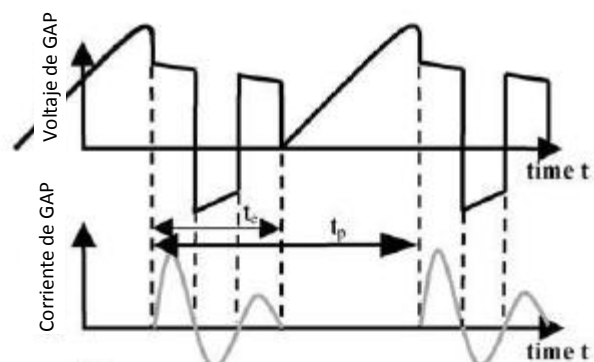


Figura 3.12 Generador de relajación



3.4 Control y detección de chispa

En comparación con las tecnologías de corte la tasa de alimentación en EDM es controlada por el propio sistema de la máquina.

Una tasa constante de alimentación (o avance) puede producir un corto circuito, resultando en la destrucción de la microestructura a maquinar. Este control de alimentación usa los parámetros de la descarga, y a través de una unidad de “detección” se retroalimenta a la unidad de control y así la tasa de alimentación es regulada.

En ambos tipos de generadores EDM las acciones de control se pueden poner en función del voltaje de GAP [18] y se pueden apreciar [2] en la tabla 3.1:

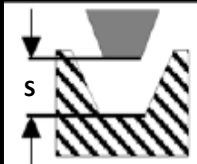
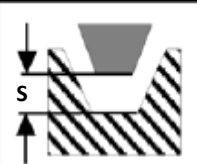
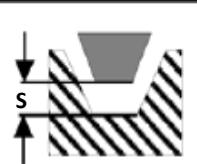

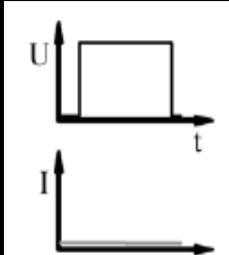

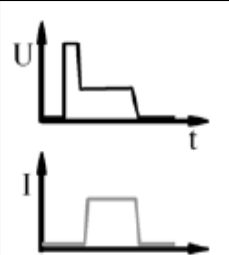

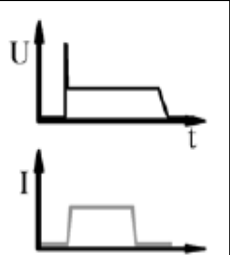

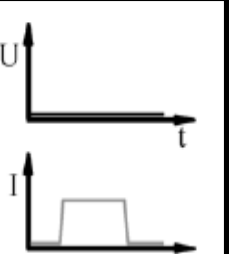

Tipo de Descarga	Circuito abierto	Descarga normal	Descarga de Arco	Cortocircuito
Causa	GAP muy grande	GAP óptimo	GAP muy pequeño	GAP $S = 0$
Ilustración				
Efecto	 	 	 	 
Reacción	Avance de electrodo	Posición constante del electrodo	Retroceso del electrodo	Retroceso del electrodo

Tabla 3.1. Acciones de control en función del GAP

Por lo tanto las condiciones eléctricas dentro del GAP se pueden clasificar en cuatro casos [18]:

1. No hay descarga o “circuito abierto”
2. Descarga normal
3. Descarga de arco
4. Corto circuito

A continuación se detalla e ilustra cada una de ellas (figura 3.13):

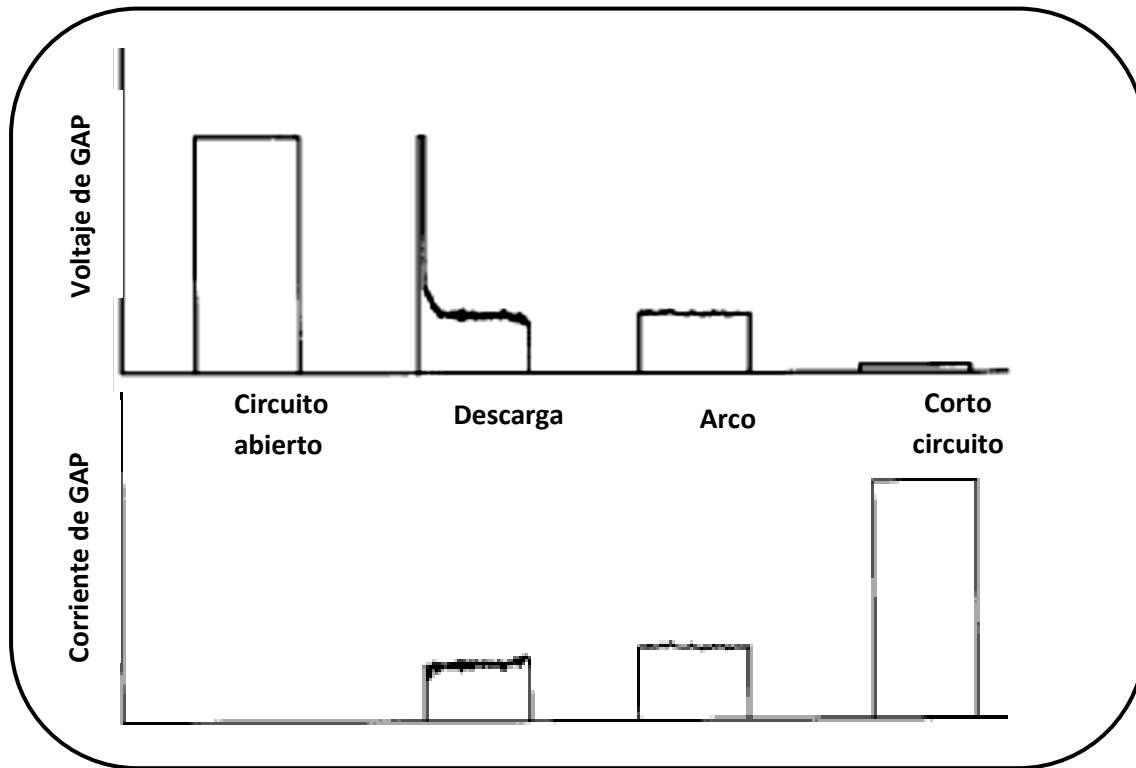


Figura 3.13. Condiciones eléctrica en un equipo micro EDM

1. La NO DESCARGA ocurre cuando el GAP es muy grande. Como consecuencia la creación del canal de plasma es impedida y la descarga de corriente no fluye. El control de alimentación reacciona con un avance.
2. En una DESCARGA NORMAL el ancho del GAP tiene el tamaño óptimo. Para las siguientes descargas el control trata de mantener constantes la posición del electrodo.
3. Una DESCARGA DE ARCO es caracterizada por una ignición permanente de la chispa (el tiempo real de ignición muy por debajo del valor establecido para el tiempo de retraso de ignición t_d). Este tipo de descarga es causada por una alta concentración de partículas eléctricamente conductivas dentro del GAP. Esta condición es seguida de una serie de descargas normales. El control reacciona con un retroceso del electrodo.
4. El CORTO CIRCUITO puede ocurrir cuando hay contacto entre el electrodo y la pieza de trabajo o porque un remanente de partículas forma una conexión o enlace. Para dejar este estado el electrodo debe ser retraído de la trayectoria de trabajo.

Dependiendo de la aplicación, diferentes tecnologías de control y estrategias basadas en lógica difusa y control adaptativo son usadas en las máquinas modernas de μ EDM.

3.4.1 Formación de arcos eléctricos

En la señal que alimenta al generador de pulsos podemos observar que intervalos de tiempo de desconexión cortos (figura 3.14), proporcionan más chispas por unidad de tiempo y con ello mayor arranque de material. Pero también es muy importante notar que durante este tiempo de desconexión, **el fluido dieléctrico debe disponer de tiempo suficiente para desionizarse y desplazar las partículas desprendidas en el proceso.** Un intervalo de desconexión demasiado corto puede provocar «igniciones», lo cual causaría la formación de arcos constantes entre el electrodo y la pieza de trabajo, resultando en graves defectos superficiales [26].

El riesgo de formación de arcos se incrementa si las condiciones de irrigación del dieléctrico son deficientes (recirculación, flujo débil, obstrucciones, etc.), y como resultado en la superficie del electrodo y la pieza de trabajo se forman grandes cráteres (o quemaduras) que generalmente son confundidas con inclusiones de escorias o porosidad del material. Una de las causas principales de este tipo de defecto es el mecanizado de una trayectoria inadecuada, ranuras estrechas, etc., lo cual hace que las virutas y otras partículas sueltas formen un puente entre el electrodo y la pieza trabajada. El mismo efecto puede suceder con un electrodo de grafito que tenga restos de materiales extraños. [26]

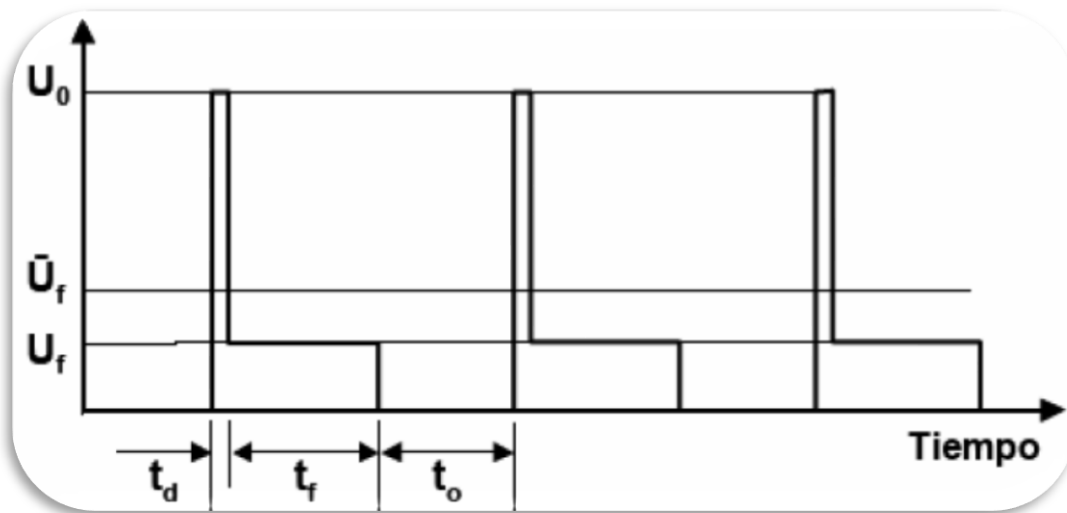


Figura 3.14. Detalle de tiempos en arco

Capítulo 4.- Desarrollo de Sistema Propuesto

4.1 Requerimientos del sistema

Un equipo para manufactura por electroerosión (EDM) está compuesto en general por varios sistemas (eléctrico, posicionamiento, filtrado, etc.), al igual que uno para μ EDM. Siendo en ambos particularmente importante controlar la cantidad de energía aplicada, en nuestro caso se propuso que ésta fuera regulada mediante el sistema eléctrico para lo cual se sugirió el uso de un generador de pulsos (de tipo estático o de relajación).

El efecto final buscado en este tipo de micromanufactura es que la energía en cada descarga (o pulso de energía) se encuentre en niveles de microjoules (considerando una descarga por cada ciclo de tiempo), esto exigió que la señal de control del generador posea una frecuencia del orden de MHz.

En este afán de controlar la energía se buscó trabajar establemente con la mayor frecuencia posible (considerando que al elevar ésta la energía en cada pulso sería menor), por lo que se decidió implementar un MosFet (debido a su alta impedancia de entrada) y no un BJT (con menor velocidad de conmutación y más inestable térmicamente respecto al MosFet [5]); el usar este tipo de dispositivo electrónico implica la utilización de un generador estático de pulso.

A continuación se muestra un diagrama con las etapas que integrarán el sistema de conmutación propuesto, nótese que forma parte del generador estático de pulsos y que éste a su vez comprende una parte del “sistema eléctrico” (diagrama 4.1).

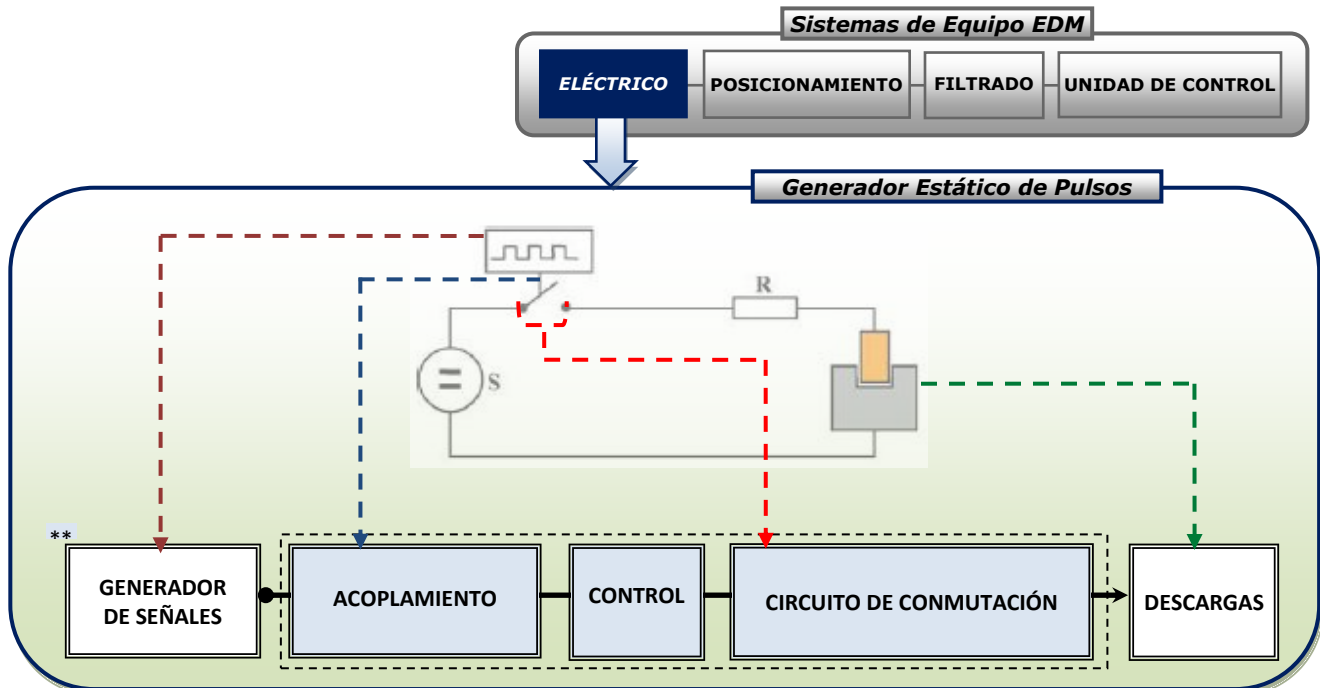
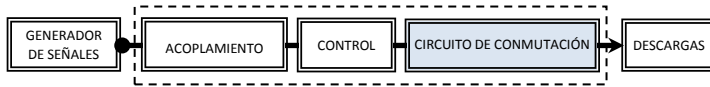


Diagrama 4.1 Sistema de conmutación propuesto

Para profundizar en ésta área se consideró el uso de elementos auxiliares del laboratorio, es decir, se empleó un generador de funciones (5 MHz) y fuentes de poder (30V y 100V a 3A), para alimentar al prototipo y enmarcar las capacidades del mismo.

** Nótese que los bloques del sistema de conmutación propuesto 4.1, se repetirán en cada inicio de sección del capítulo 4 y 5, indicando así la etapa a la cual se está haciendo referencia.

4.1.1 Selección del MosFet



Como el elemento más importante del circuito de conmutación es el MosFet, se comenzó con la búsqueda del más adecuado con base a sus parámetros [7] de: corriente, voltaje y tiempos de encendido-apagado (figura 21); los cuales de acuerdo a trabajos previos [12] deben ser capaces de manejar corrientes máximas de 30A, voltajes de 100V y tiempos promedio de encendido de 300 a 1200 ns.

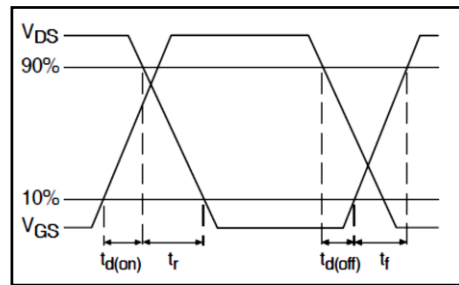


Figura 4.1. Forma de onda de tiempos de conmutación MosFet

A continuación se muestran en la tabla 4.1 los MosFet's candidatos de acuerdo a sus características:

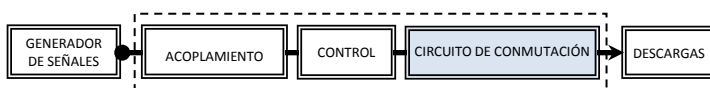
MosFet	V _{DS} (V)	I _D (A)	I _{puls} (A)	Pot. (W)	V _{GS} (V)	T _{d(on)} (ns)	t _r (ns)	T _{d(off)} (ns)	t _f (ns)	Δ _{on/off} (ns)	Encapsulado
IRFP4229	250	44	180	310	±30	25	27	44	19	119	TO247
IRFP4668	200	130	520	520	±30	41	105	64	74	284	TO247
IRFP4227	200	65	260	330	±30	33	20	21	31	105	TO247
IRFP250	200	30	120	190	±20	16	86	70	62	234	TO247
IRFS4229	250	45	180	330	±30	18	31	30	21	100	D ² Pak

*Referencias a 25°C.

Tabla 4.1. MosFet's y sus características

De los cuales el que cumplió las expectativas fue el IRFP4227 (Power MosFet) duplicando los parámetros comentados, pero principalmente por su tiempo de conmutación de 105ns equivalentes a 9.52MHz. Se debe notar que del listado no es el mejor tiempo de conmutación, pero el MosFet que lo supera está contenido en un encapsulado de montaje superficial, y no es significativa la diferencia

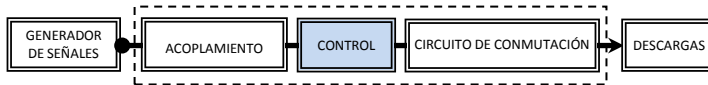
4.1.2 Selección del Driver para MosFet



Para garantizar la conmutación del MosFet se debe de proporcionar un voltaje entre las terminales de compuerta (Gate) y fuente (Source) que conmute de 0V a 15V. Cuando el voltaje es cero además debe tener una baja impedancia en la compuerta, y cuando el voltaje sea de 15V debe ser estable; por lo que se implementó un circuito específico de control denominado Driver.

El driver elegido fue el MC34151 manufacturado por “ON Semiconductor”, compatible con TTL y CMOS, entradas con histéresis, salidas Tótem Pole, dual, de alta velocidad y conmutación máxima de 3MHz a 9.9 MHz.

4.1.3 Control

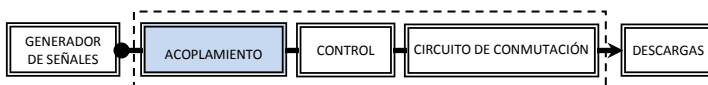


Ésta etapa hace referencia a la “lógica de control” que temporalmente se ubicó en esta posición ya que sería prematuro definirla en otra parte, pero su existencia está justificada por la necesidad de obtener señales de control que regulen el comportamiento deseado del dispositivo en función del proceso EDM. Siendo así y por simplicidad se simuló con un circuito integrado basado en lógica combinatoria, esto es, se interconectó un buffer 7407 de la serie LS (TTL) que posteriormente se comparó con uno de la serie HC (CMOS). Con esto se observó que independientemente de la sección del dispositivo en que se defina el esta etapa de control la tecnología CMOS es relativamente más lenta que la TTL pero es más estable, es decir, tiene mayor inmunidad al ruido (ver tabla 4.2).

Familia	$T_{on/off}$ (ns)		$F_{on/off}$ (MHz)	
	típico	máximo	máximo	mínimo
74LS07	26	40	38	25
74HC07	30	55	33	18

Tabla 4.2. Familia LS vs HC

4.1.4 Acoplamiento



La conexión de un equipo de línea como lo es el generador de funciones a un prototipo electrónico hace necesario aislarlos eléctricamente para prevenir la propagación de ruido y cortos circuitos.

Para esto se seleccionó un optoacoplador en específico el 6N137 manufacturado por Fairchild, con un sólo canal, salida de colector abierto, de muy alta velocidad: 10 MBit/s equivalentes a 5 MHz (bajo condiciones óptimas), con compatibilidad TTL-CMOS y aplicado típicamente en fuentes de poder conmutadas.

Además en el acoplamiento se consideró la conexión física de la señal del generador de funciones con el circuito, en este caso se usó un cable coaxial con conectores BNC macho-macho, realizándose pruebas de velocidad hasta 5MHz con un cable comercial y uno armado para verificar cual de los dos presentaba menos distorsiones (figura 4.2).

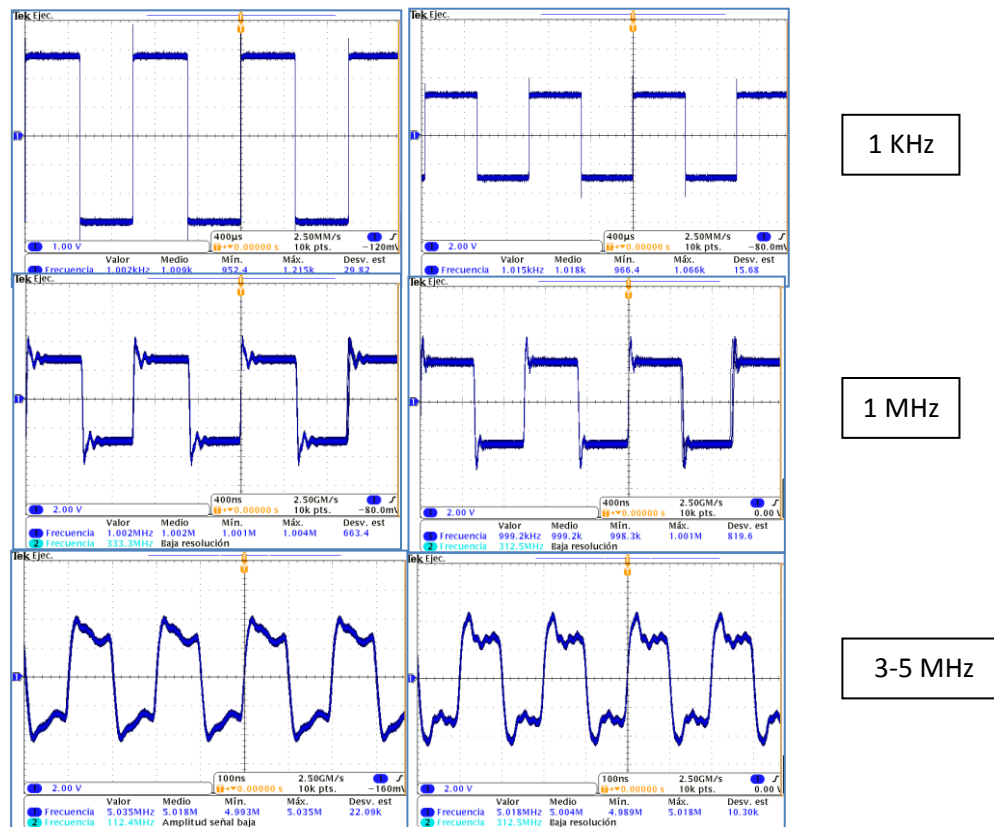
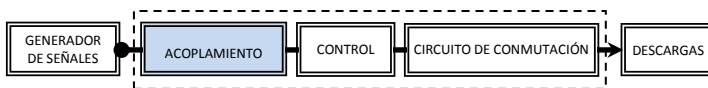


Figura 4.2. Pruebas de cable coaxial armado en columna 1 y de cable coaxial comercial en columna 2

En las imágenes anteriores es posible apreciar que a frecuencias de 1kHz no hay diferencia, a frecuencias de 1MHz el cable comercial presenta una menor inmunidad al ruido y en el intervalo de 3MHz a 5MHz ambos presentan deformaciones considerables; por lo que se decidió trabajar con el cable coaxial comercial.

4.2 Delimitación de parámetros



Hasta el momento no es posible realizar una prueba implementando los electrodos y el dieléctrico porque no está definido en su totalidad el prototipo, por lo que se propuso utilizar una resistencia de carga en el MosFet y estudiar el comportamiento de la corriente y el voltaje de GAP en el osciloscopio.

Al ser un MosFet de potencia se consideró que la resistencia fuera de cerámica (núcleo de alambre), con un valor de 10Ω y potencia de 100w; este valor se justificó teóricamente con la capacidad de las fuentes con que se cuenta (es decir por ley de ohm un voltaje de 30V con una corriente de máxima de 3A, implica una resistencia de 10Ω), además estos parámetros coincidieron con los trabajos reportados en la literatura de μEDM [12], [13]. También se incluye un diodo en paralelo para manejar el efecto inductivo que presenta intrínsecamente este tipo de resistencia.

Con los datos obtenidos hasta el momento se realizó un cuadro comparativo con las características más significativas del circuito de conmutación (tabla 3).

Dispositivo	$F_{on/off}$	V_{in}	V_{out}	Fabricante	Otros
	(MHz)	(V)	(V)		
Cable Coaxial	1-2	-	-	Genérico	-
Gen. Fun.	5	115	TTL	BK Precision	Mod.4011A
Optoacoplador	5	5	-	Fairchild	Colector abierto
Logica ctrl.	18-33	4.5 - 5.5	4.5 - 5.5	Texas	CMOS
Driver	3 - 9.9	20	-	ON	Colector abierto
MosFet	9.5	± 30	200	IOR	65A

Tabla 4.3 Características de dispositivos de circuito de conmutación.

De esta lista se observó que la máxima frecuencia de trabajo está limitada en primera instancia por el cable coaxial, seguido por el generador de funciones y el optoacoplador. El resto de los componentes en teoría son capaces de operar a esta frecuencia pero hay que considerar que los datos se obtuvieron de las hojas de especificaciones, es decir que están calculados bajo condiciones óptimas de operación; por lo tanto se propuso una frecuencia de trabajo de 1 MHz., la cual garantiza que todos los dispositivos la puedan alcanzar sin pérdidas o distorsiones, dotando al sistema propuesto con una frecuencia de operación para realizar micromanufactura por EDM.

4.3 Consideraciones de diseño

Tomando en cuenta lo anterior se armó el circuito decidiendo montarlo en un circuito impreso (PCB). Siguiendo las notas del fabricante del driver no es recomendable el uso de un protoboard para prevenir picos y lazos de corriente excesivos a su salida, además de que su uso implica capacitancias de 25pF por conexión, resistencias de 1-10 Ω por conexión y altas inductancias en algunos puntos (fenómenos que se incrementan con la falta de mantenimiento, el uso y el empleo de dispositivos genéricos), según el fabricante "Global Specialities".

La influencia de las técnicas de desarrollo y montaje de circuitos impresos [9] [10], nos permiten disminuir e incluso evitar algunos de los problemas con las capacitancias e inductancias parasitas y la interferencia electromagnética EMI, producida al aumentar la frecuencia de trabajo a MHz. A continuación el circuito ensamblado (figura 4.3):

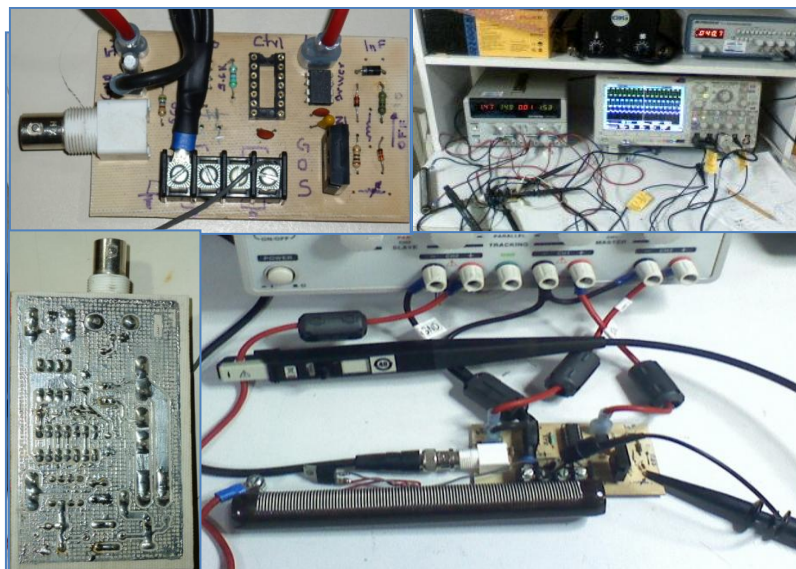


Figura 4.3. Detalle de circuito generador estático de pulsos.

4.4 Validación de componentes

Con este primer PCB se realizaron pruebas a sus componentes, las cuales fueron divididas en dos etapas (ambas con frecuencias desde unidades de kHz hasta 5MHz aplicando una señal unipolar cuadrada TTL con ciclo de trabajo al 50% y un voltaje de EDM de 25V D.C.).

Primera etapa (respuesta en frecuencia de conexiones, acoplamiento y lógica de control): en la figura 4.4 se aprecian las señales de salida del generador de funciones (azul oscuro), optoacoplador (azul claro) y lógica TTL (morado) respondiendo a una frecuencia de 100 kHz. En la figura 4.5 se observa una ligera deformación de la señales a una frecuencia de 1MHz, en la figura 4.6 de observan a 4 MHz con una deformación de onda más significativa, en la figura 4.7 se aplica una señal de 5 MHz y tanto el optoacoplador como la lógica TTL dejaron de conmutar.

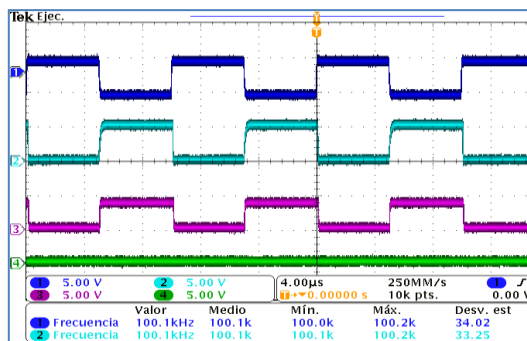


Figura 4.4. Gen. F., optoacoplador y lógica TTL a 100kHz.

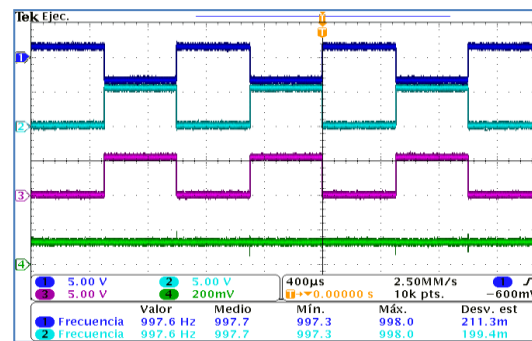


Figura 4.8. Gen. F., optoacoplador y lógica CMOS a 100kHz.

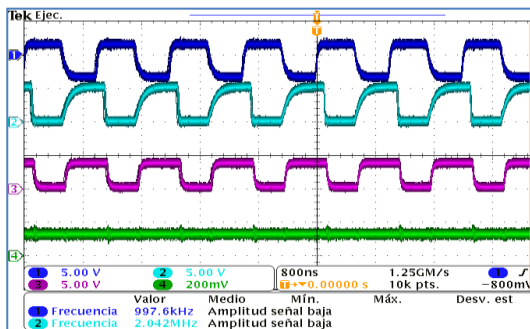


Figura 4.5. Gen. F., optoacoplador y lógica TTL a 1MHz.

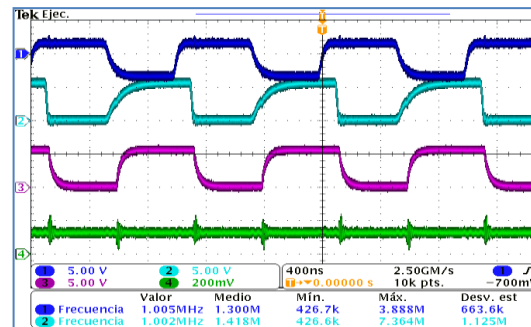


Figura 4.9. Gen. F., optoacoplador y lógica CMOS a 1MHz.

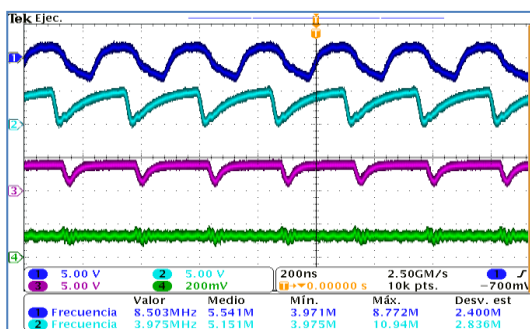


Figura 4.6. Gen. F., optoacoplador y lógica TTL a 4MHz.

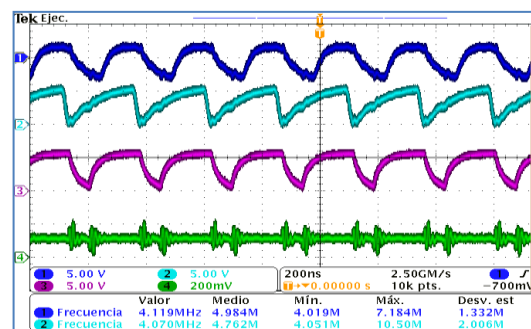


Figura 4.10. Gen. F., optoacoplador y lógica CMOS a 4MHz.

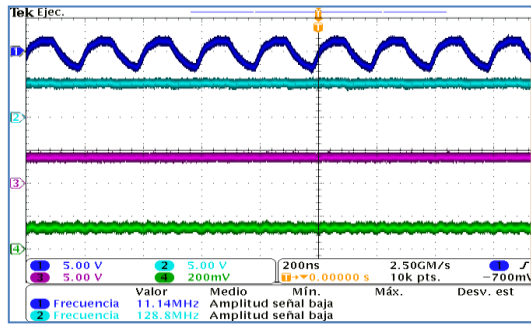


Figura 4.7. Gen. F., optoacoplador y lógica TTL a 5MHz.

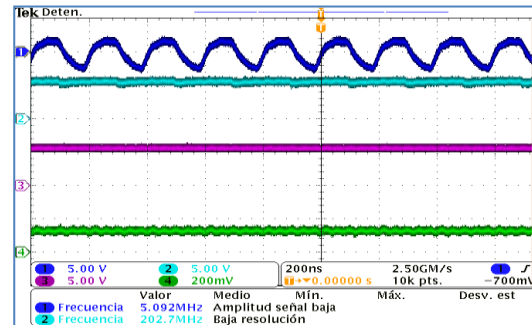


Figura 4.11. Gen. F., optoacoplador y lógica CMOS a 5MHz.

Para verificar la conveniencia entre una lógica TTL o CMOS se repitieron las pruebas utilizando un circuito 74HC07 (figuras 4.8-4.11), donde se observó que la lógica CMOS presentó una mejor respuesta a frecuencias más elevadas; con lo anterior se comprobó que los valores óptimos obtenidos teóricamente en la tabla 4.2 difieren de los prácticos, pero los dispositivos pueden trabajar eficientemente a una frecuencia de 1 MHz.

Segunda etapa (respuesta en frecuencia de circuito conmutador): A diferentes frecuencias se verificó en el osciloscopio la señal de salida de driver (azul oscuro), Gate del MosFet (azul claro) y la corriente de Dren (morado); encontrando que a bajas frecuencias la conmutación se llevó a cabo correctamente (figura 4.12). Al aumentar a 100kHz la frecuencia de trabajo, aparece una oscilación parasita entre flancos los positivos de la corriente de DREN (figura 4.13), éste fenómeno se presentó con cada nuevo aumento de frecuencia y generó un aumento en el consumo de corriente en la resistencia de carga. A partir de los 300kHz esta oscilación comenzó a manifestarse en la señal de salida del driver y el GATE del circuito (figuras 4.13-4.17).

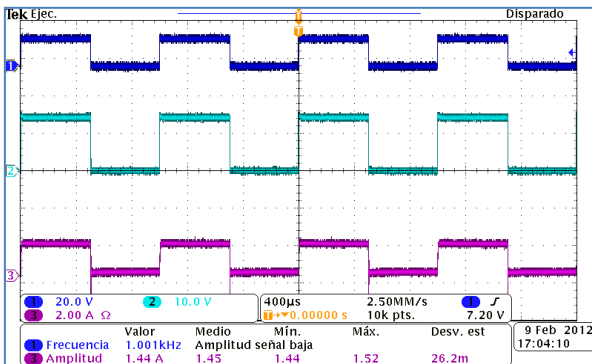


Figura 4.12. Driver, Gate e I_{DRAIN} a 1 kHz.

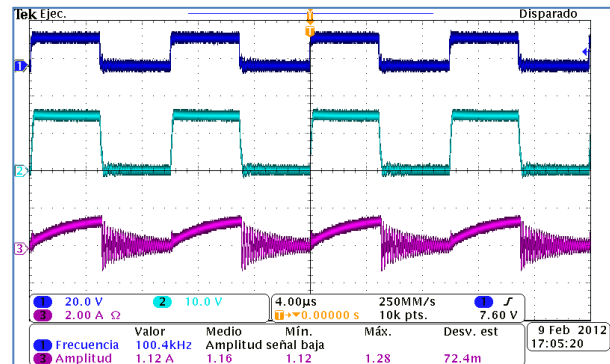


Figura 4.13. Driver, Gate e I_{DRAIN} a 100 kHz.

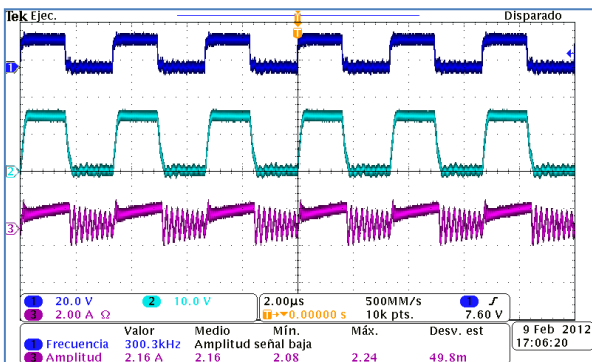


Figura 4.14. Driver, Gate e I_{DRAIN} a 300 kHz.

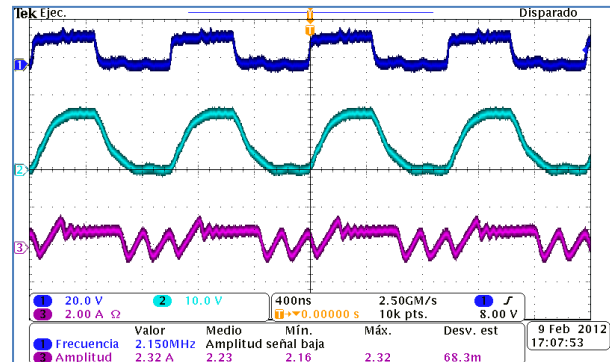


Figura 4.15. Driver, Gate e I_{DRAIN} a 2 MHz.

La señal de salida del driver discrepó de la señal que alimenta al GATE debido a que existe un arreglo de diodos y resistencias intermedia, con el fin de facilitar el encendido y apagado del MosFet (figura 4.16).

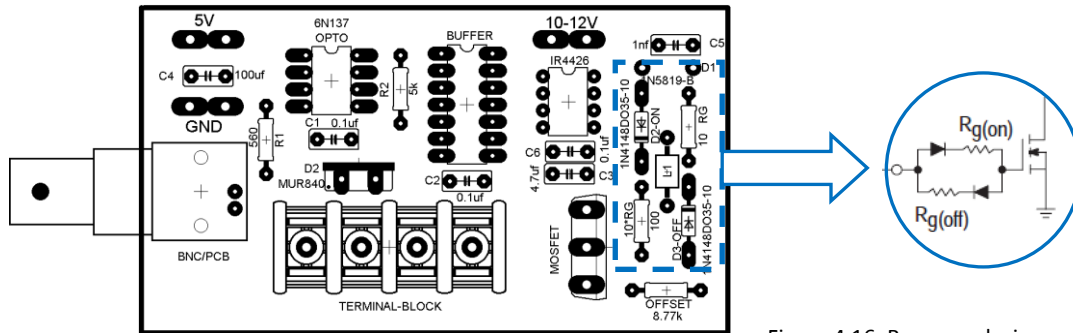


Figura 4.16. Recomendaciones de fabricante

Se notó que ni la variación de parámetros tales como el cambio de la relación entre resistencias $R_{g(on)}$ y $R_{g(off)}$, el aumento del voltaje de alimentación de 10V hasta 20V en el driver, la reducción de la longitud de los cables de alimentación o la variación de voltaje de fuente EDM a 20V y 30V, aminoraron la oscilación parasita. Fue hasta que se incorporaron ferritas (figura 4.17) para la supresión de EMI (Interferencia Electro-Magnética) en los cables de alimentación a la fuente, tierra y resistencia de carga, es que esta oscilación comenzó a desaparecer (lo anterior se relaciona con a las características de los cables utilizados); nuevamente se hicieron pruebas a frecuencias de 40kHz (figuras 4.18-4.19), 100kHz (figuras 4.20-4.21), 424kHz (figuras 4.22-4.23) y 1MHz (figuras 4.24-4.25) para comprobar su eficacia. La señal de salida del driver esta en azul y la corriente de DREN en morado.

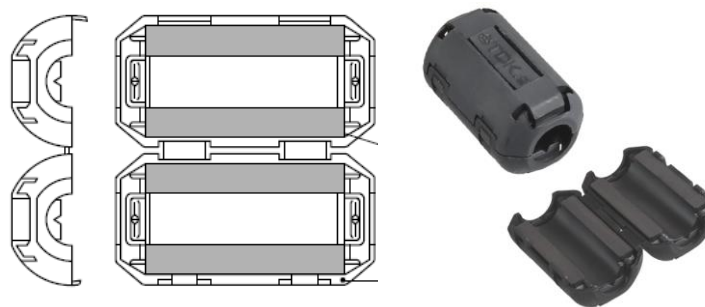


Figura 4.17. Ferritas supresoras de EMI para cableado

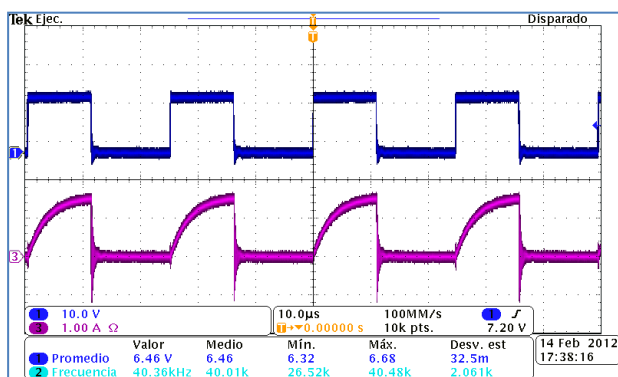


Figura 4.18. Conmutación a 40 kHz sin ferrita.

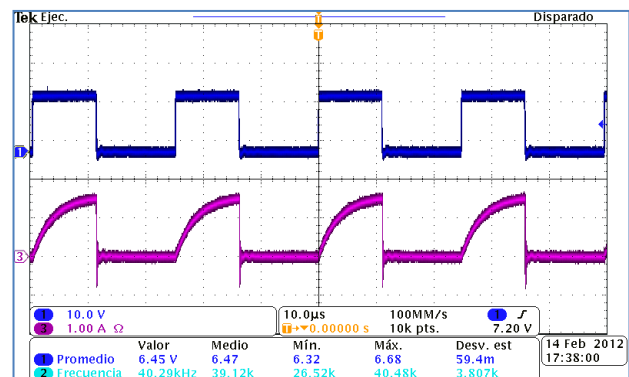


Figura 4.19. Conmutación a 40 kHz con ferrita

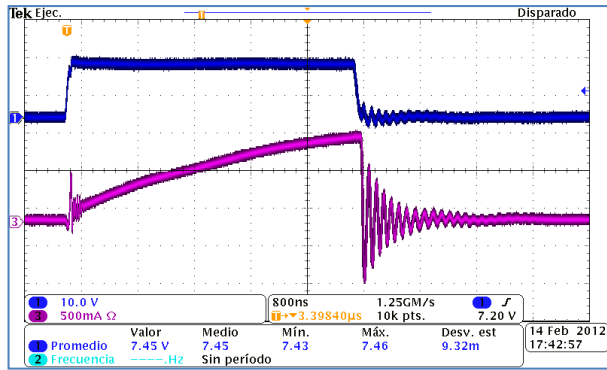


Figura 4.20. Conmutación a 100 kHz sin ferrita.

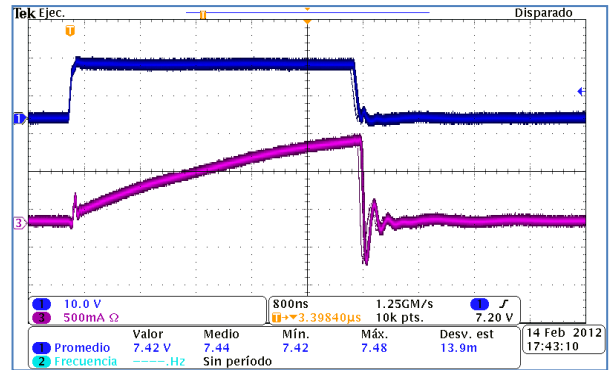


Figura 4.21. Conmutación a 100 kHz con ferrita

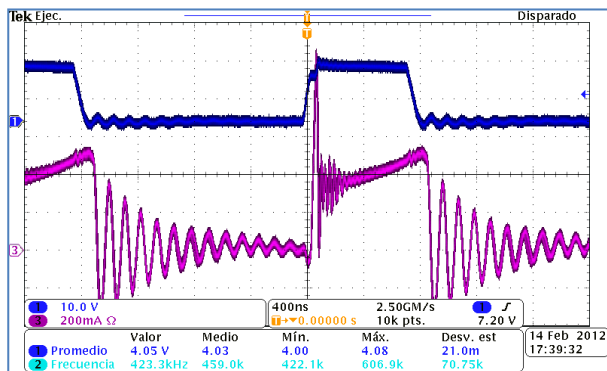


Figura 4.22 Conmutación a 420 kHz sin ferrita.

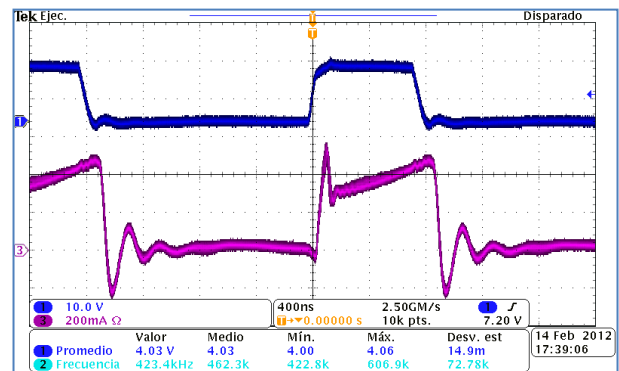


Figura 4.23 Conmutación a 420 kHz con ferrita.

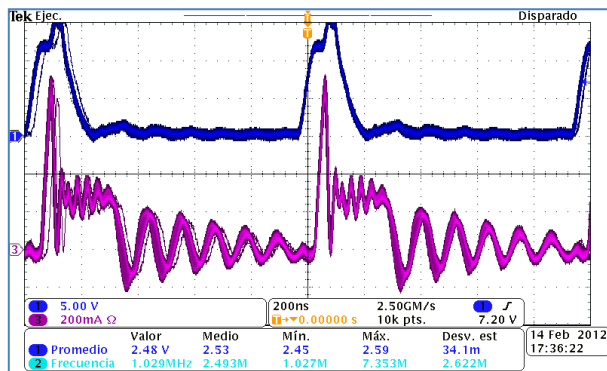


Figura 4.24 Conmutación a 1MHz sin ferrita.

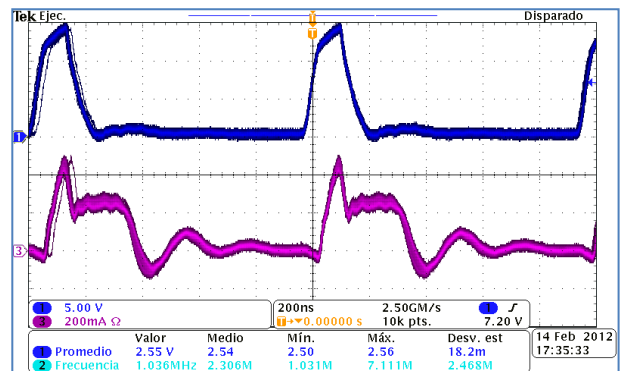


Figura 4.25. Conmutación a 1MHz con ferrita.

A frecuencias cercanas a 2 MHz las señales comenzaron a disminuir su amplitud y a los 3MHz dejaron de conmutar, en las figuras 4.26-4.27 se muestran las señales del driver (azul oscuro), Gate (azul claro) e I_{DRAIN} (morado).

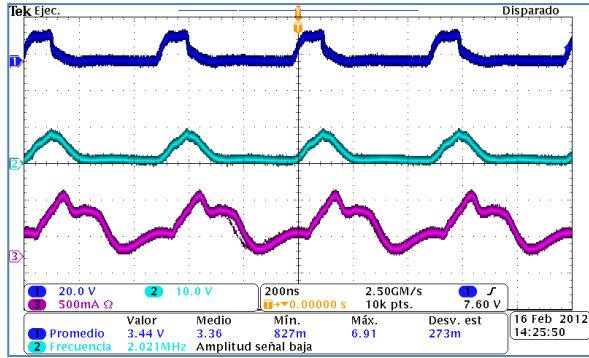


Figura 4.26. Conmutación a 2MHz con ferrita.

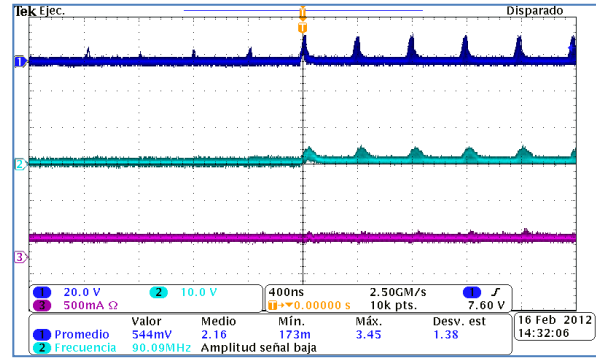


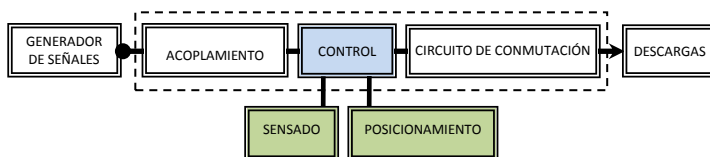
Figura 4.27. Conmutación a 3MHz con ferrita.

En la señal de conmutación de la corriente de DREN se presentó una distorsión disminuida significativamente y el fenómeno de oscilación parasita se atribuyó principalmente a efectos capacitivos en el cableado. Con este circuito de pruebas se encontraron los parámetros de operación que garantizan una conmutación estable (tabla 4.4).

Dispositivo	Configuración
Generador de Funciones	Onda cuadrada TTL a 1MHz, Ciclo trabajo al 50%
Optoacoplador	Alimentación 5V
Driver	Alimentación 15V
MosFet	Circuito de on/off
Carga de MosFet	Resistencia cerámica 10Ω, 100W
Fuente EDM	25V D.C.

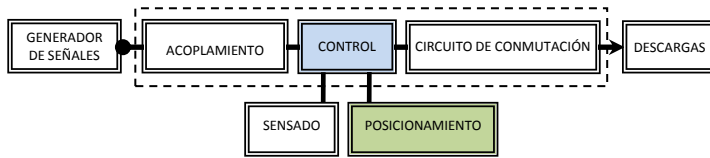
Tabla 4.4 Configuración de dispositivos

4.5 Sistemas adicionales



Una vez establecidos los parámetros de conmutación fue necesario identificar las etapas de sensado (retroalimentación que alimenta la lógica de control) de la chispa y el corto circuito, así como el sistema de posicionamiento de electrodos y su respectivo control.

4.5.1 Posicionamiento



De la primera línea de investigación [13] se hizo uso del sistema de posicionamiento integrado por la tarjeta de desarrollo ARDUINO que implementa la programación en C de un control difuso, alimentado por las señales del circuito de detección de chispa y corto. Como resultado se tuvo una señal de salida que alimenta a un motor piezoeléctrico, determinando el avance o retroceso del electrodo hacia la pieza de trabajo (figura 4.28) en función de las condiciones de descarga del EDM.

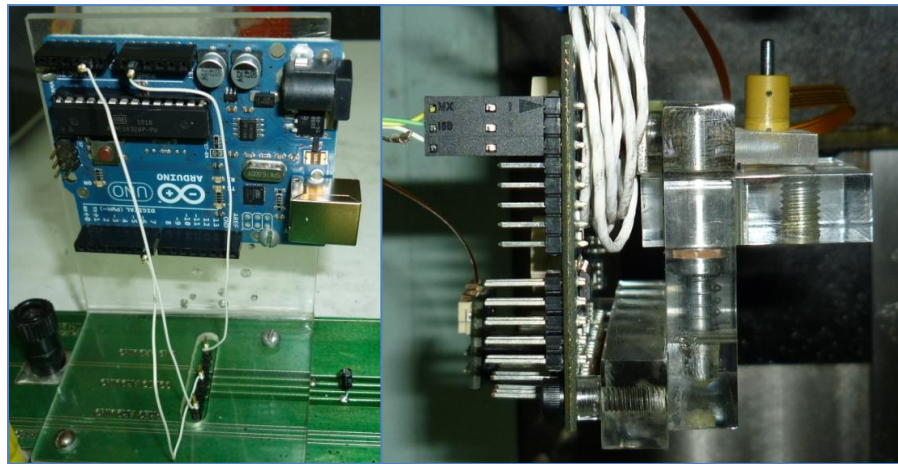
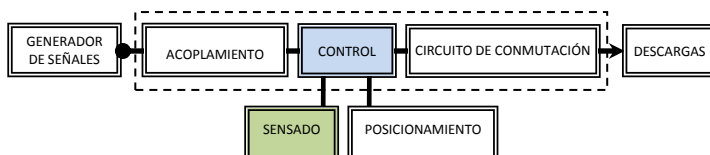


Figura 4.28 ARDUINO y motor piezoeléctrico.

El manejo del motor integra un driver y un sensor de posición en un control PID.

4.5.2 Sensado



Con base a esta misma línea de investigación se adoptó el método de medición del voltaje de GAP para la detección de chispa [13], la cual se realizó por medio de comparaciones con amplificadores operacionales aunada a un convertidor frecuencia voltaje. Extrayendo así del circuito tres señales que alimentan a una tarjeta de desarrollo ARDUINO (figura 4.29), estas fueron:

1. Un voltaje de 0V a 5V D.C. (voltaje variable), aplicado a un puerto de entrada analógico del ARDUINO, para la detección de chispas o descargas eléctricas en función de la frecuencia de trabajo.
2. Un voltaje de 0-5V D.C. (cero o uno lógico), aplicado a una entrada digital del ARDUINO para la detección de corto circuito.
3. Señal de tierra (GND).

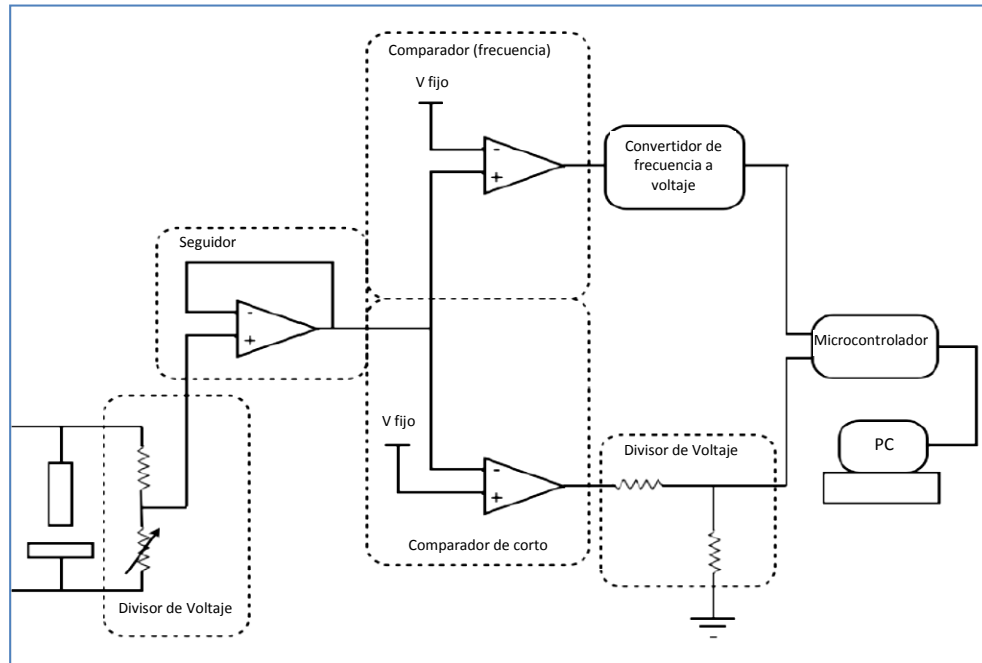


Figura 4.29. Detección de condiciones EDM

Nótese que el acoplamiento entre señales se hizo por medio de un divisor de voltaje y un seguidor de voltaje. Además, tanto el sistema de detección como el de posicionamiento estaban originalmente diseñados para trabajar a una frecuencia de 6.83 kHz y para saber si los dispositivos que lo componen pueden trabajar a 1 MHz se revisaron las especificaciones de cada uno de ellos (tabla 4.5).

Dispositivo	Chip	F _{on/off} (kHz)	Vel. de Resp.	Ancho Banda	Observaciones
Seguidor de Voltaje	TL081CN	-	13 V/μs	4MHz	Amp. Op. de propósito general
Comp. de frecuencia	TL081CP	-	13 V/μs	4MHz	
Comp. de circuito	TL081CP	-	13 V/μs	4MHz	
Convertidor F/V	LM2907N-8	10	-	-	-
Motor Piezoeléctrico	SQL-3.4	115	-	-	-

Tabla 4.5. Velocidades originales de respuesta de sistema de sensado.

4.5.2.1 Convertidor Frecuencia - Voltaje

De la tabla anterior se observó que el dispositivo que presenta un impedimento para poder detectar la frecuencia de trabajo a 1 MHz. es el convertidor de frecuencia a voltaje. Motivo por el cual se realizó una investigación de los convertidores en el mercado y su frecuencia máxima de operación (tabla 4.6).

Dispositivo	F _{on/off} (MHz)	Encapsulado	Fabricante
AD650	1	14 DIP	Analog Device
AD654	0.5	8 DIP	Analog Device
AD652	0.1	16 DIP	Analog Device
AD7740	1	MSOP	Analog Device
VFC32KP	0.5	14 DIP	Texas Instrument
VFC320BP	1	14 DIP	Texas Instrument
VFC110AP	4	14 DIP	Texas Instrument
NTE995	.01	14 DIP	NTE
TC9400	0.1	14 DIP	Microchip

Tabla 4.6. Convertidores de frecuencia a voltaje

Cabe mencionar que estos circuitos tienen como función primaria ser convertidores de voltaje a frecuencia, pero mediante una configuración especial es posible utilizarlos como convertidores de frecuencia a voltaje.

Se eligió el circuito AD650 porque presenta más información técnica que el VFC110 y se elaboró un nuevo PCB (figuras 4.30 y 4.31) para verificar su comportamiento; se siguieron las recomendaciones de diseño para frecuencias de MHz (figura 4.32), notas del fabricante y como señal de prueba se utilizó el generador de funciones (figura 4.32).

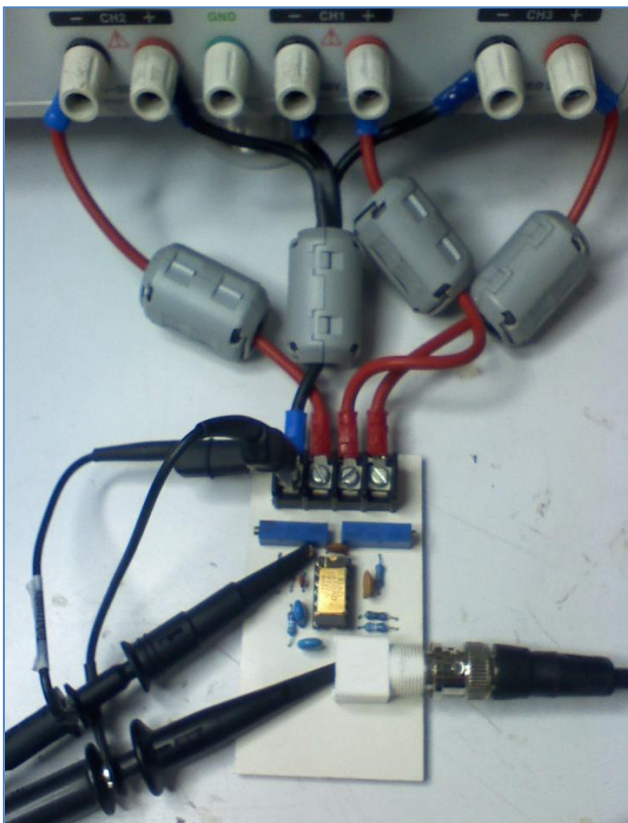


Figura 4.30. Frente PCB convertidor F/V

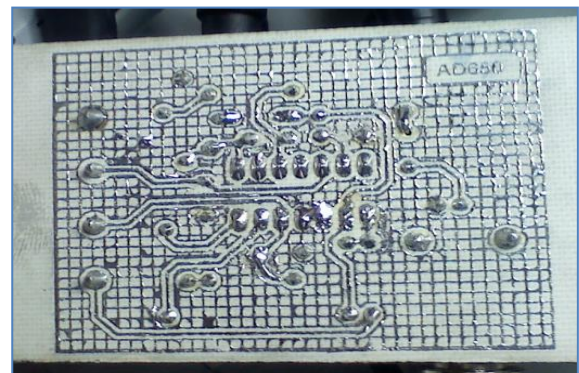


Figura 4.31 Reverso PCB convertidor F/V



Figura 4.32 Prueba PCB convertidor F/V

Con la implementación de este circuito impreso (figura 4.33) se corroboró que hay tres parámetros que hay calcular en función de la frecuencia de operación deseada, el primero es el capacitor de integración (que proporciona la forma de onda de la señal D.C. de salida), el segundo es la resistencia de integración (ajusta el nivel de voltaje de salida a 5V) y el tercero es el capacitor de oscilación (que define la máxima frecuencia a la que operará). Se identificó a este último como el más crítico y se le asignó un valor a través de fórmulas (hoja de especificaciones técnicas) mismo que se comparó con la aplicación web del fabricante; su valor teórico (88.23pF) resulto no ser comercial y el valor más cercano afectó notablemente el desempeño del convertidor, es decir, dejó de presentar un comportamiento lineal en su salida (ver tabla 4.7).

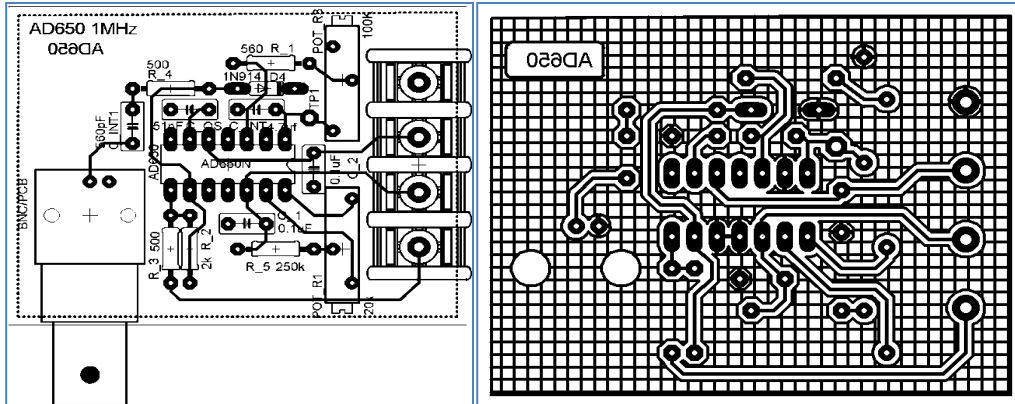
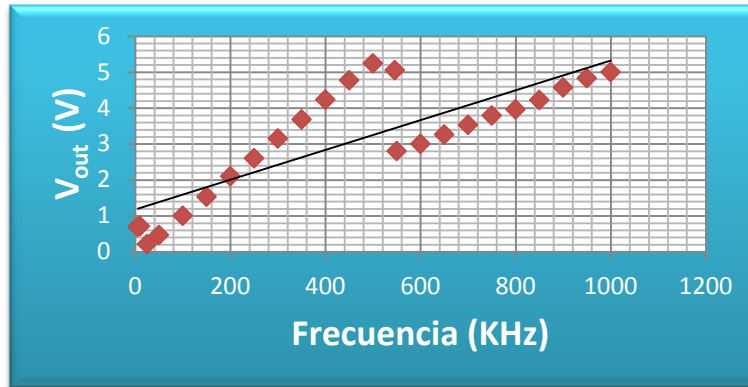


Figura 4.33. Frente y reverso de circuito impreso para convertidor F-V

V _{OUT} = 5V a 1MHz, R _{in} = 11.11kΩ							
C _{int} = 1μF C _{osc} = 100pF		C _{int} = 1μF C _{osc} = 68pF		C _{int} = 1μF C _{osc} = 56pF		C _{int} = 1μF C _{osc} = 82pF	
F _{in} (kHz)	V _{OUT} (V)	F _{in} (kHz)	V _{OUT} (V)	F _{in} (kHz)	V _{OUT} (V)	F _{in} (kHz)	V _{OUT} (V)
1000	5	1000	5	1000	5	1000	5
970	4.96	950	4.83	950	4.71	950	4.81
960	4.42	900	4.57	900	4.51	900	4.56
950	5.44	850	4.22	850	4.27	850	4.29
940	5.21	800	3.96	800	4.01	800	4
920	5.12	750	3.79	750	3.76	750	3.75
910	5.51	700	3.53	700	3.51	700	3.44
900	5.66	650	3.26	650	3.26	650	3.24
890	5.81	600	3.00	620	3.37	600	2.98
870	5.33	550	2.8	600	6.29	550	2.7
800	4.94	546	5.05	550	5.74	507	5.11
700	4.39	500	5.24	500	5.21	500	5.14
600	3.69	450	4.77	450	4.73	450	4.6
500	3.27	400	4.23	400	4.19	400	4.13
-	-	350	3.68	350	3.66	350	3.62
-	-	300	3.15	320	4.98	300	3.07
-	-	250	2.6	300	4.68	250	2.55
-	-	200	2.1	250	3.87	200	2.05
-	-	150	1.53	200	3.08	150	1.5
-	-	100	1	150	2.3	100	0.968
-	-	50	0.464	100	1.5	50	0.438
-	-	25	0.213	50	0.726	25	0.194
-	-	10	0.71	25	0.326	10	0.73
-	-	5	0.69	10	0.114	5	0.6
-	-	-	-	5	0.67	-	-

Tabla 4.7. Combinación de parámetros Convertidor F/V

El mejor de los resultados se obtuvo con $R_{in}=11.11k\Omega$, $C_{int} = 1\mu F$ y $C_{osc} = 68pF$ (grafica 4.1), logrando una respuesta lineal constante hasta los 546 kHz, por lo considero el valor máximo de conmutación para el generador estático de pulsos.



Grafica 4.1. Linealidad de salida convertidor F/V

Al incrementar la frecuencia de trabajo el ruido generado afecta a todos los circuitos, en particular a los amplificadores operacionales (configurados como comparadores) [15]; esto se resolvió con retroalimentación positiva, la cual no elimina el ruido pero hace que el amplificador operacional sea menos sensible a él (histéresis). Lo anterior se llevó a cabo tomando una fracción del voltaje de salida y aplicándola a la terminal no inversora.

4.5.2.2 Comparadores de nivel

Además de aplicar retroalimentación positiva se buscaron amplificadores operacionales más rápidos [16], encontrándose que el TLE2081 de la serie Excalibur de Texas Instruments presenta una mejor velocidad de respuesta ($35 V/\mu s$ con un ancho de banda de 9.4 MHz). Sin embargo la literatura [15] indica que un “amplificador de propósito general” usado como “comparador” presenta las siguientes desventajas:

1. El voltaje de salida no cambia con mucha rapidez (lento)
2. Su salida está fijada entre los valores de $-V_{sat}$ y $+V_{sat}$.
3. Su salida no sirve para alimentar circuito TTL directamente.

Por ende, se optó por utilizar de un circuito integrado específico como “comparador”, los propuestos se muestran en la Tabla 4.8.

Integrado	Vel. (ns)	(MHz)	Comparadores
NTE919	80	12	2
LM319	80	12	2
LM311	200	5	1
LM193	300	3.3	2
LM710	40	25	1
LM339	300	3.3	4
MAX9693	1.2	833	2

Tabla 4.8. Selección de comparadores.

El LM319 satisface de sobra la velocidad de conmutación requerida es el más comercial y ofrece la ventaja de tener 2 comparadores en un sólo encapsulado, eliminando la necesidad de pistas adicionales; por lo que se eligió y además se le configuró la retroalimentación positiva (figura 4.34).

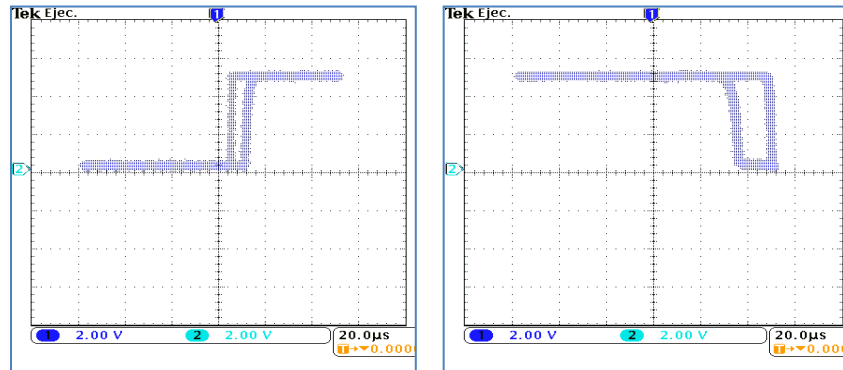


Figura 4.34. Detalle en osciloscopio de la aplicación de histéresis en comparadores.

4.6 Integración de etapas

Con la información obtenida hasta este punto se implementó un circuito impreso (figuras 4.35-4.36) compuesto por los sistemas del generador estático de pulsos, sensado (figura 4.37) y posicionamiento.

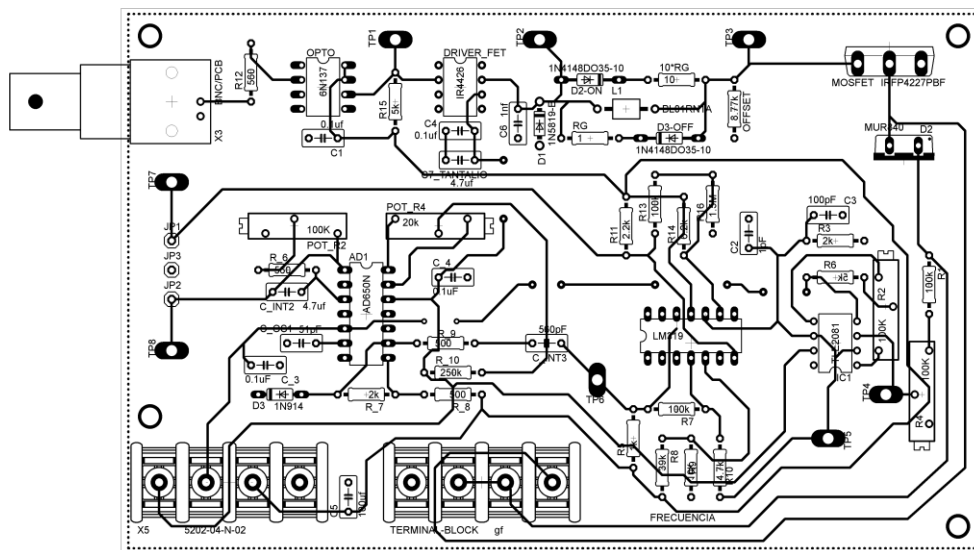


Figura 4.35. Esquemático de etapas reunidas

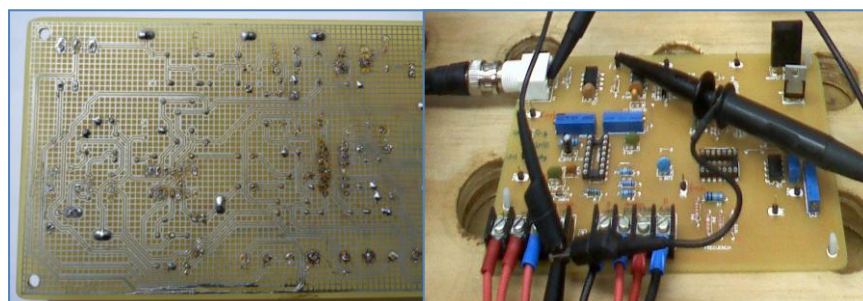


Figura 4.36. PCB de generador de pulsos y señales de control

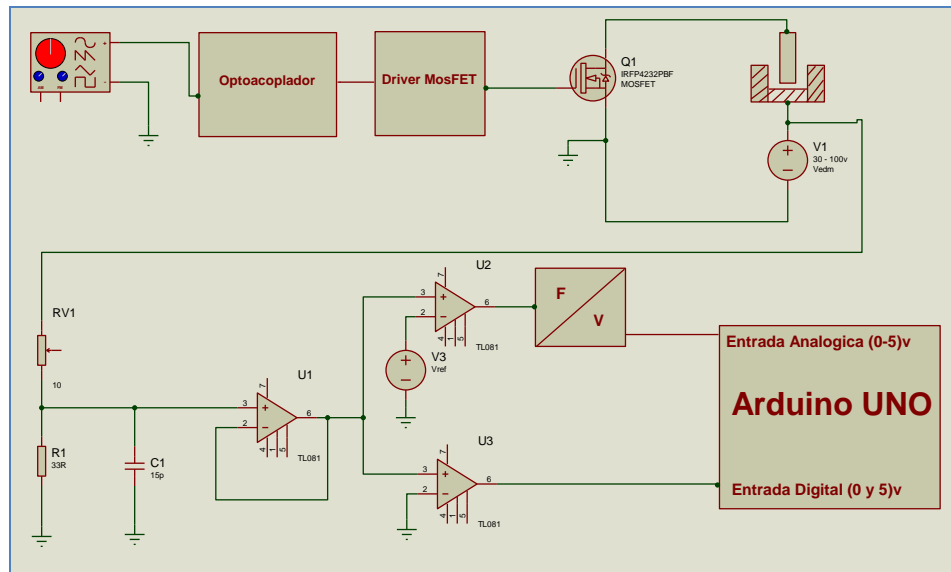


Figura 4.37. Circuito general del generador estático y sentido.

Este PCB se puso a prueba con frecuencias desde kHz a 1 MHz y se verificaron las señales de salida de los circuitos en diferentes “puntos de prueba” TPn (tabla 4.9 y figura 4.38).

Punto de Prueba	Señal a medir
TP1	Salida de optoacoplador
TP2	Salida de Driver
TP3	GATE
TP4	Divisor de voltaje
TP5	Seguidor de Voltaje
TP6	Salida comparador de frecuencia
TP7	Salida comparador de corto
TP8	Salida de convertidor F/V

Tabla 4.9. Puntos de prueba en PCB.

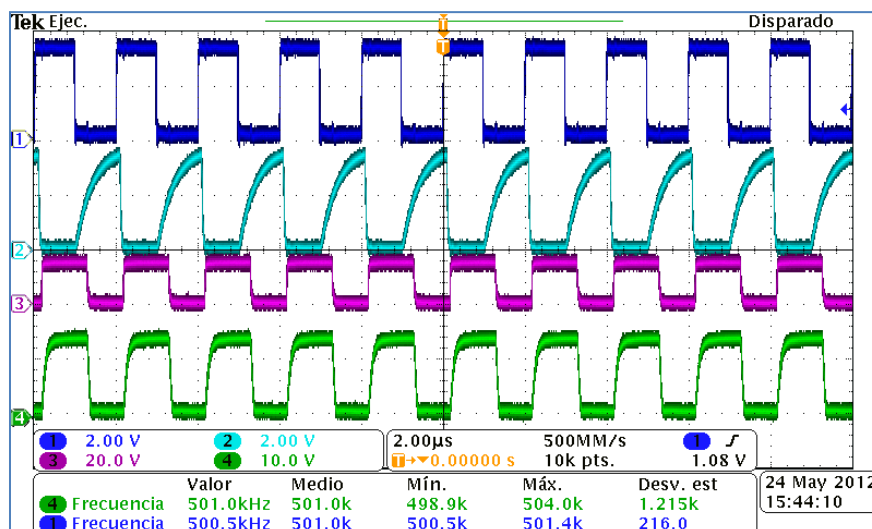


Figura 4.38. Comprobación de circuito oscilador, azul oscuro señal de generador de funciones a 500kHz, azul claro salida de optoacoplador, morado salida driver, verde GATE de MosFet

De todos los “puntos de prueba” sólo TP6 (salida del comparador de frecuencia) y TP7 (salida de comparador de corto) no mostraron las señales esperadas. Lo anterior se explicó al analizar los circuitos de la figura 4.39 en el punto “A”, observándose que al medir el voltaje de GAP en un generador de pulsos RC (figura 4.39 a), este varía junto con la fuente de descargas (capacitor) conforme a su ciclo de carga y descarga, y en un generador estático de pulsos (figura 4.39 b), la fuente de descargas es independiente, es decir, no varía su valor porque no es la responsable de la conmutación sino el MosFet, por ello en este punto sólo se puede apreciar el “esfuerzo” que realiza la propia fuente de voltaje para mantener su valor de salida cuando se generan las descargas eléctricas.

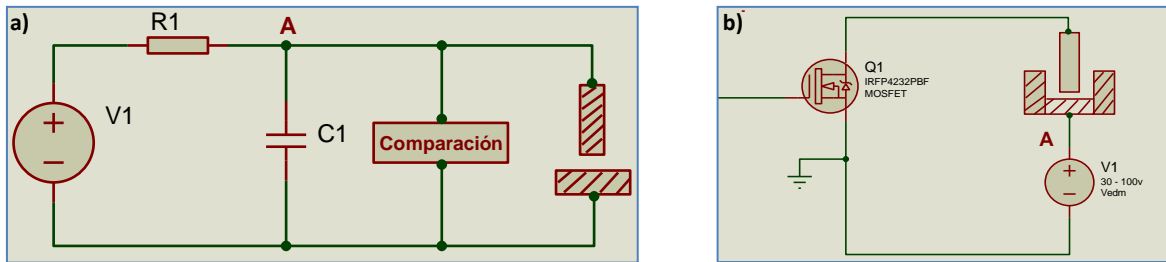
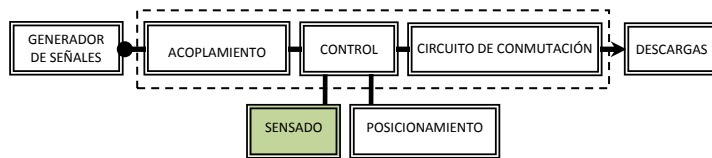


Figura 4.39. Medición de voltaje de GAP en fuente EDM, a) izquierda en generador RC, b) derecha en generador de pulsos.

4.6.1 Ajuste al sistema de detección



Una vez que se identificó la problemática en la detección se modificó la estrategia de detección a el punto B (figura 4.40), que corresponde al electrodo y terminal DREN del MosFet se volvieron a verificar los puntos de prueba y se encontró una adecuada respuesta, excepto en TP7 (salida de comparador de corto) la cual mostraba una señal de conmutación. Esto se explicó considerando que en el generador de pulsos RC el ciclo de descarga no llega a 0V, lo que correspondería a la descarga total del capacitor (esto sólo se produciría con un corto circuito entre electrodos); en un generador estático de pulsos al tratar de medir el comportamiento del voltaje de GAP en el mismo punto, su valor sí llega a 0V, porque el MosFet se apaga (obligado por la conmutación) y se genera la señal alternante de 0V aunque éste no se origine físicamente entre los electrodos (Figura 4.41).

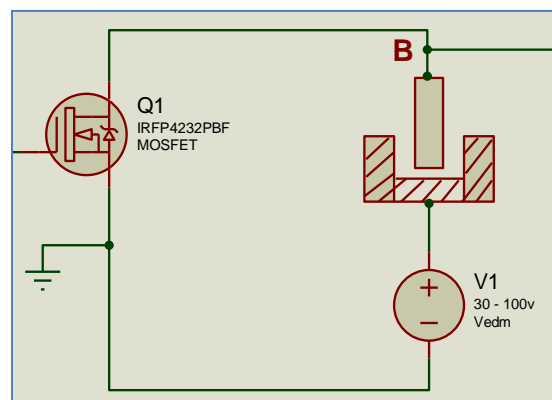


Figura 4.40. Medición de voltaje de GAP en electrodo (DREN)

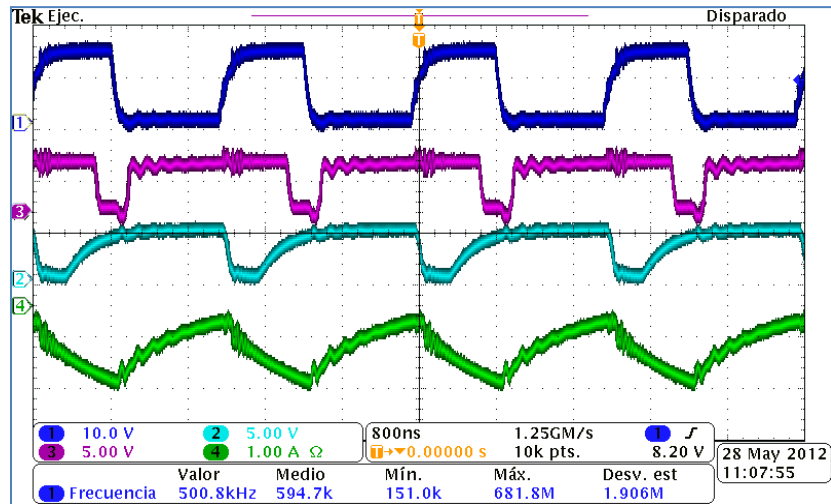


Figura 4.41. Comprobación de puntos de prueba a 500kHz, azul oscuro señal de GATE, azul claro salida de comparador de frecuencia, morado salida comparador de corto circuito, verde corriente de DREN.

Con el ajuste anterior se resolvió la detección de la frecuencia de trabajo, pero fue necesario implementar otro método de detección para la condición de corto circuito se propuso la utilización de una resistencia de Shunt [18] en la terminal de SOURCE del MosFet (figura 4.42). Se observó que físicamente la condición de corto circuito entre electrodo y pieza de trabajo equivale al aumento de corriente y una disminución de voltaje. El principio de la R_{shunt} se basa en la detección de la corriente a través del voltaje aplicado a la resistencia; esto es, considerando una resistencia de 1Ω , por ley de Ohm la corriente que circule por la resistencia será igual al voltaje aplicado en sus terminales. Este voltaje al verse aumentado (propiciando la condición de corto circuito) se compara contra una referencia fija y con ello se detecta dicha condición.

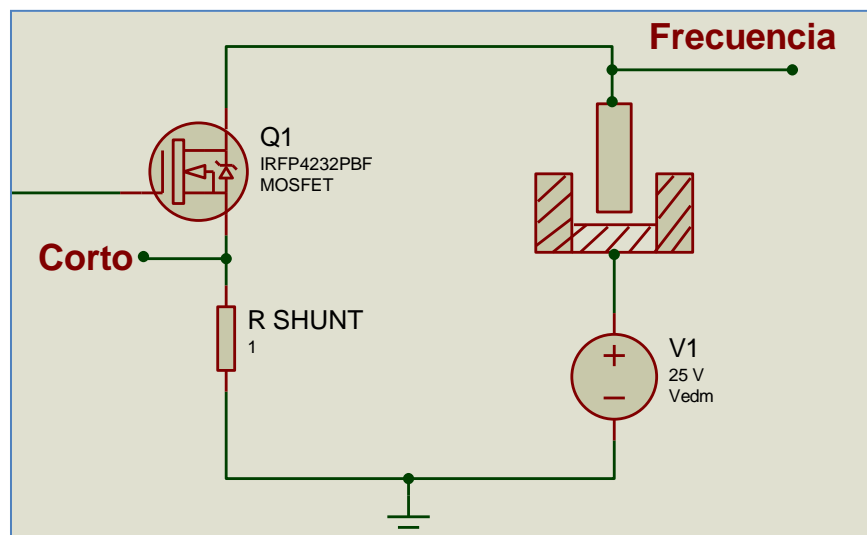


Figura 4.42 Implementación de resistencia de Shunt

Las nuevas consideraciones de diseño abarcaron: la inclusión de histéresis en las etapas de comparación, la omisión del seguidor de voltaje, la configuración los comparadores con una sola fuente, y los arreglos de resistencias se sustituyeron por resistencias únicas de precisión

La condición de corto circuito se simuló al interconectar manualmente las terminales de la resistencia de carga, observándose que su duración fue del orden de nanosegundos (figura 4.43), motivo por el cual se implementó a su salida un circuito multivibrador monoestable TTL (74121) con el fin de aumentar la duración del pulso (a través de una constante RC aproximadamente a un milisegundo) y garantizar su detección por el ARDUINO.

Se observó que este multivibrador tiene a su salida un voltaje máximo de 3.5v; se analizaron los niveles de voltaje permitidos en el ARDUINO, que considera los valores lógicos de la tabla 4.10 (muy parecidos a lógica CMOS), por lo que el valor de salida del multivibrador es aceptado como uno lógico.

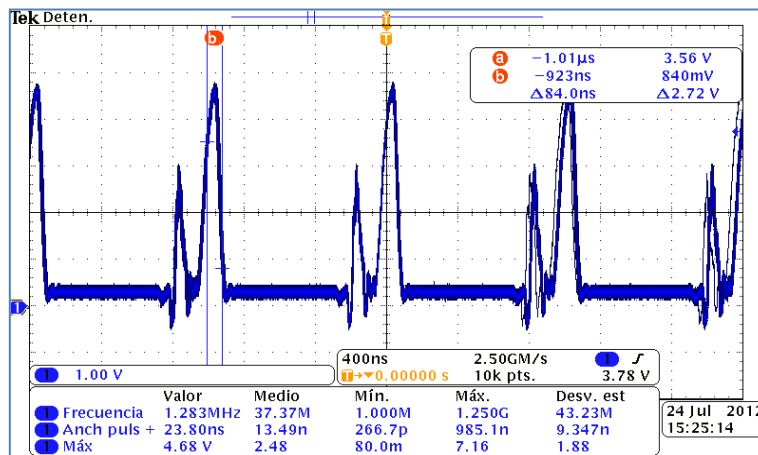


Figura 4.43 Ancho de pulso en condición de coto circuito.

Voltaje de entrada	TTL	CMOS	ARDUINO
BAJO (0 lógico)	0V – 0.8V	0V – 1.5V	-0.5V – 1.5V
ALTO (1 lógico)	2V – 5V	3.5V – 5V	3V – 5.5V

Tabla 4.10. Niveles lógicos de entrada

Una vez que se modificó el método de detección fue necesario llevar a cabo otro circuito impreso, (figuras 4.44 y 4.45) el cual integró todas las etapas y consideraciones hasta ahora planteadas.

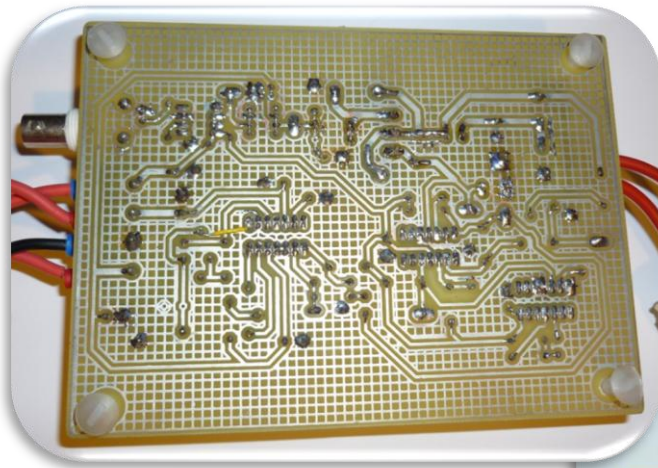


Figura 4.44. Detalle de pistas de PCB

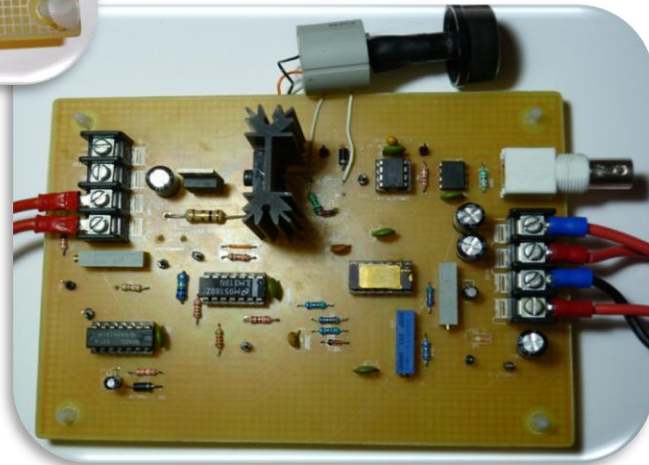


Figura 4.45. Detalle de componentes de PCB

En éste PCB se verificaron de nuevo los puntos de prueba y se observó que en todos ellos al aumentar la frecuencia de trabajo desde 50 kHz a 1MHz sus señales presentan distorsión y picos de sobre voltaje, los cuales son más representativas en la salida de los comparadores (figura 4.46 y 4.47) por lo se trataron de eliminar colocando estratégicamente capacitores (cerámicos / poliéster) y ferritas como filtros, se redujeron al mínimo la longitud de los cables de conexión a la fuente y electrodos, pero estas medidas no surtieron efecto alguno en las formas de onda de las señales.

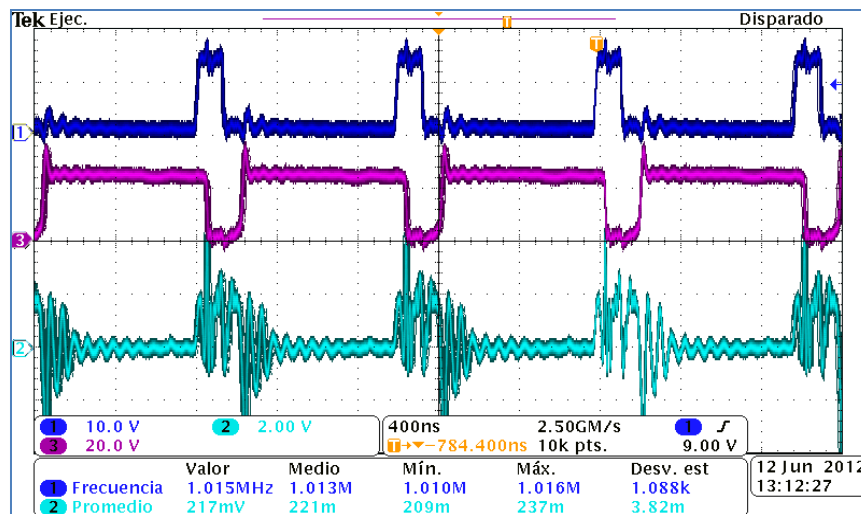


Figura 4.46. Distorsión de señales, azul oscuro señal de GATE, morado salida de comparador de frecuencia, azul claro salida comparador de corto circuito.

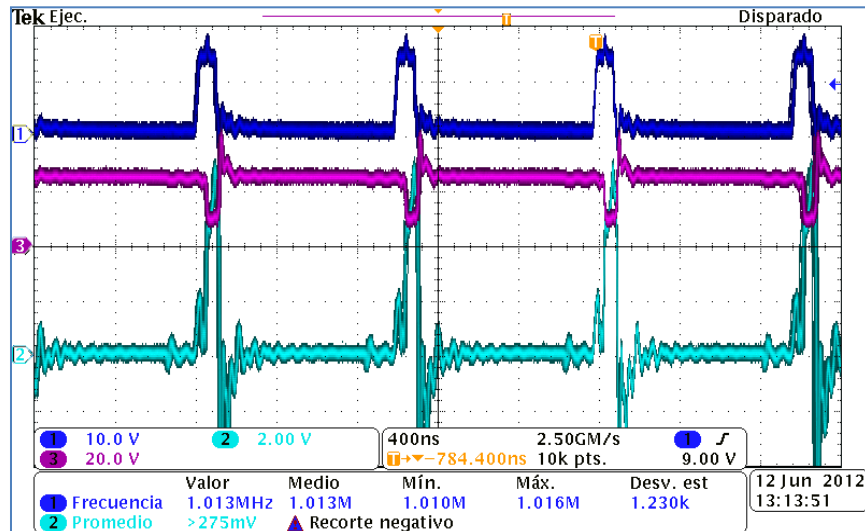


Figura 4.47. Distorsión de señales al simular un corto circuito, azul oscuro señal de GATE, morado salida de comparador de frecuencia, azul claro resistencia de Shunt.

En la búsqueda de corregir esta distorsión se realizaron las siguientes acciones:

Se agregaron disipadores de calor con grasa de silicón (en el MosFet y la resistencia de carga) para disipar mejor el calor y se logró un diseño de pistas en una sola cara y sin puentes en el circuito impreso.

Se retomó el análisis de los drivers para el MosFet por lo que se agregó una resistencia de 1MΩ a tierra con el fin de descargar la capacitancia de Miller en el GATE, se colocó un diodo zener de 15V en paralelo para evitar sobretensiones en el GATE y evitar destruirlo. Con estas acciones se logró eliminar el exceso de temperatura en el MosFet, posteriormente se colocó un potenciómetro de precisión (10 vueltas) sustituyendo la resistencia de encendido/apagado y se encontró su valor óptimo de trabajo (18Ω -30Ω).

Posteriormente se analizó el circuito de conmutación para determinar su estado (amplificación o saturación), encontrándose en saturación, acción que se corroboró seguidamente en el osciloscopio (figura 4.48).

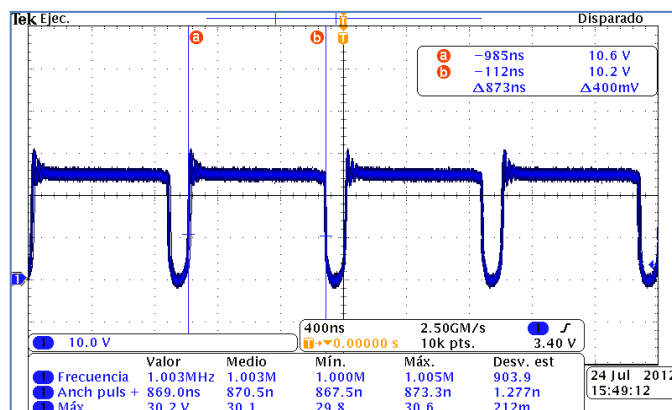
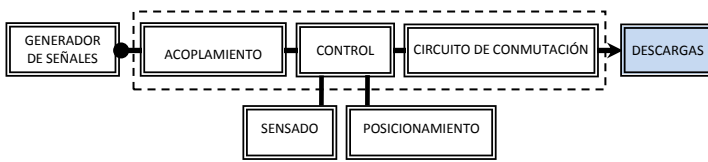


Figura 4.48. Comprobación de conmutación entre DREN y SOURCE.

4.6.2 Resistencia de Carga



Una vez descartada la deficiencia en la conmutación las medidas para minimizar la distorsión se redujeron al análisis de las características de los materiales utilizados en el circuito de oscilación, siendo las resistencias las de mayor probabilidad de sustituir se cambió la resistencia de carga bobinada de aluminio (10Ω , $50W$) por una resistencia aglomerada de carbón (56Ω , $5W$) y la resistencia de Shunt de alambre (1Ω , $2W$) por una resistencia de carbón (1Ω , $2W$) ver figura 4.49, con lo cual se obtuvo una significativa mejora en las señales del 90% debida a la desaparición de distorsiones y picos de voltaje de las señales.

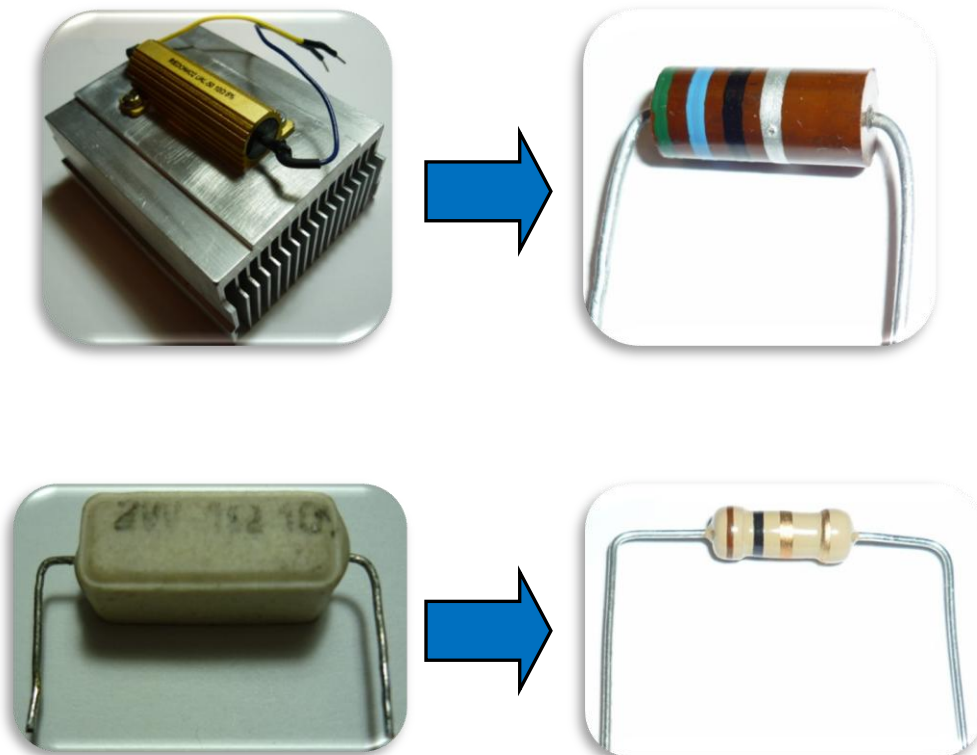


Figura 4.49. Arriba sustitución de resistencia de carga (aluminio), abajo sustitución de resistencia de Shunt (cerámica).

Motivo por el cual se midieron nuevamente las señales en cada uno de los puntos de prueba (figuras 4.50-4.61), ésta notable mejoría se debe a que al utilizar resistencias de carbón no se generan los efectos inductivos intrínsecos a la construcción de una resistencia de alambre.

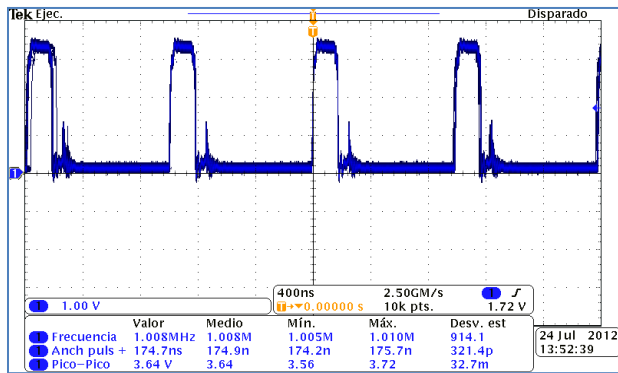


Figura 4.50. Gen. Fun. TTL, 1MHz, ciclo trabajo 175ns

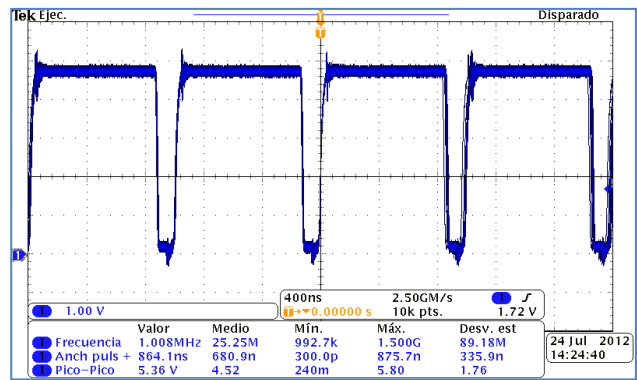


Figura 4.51. TP1 Salida de optoacoplador (amplitud 5V)

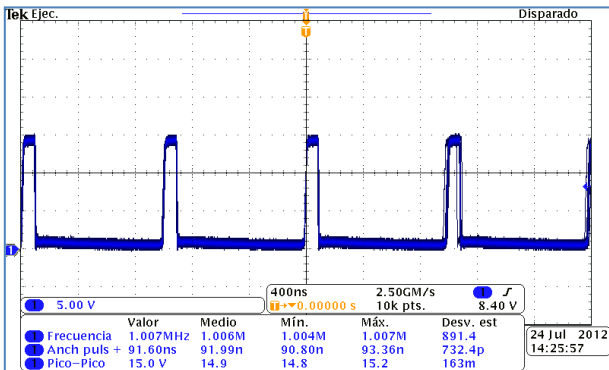


Figura 4.52. TP2 Salida de Driver (amplitud 15V)

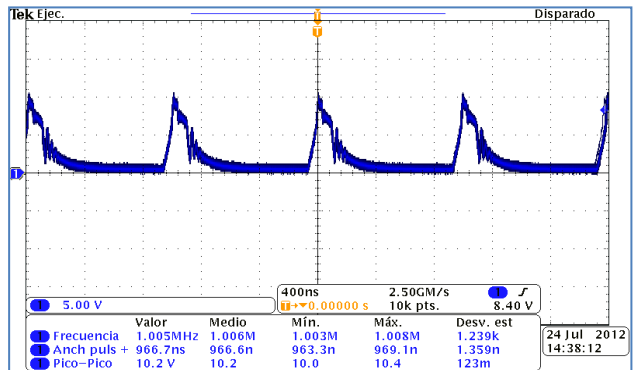


Figura 4.53. TP3 GATE MosFet (amplitud 10V)

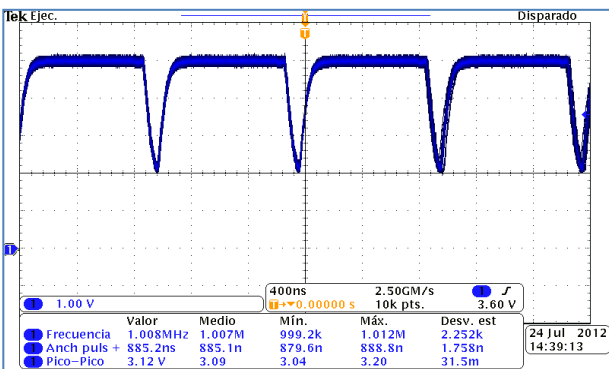


Figura 4.54. TP4 Censado de señal de frecuencia (5V) en Dren de MosFet

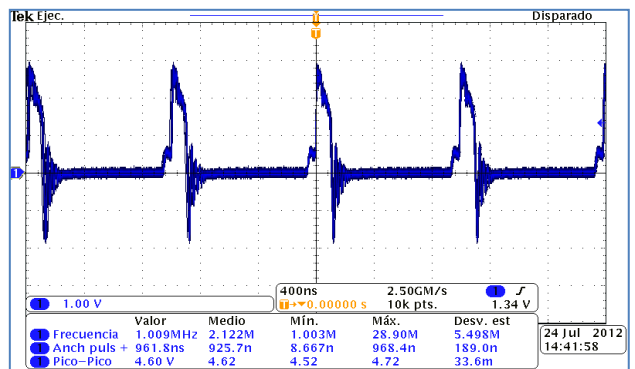


Figura 4.55. TP5 Censado de señal de corto circuito (2.8V) en resistencia de Shunt (sin corto)

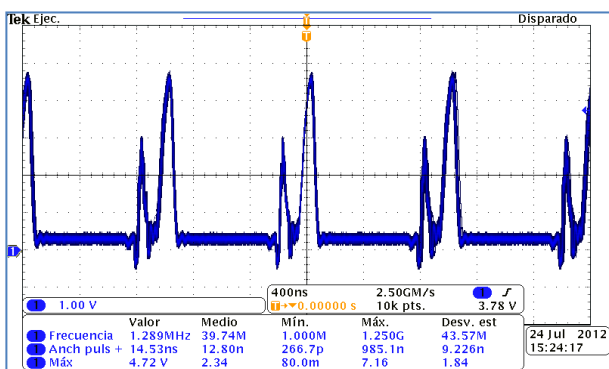


Figura 4.56. TP5 Censado de señal de corto circuito (10V) en resistencia de Shunt (con corto)

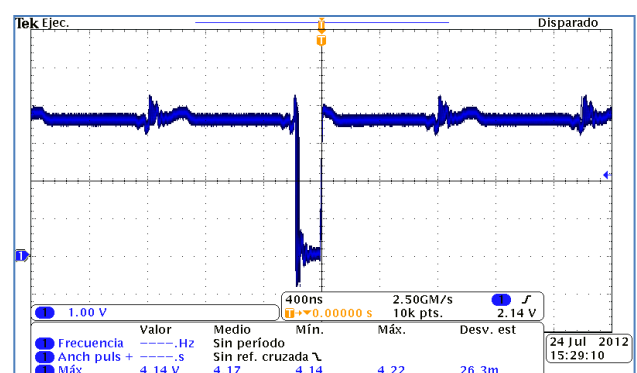


Figura 4.57. TP6 Salida de comparador de corto circuito (referencia a 5V, sin generar corto)

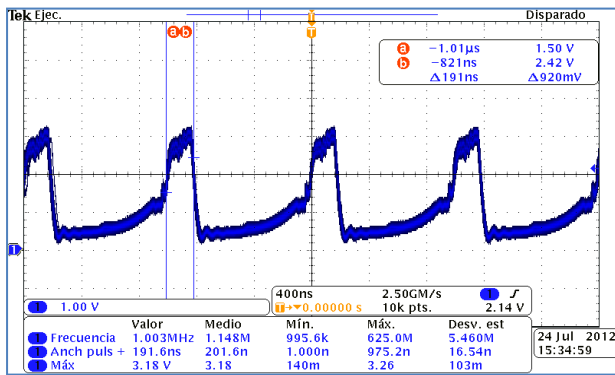


Figura 4.58. TP6 Salida de comparador de corto circuito (referencia a 5V, con corto)

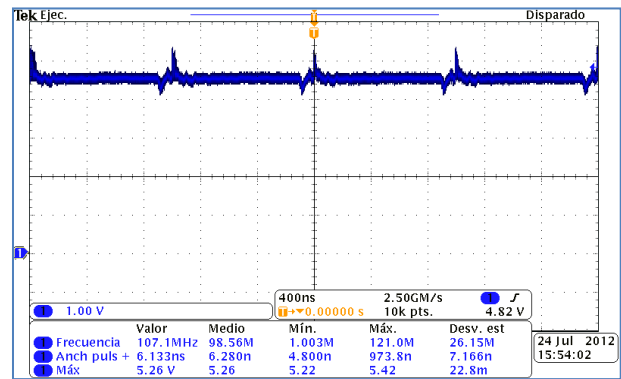


Figura 4.59. JP1 Salida de multivibrador (referencia a 3.5V, con corto)

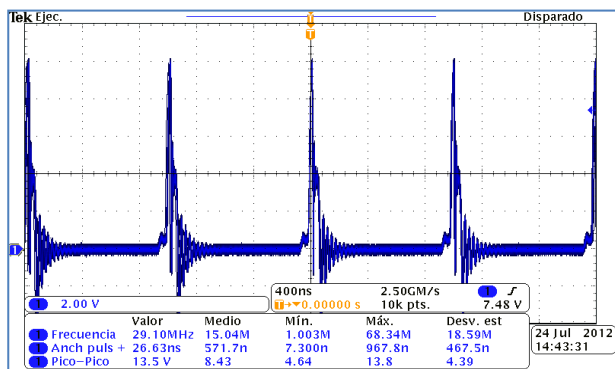


Figura 4.60. TP7 Salida de comparador de frecuencia

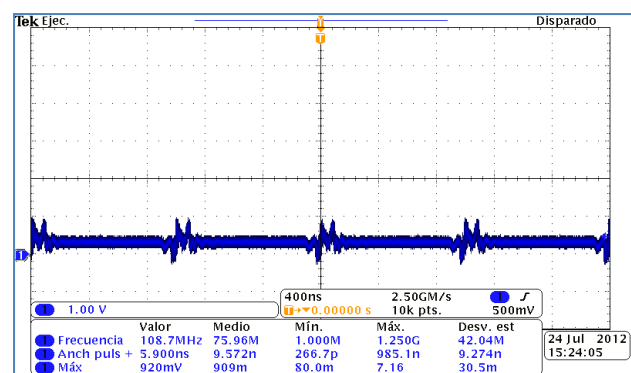


Figura 4.61. JP2 Salida de convertidor F/V, 5V a 1MHz.

4.6.3 Ciclo de trabajo

El uso de un generador de funciones permitió ajustar la frecuencia de trabajo a una señal cuadrada TTL de 1 MHz (periodo de $1\mu s = 1000ns$) con un ciclo de trabajo del 50%; y en aras de controlar las descargas eléctricas se propuso que a través de la modificación del parámetro del ciclo de trabajo del generador de funciones, también es posible variar la fracción de tiempo donde la señal es positiva o se encuentra en estado activo y con ello modificar la energía entregada en cada descarga.

Al trabajar con microEDM está implícito el deseo de obtener maquinados “más finos”, por ende se estableció trabajar en una primera instancia, con el menor ciclo de trabajo posible en este dispositivo.

Disminuyéndose el ciclo de trabajo en cada una de las etapas de circuito se observó su correspondiente salida en el osciloscopio hasta que dejó de operar establemente, de todos los circuitos revisados el convertidor F/V dejó de funcionar por debajo del valor que corresponde a un periodo activo de 173ns, estableciéndose así el límite mínimo del ciclo de trabajo (fig. 4.62).

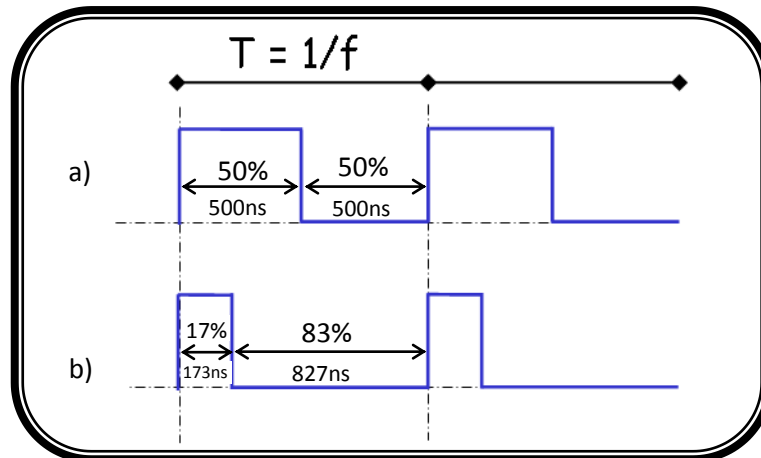


Figura 4.62. Detalle de ciclos de trabajo a) típico (50% activo y 50% inactivo), b) mínimo (17% activo y 83% inactivo).

Si comparamos los tiempos activos de la figura 4.62 se aprecia que los 173 ns del ciclo de trabajo “mínimo” equivalen a un 17% (prácticamente una tercera parte) del tiempo activo en el ciclo de trabajo “típico”; además se aprecia un incremento del tiempo inactivo al 83%.

Con esto se obtuvo un parámetro de control apto para trabajar establemente a 1 MHz y realizar pruebas de maquinado en el prototipo de microEDM.

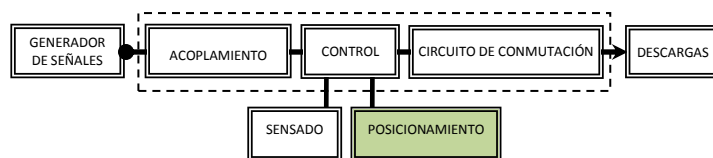
Capítulo 5. Pruebas y Resultados

5.1 Puesta en marcha

Hasta el momento las pruebas realizadas son consideradas “virtuales o fuera de línea” ya que por medio de una resistencia de carga óhmica (de carbón) se simuló la sección correspondiente a los electrodos, el medio dieléctrico y el fenómeno de descarga, con el fin de obtener y adecuar las señales de control del proceso empleadas en el sistema propuesto.

Para poner en marcha el dispositivo electrónico con pruebas “tangibles o en línea” se requirió sustituir las etapas previamente simuladas. Para ello se eligió trabajar con la manufactura por penetración o hundimiento (modalidad más sencilla en EDM), el material para el electrodo fue cobre (\varnothing 1mm), acero inoxidable para la pieza de trabajo [13], dieléctrico comercial, un sistema externo de recirculación por bombeo, un sistema de posicionamiento y control de electrodos.

5.1.1 Posicionamiento



Para este momento el sistema de posicionamiento (de una línea de investigación paralela) considerado inicialmente (motor piezoeléctrico con control PID) no estaba disponible, por lo que se desarrolló un sistema más sencillo para evaluar el desempeño del dispositivo. Se optó porque este hiciera uso de un servomotor axial como actuador [17] y un control básico On-Off independientes del PCB, ver figura (5.1); no obstante la pieza de trabajo se posicionó por medio de la platina de un centro de maquinado CNC.

El servomotor utilizado es marca: Ray Allen Co. Inc., modelo: T2-7A [17] con un voltaje de alimentación de 12-14v y una carrera de 17mm (figura 5.2), el cual se controló mediante un puente H a través del circuito integrado L293B; lo cual nos permitió su desplazamiento bidireccional con sólo 2 terminales de control (A y B).

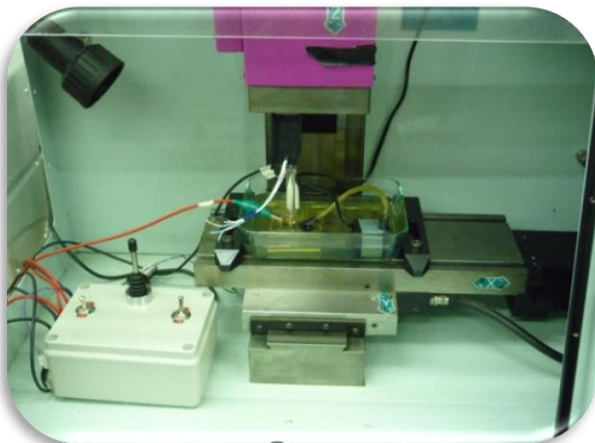


Figura 5.1. Sistema de posicionamiento básico.



Figura 5.2. Servomotor lineal.

Además se incorporó un portaelectrodo hecho de Nylamid (originalmente de acrílico pero se fracturó) y un tornillo de cobre (minimizar pérdidas por conducción) para ajustar el electrodo (figura 5.3).

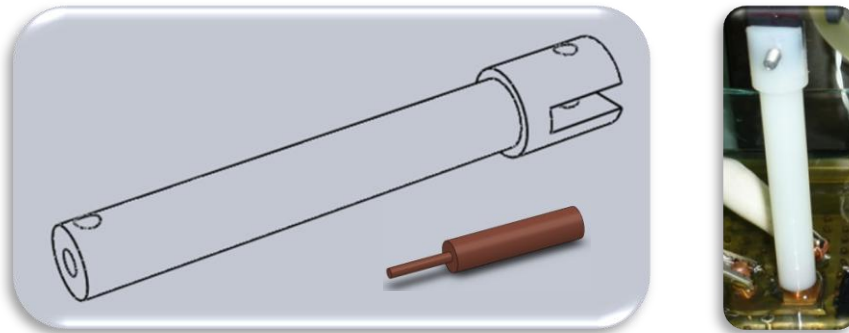
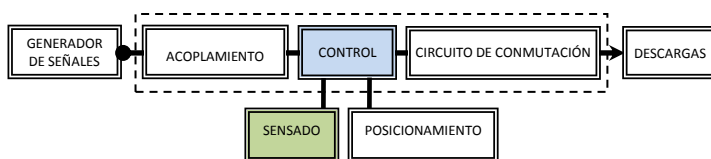


Figura 5.3. Detalle de porta-electrodo y electrodo

5.1.2 Control de posicionamiento



La sencillez que ofrecía el control “On-Off” lo hizo la opción más viable para incorporar a través de lógica combinatoria (TTL) las condiciones de operación del sistema, definiendo así una condición lógica para cada uno de los estados del proceso de descarga.

A este control se le añadieron dos interruptores con funciones adicionales (figura 5.4, las cuáles se detallan a continuación):



Figura 5.4. Control de posicionamiento.

1. Interruptor: Manual / Automático.

En una posición brinda la posibilidad de mover el electrodo manualmente a través de un joystick industrial con el fin de ubicar a voluntad la carrera del servomotor, es decir, elegir la separación entre electrodos y el momento de iniciar o detener el proceso de maquinado sin la necesidad de apagar en su totalidad el prototipo ni desmontar los electrodos. La otra posición da lugar a la operación automática de acuerdo a la lógica establecida

2. Interruptor: Modo 1/Modo 2.

Las señales que alimentaron la lógica de control para posicionamiento del motor fueron tomadas del PCB en la sección del generador estático de pulsos. La acción tomada para cada condición en la descarga se definió por dos señales, una para sensar la presencia de corto circuito (incremento de corriente en la resistencia de Shunt) y otra que detectó la descarga (por medio de un comparador del nivel del V_{EDM}). De este razonamiento se idearon dos posibles modos de control automático (tablas 5.1 y 5.2), los cuales se implementan a través de compuertas NAND (LS7400).

Estado EDM	Corto cto.	V_{EDM}	A	B	Acción Servo
Chispa o descarga	0	0	0	0	Alto
Circuito abierto	0	1	1	0	Baja
Corto cto.	1	0	0	1	Sube
Corto cto.	1	1	0	1	Sube

Tabla 5.1. Modo 1 de control automático.

Estado EDM	Corto cto.	V_{EDM}	A	B	Acción Servo
Arco/chispa	0	0	0	0	Sube
Circuito abierto	0	1	1	0	Baja
Corto cto.	1	0	0	1	Sube
Corto cto.	1	1	0	1	Sube

Tabla 5.2. Modo 2 de control automático.

En el primer modo se consideró que la secuencia de las condiciones de la descarga se presentarían suponiendo el orden del descenso idóneo del electrodo (circuito abierto, chispa, arco y corto circuito). En tal caso, una vez puesto en marcha el sistema la condición de circuito abierto (V_{EDM} sin variación) produciría el descenso del electrodo, a continuación seguiría bajando y se generaría una primera chispa o descarga por lo que el V_{EDM} variaría su valor, detectándose esta condición por un comparador de nivel (ver figura 5.5), como resultado la acción del servo sería “Alto” (el servo se detiene) y permitiría mantener la distancia de GAP ideal en la cual se seguirían generando descargas consecutivamente, hasta que el material removido propicie de nuevo la condición de circuito abierto.

Para el segundo caso se consideró que con esta lógica de control, no es posible distinguir entre las condiciones de chispa y arco, por lo que cualquier variación del V_{EDM} al pasar por el comparador haría que el motor “Suba”, es decir, salga de esa condición y entre en condición de circuito abierto propiciando que el motor baje y así sucesivamente hasta detener el proceso.

Nótese que en ambos casos se propuso que la condición inicial del sistema fuera circuito abierto

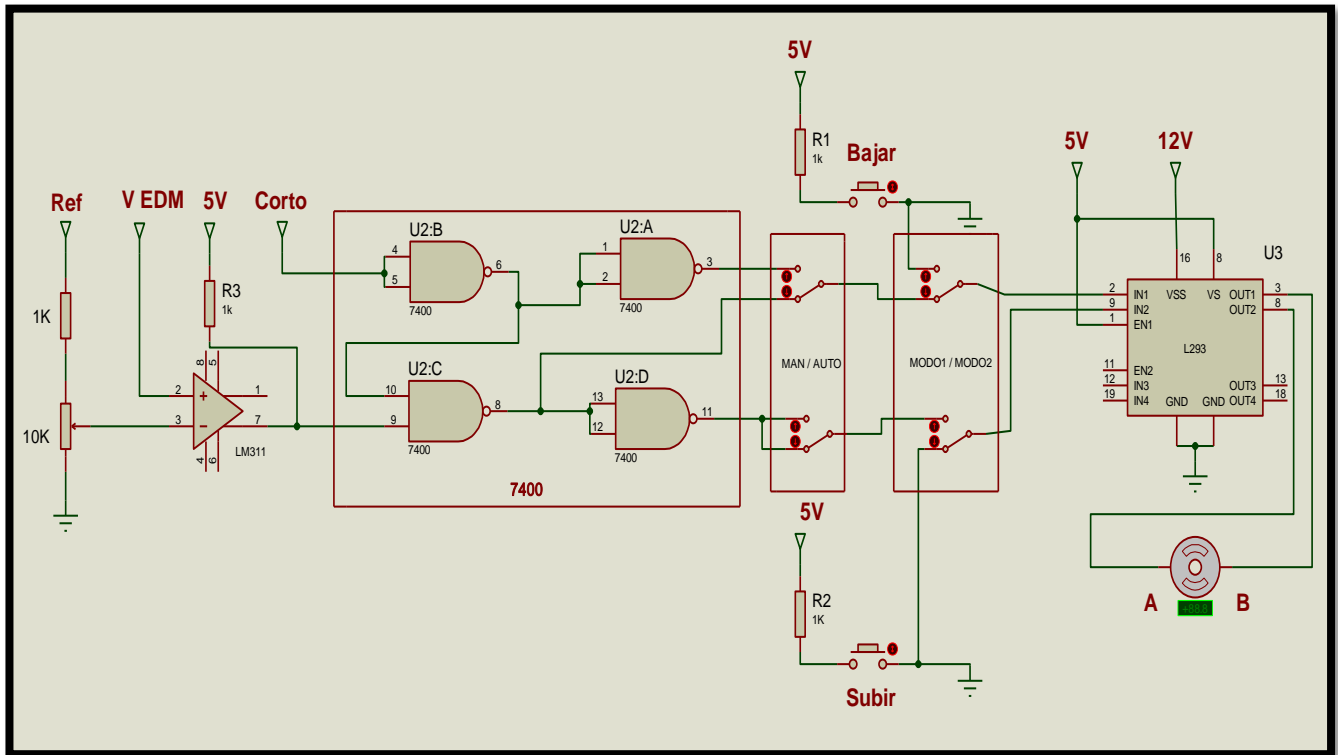


Figura 5.5. Diagrama de control ON-OFF y lógica de condiciones micro EDM

5.2 Pruebas por penetración

Una vez conectadas y ajustadas las fuentes de voltaje, el generador de funciones, el osciloscopio y el sistema de posicionamiento, el prototipo luce como en la figura 5.6.

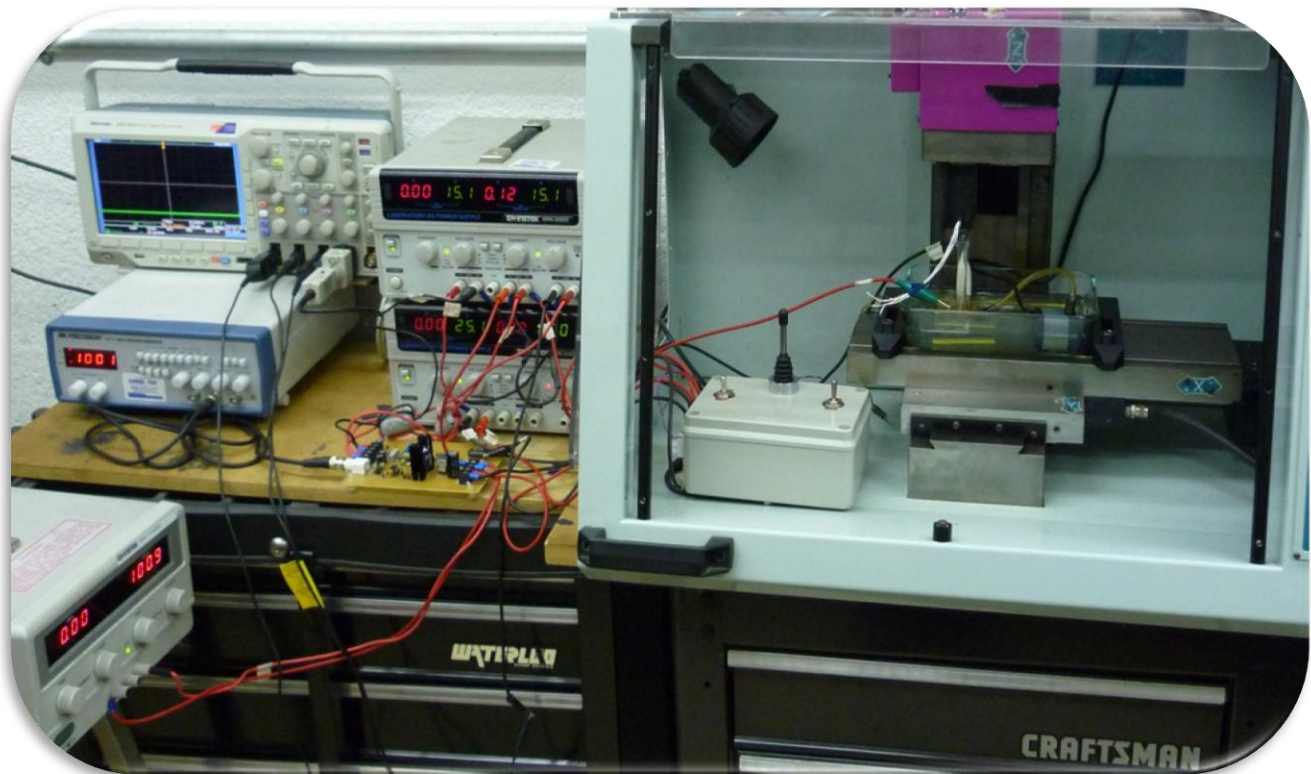


Figura 5.6. Puesta en marcha de dispositivos.

En donde se puede apreciar cada una de las partes que componen en prototipo e incluso un equipo CNC del cual se hizo uso de su platinas, para montar y orientar la zona de maquinado del sistema.

Una vez verificada la presencia de los voltajes de alimentación se revisaron los puntos de prueba colocados estratégicamente de acuerdo con la tabla 5.1. A continuación en modo manual se posicionó a una tercera parte de su carrera el servomotor dando una separación entre electrodos de 5mm aproximadamente, con ayuda del eje z de la fresadora CNC, y con los ejes X, Y se ubica la zona a perforar. Por último se enciende la bomba que hará recircular el dieléctrico.

Para la primera prueba se estableció que el voltaje de la fuente de EDM fuera de 30V, el sistema se puso en marcha cambiando a modo automático y modo 2 para el control del motor a continuación comenzó el descenso del electrodo y se observó el fenómeno de la figura 5.7, el cual se atribuyó a la generación de descargas; además se percibió la acción de subir y bajar del motor con esto en mente se establece una prueba de 3 minutos de trabajo durante los cuales con el osciloscopio se cotejaron los puntos de prueba TP1-TP8, la señal de generador de funciones, ciclo de trabajo (173ns), fuentes de alimentación, señales de control para motor, y a través de una sonda de corriente en el electrodo se visualizó la secuencia de las descargas (figura 5.8).



Figura 5.7. Micro EDM en acción.

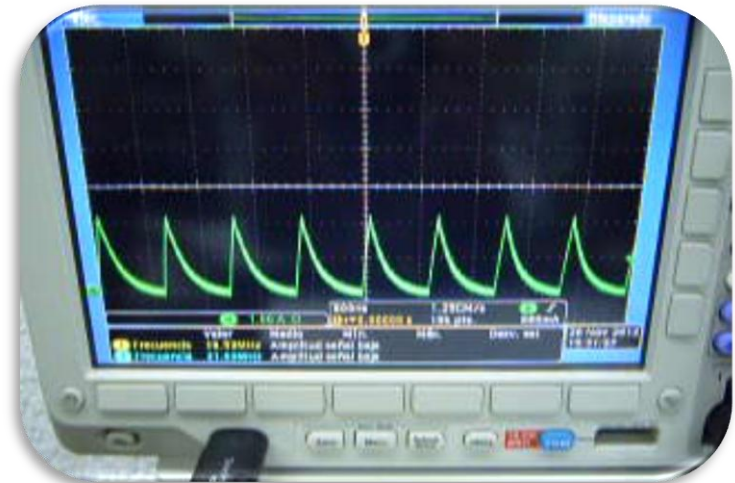


Figura 5.8. Detalle de sonda de corriente en electrodo

Realizando esta prueba un par de veces más y analizando los resultados, se distinguió que:

1. La coloración e intensidad de la luz producida entre electrodos no era la esperada (se esperaba una coloración blanca azulada de menor intensidad), ver fig. 5.7.
2. Aparece un patrón, así como una amplitud inusual para el fenómeno de descarga (fig. 5.8)

Ambos detalles dieron la impresión de ser una señal continua interrumpida solamente por la periodicidad de la conmutación del MosFet. Esto es, se descartó la condición de chispa por las características de la luz emitida, la de circuito abierto porque la sonda no detectaría corriente alguna, la de corto circuito porque al estar en contacto los electrodos no habría efecto luminoso; resumiendo la única condición que justificaría este comportamiento es el arco eléctrico, que conmuta por la acción del MosFet. Esta suposición se vio reforzada al inspeccionar en la pieza de trabajo la impresión o huella dejada por el maquinado (figura 5.9) en la cual se apreció que el contorno no es un círculo, es amorfa debido a la variación sin control de energía de los arcos eléctricos producidos, también es posible apreciar que no existe uniformidad en los cráteres dejados por la remoción de material, esto podría ser el resultado de la aparición intermitente de la condición de corto circuito.

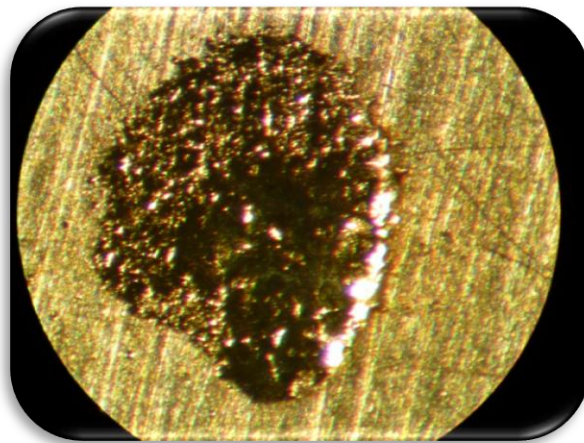


Figura 5.9. Detalle en microscopio de primer maquinado

Este resultado condujo a sospechar en primer lugar que el motor no estuviera realizando la acción de subir/bajar de acuerdo a la lógica establecida, para comprobarlo se puso en marcha el prototipo con la salvedad de operar el motor en modo manual; los resultados fueron los mismos.

Se optó por revisar la principal señal de control: la de corto circuito, para ello se produjo manualmente esta condición y se observó su respuesta a diferentes voltajes de fuente EDM (figuras 5.10-5.19).

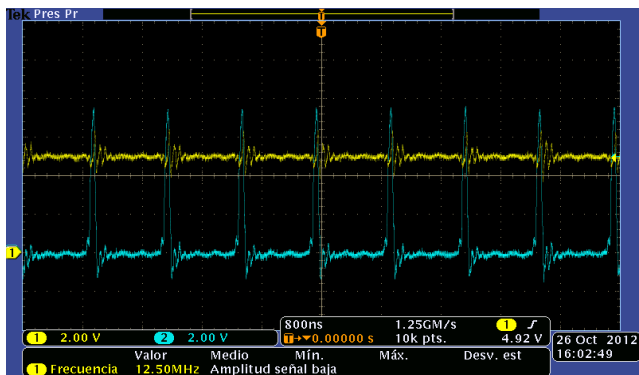


Figura 5.10. Corto circuito a 100V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V).

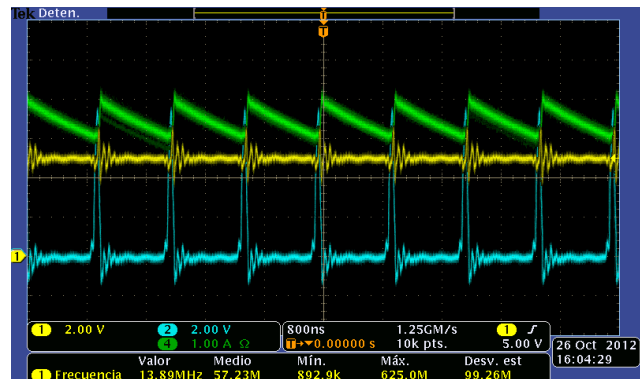


Figura 5.11. Corto circuito a 90V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM} .

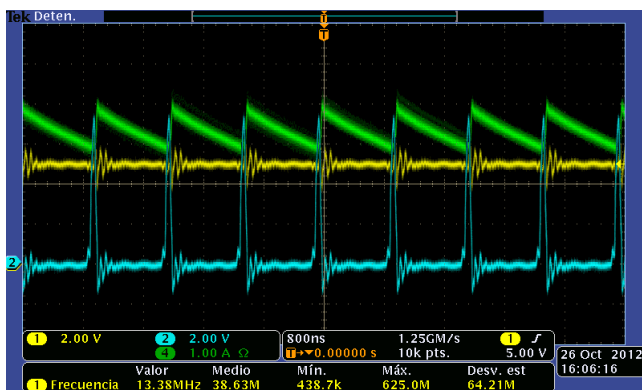


Figura 5.12. Corto circuito a 80V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM} .

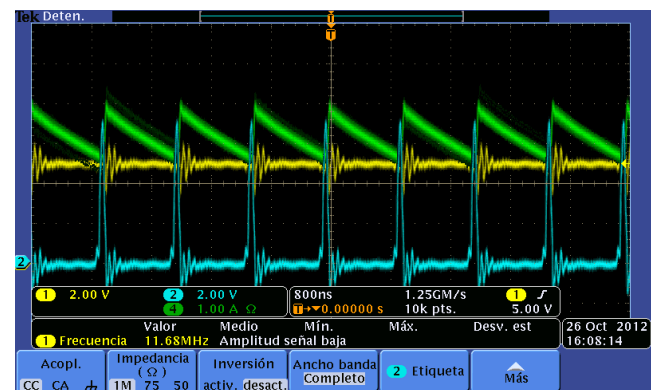


Figura 5.13. Corto circuito a 70V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM} .

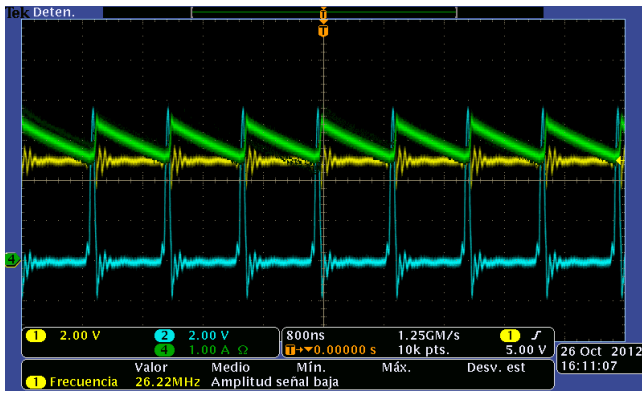


Figura 5.14. Corto circuito a 60V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM}.

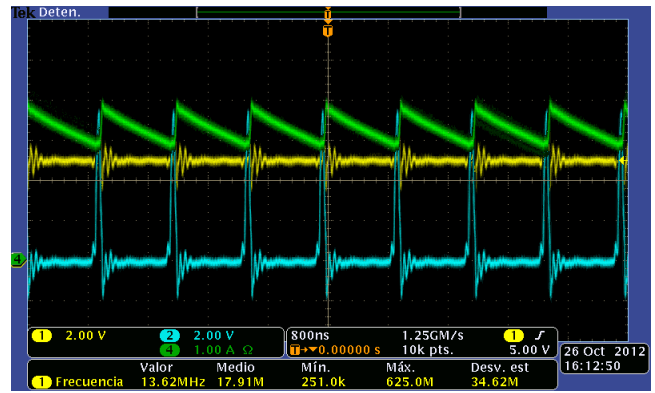


Figura 5.15. Corto circuito a 50V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM}.

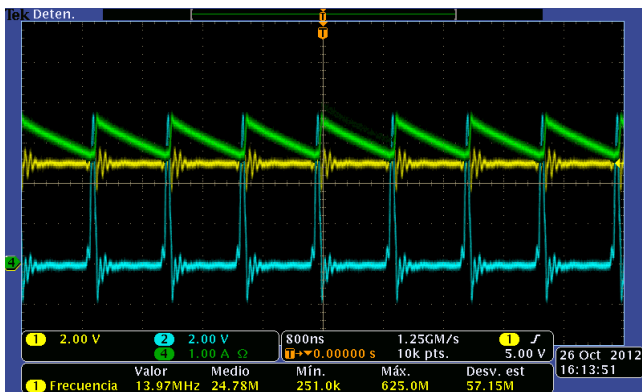


Figura 5.16. Corto circuito a 40V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM}.

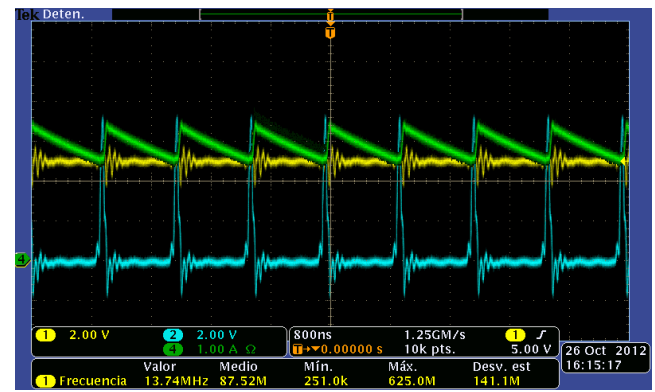


Figura 5.17. Corto circuito a 30V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM}.

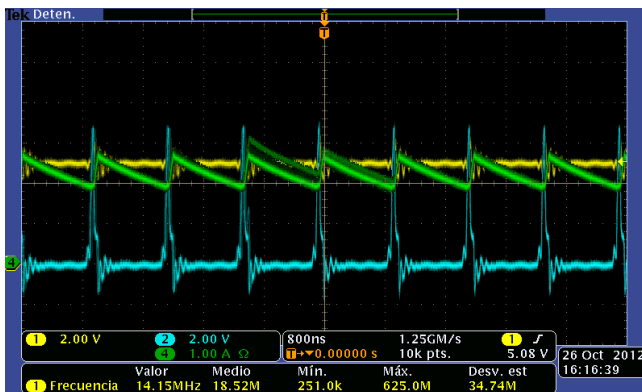


Figura 5.18. Corto circuito a 20V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM}.

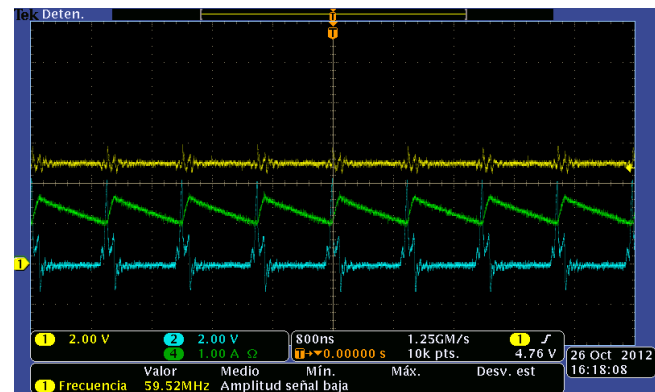


Figura 5.19. Corto circuito a 10V, en azul voltaje de Shunt, en amarillo referencia de comprador (5V), en verde I_{EDM}.

Graficando estos datos se apreció su tendencia notándose que a partir de los 60V en la fuente de EDM hay una discontinuidad en el voltaje de Shunt (figura 5.20 y tabla 5.3). Es importante señalar que aunque se procuró realizar la prueba en el menor tiempo posible, ya que obligar la condición de corto circuito supone un voltaje cero entre electrodos y un máximo de corriente en el circuito, al finalizar las mediciones provocó daños en los componentes que lo conforman.

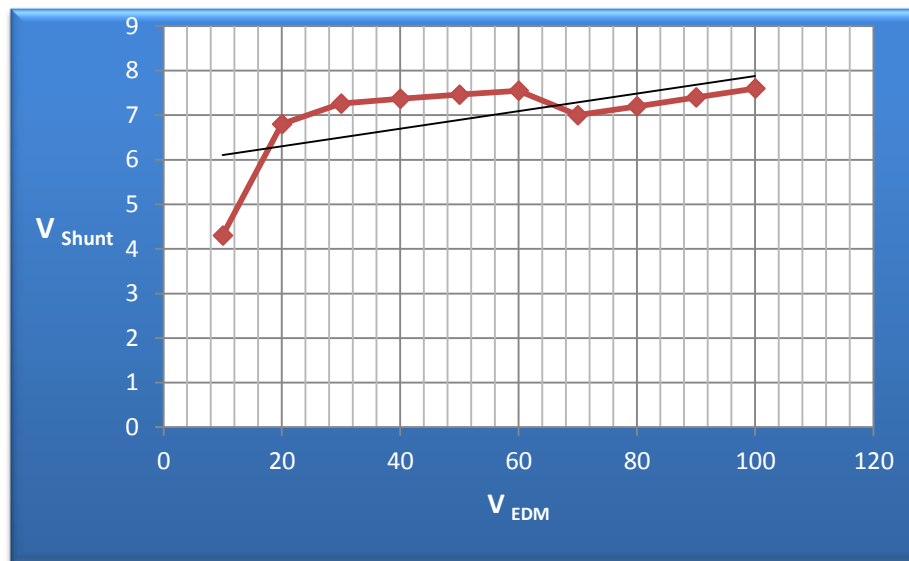


Figura 5.20. Grafica de resultados de corto circuito a diferentes V_{EDM}

Voltaje EDM (V)	V_{Shunt} (V)	I_{Fuente} (A)
100	7.6	0.48
90	7.4	0.47
80	7.2	0.46
70	7.0	0.45
60	7.55	0.44
50	7.46	0.43
40	7.37	0.42
30	7.26	0.41
20	6.8	0.37
10	4.3	0.24

Tabla 5.3. Señal de corto circuito a diferentes voltajes EDM

Una vez identificados y sustituidos los componentes afectados (Driver, MosFet, R_{Gate} , R_{Shunt} , multivibrador monoestable, comparadores de circuito conmutador y de control motor), el prototipo quedó en condiciones de operación. Nuevamente se constató la presencia de los voltajes de alimentación, se revisaron los puntos TP1-TP8 y las señales de control.

Como siguiente paso en la búsqueda de establecer los parámetros adecuados de operación se propuso incrementar el voltaje de trabajo de fuente V_{EDM} a 100V (máximo permitido). Se verificaron una vez mas todas las señales (siendo adecuadas) permaneciendo sin cambio, a excepción de los dos detalles que inicialmente no correspondían (la luz emitida entre electrodos y la señal detectada por la sonda). A ahora la luz es blanca-azulada de poca intensidad (figura 5.21) y la corriente de las descargas medida a través de la sonda de corriente del osciloscopio (figura 5.22) cambio su forma de onda y frecuencia, incluso el sonido emitido por las descargas varió.

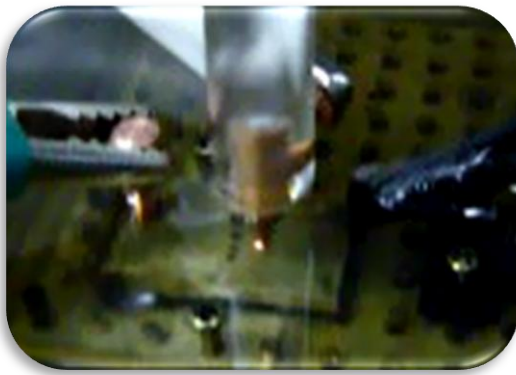


Figura 5.21. Micro descargas con un voltaje EDM de 100V

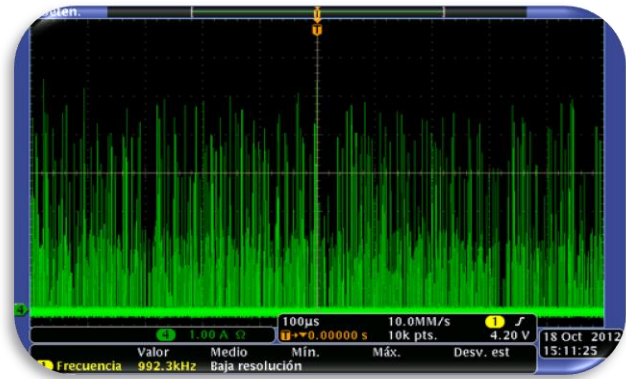


Figura 5.22. Micro descargas con un voltaje EDM de 100V

A continuación se muestra una prueba de manufactura por un lapso de 10 minutos (figura 5.23)

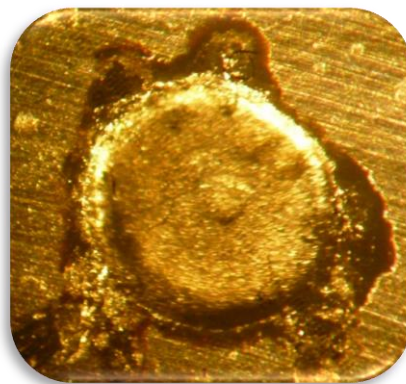
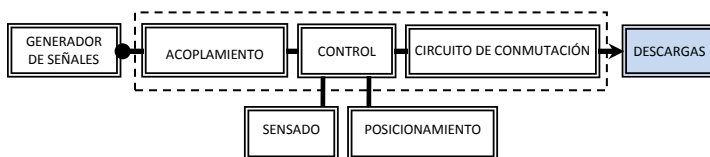


Figura 5.23. Primera muestra de micro electroerosión en acero inoxidable con un voltaje EDM de 100V

5.2.1 Variación de fuente VEDM



Habiendo identificado que un voltaje mayor de EDM es funcional para el sistema, se realizaron pruebas para diferentes V_{EDM} , que van desde los 20 a los 100V por un lapso de 10 minutos para cada una (figura 5.24).

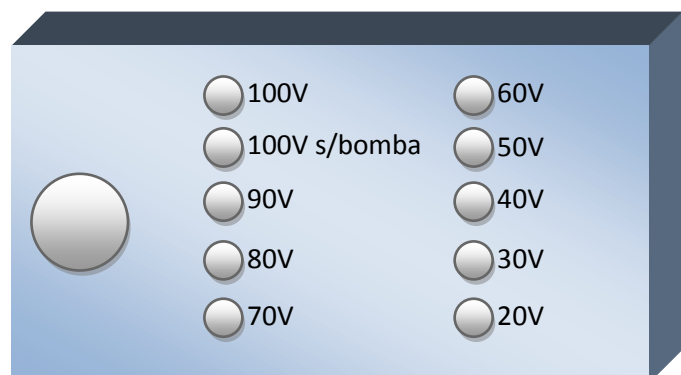
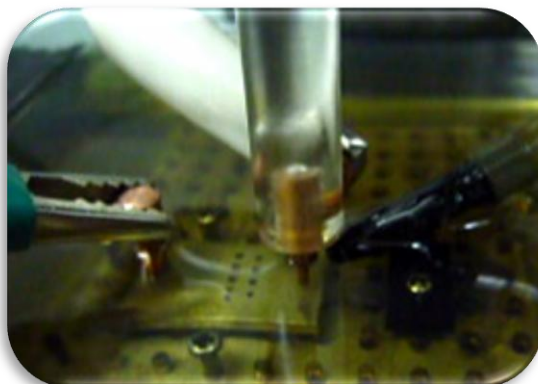


Figura 5.24. Pruebas de microelectroerosión con V_{EDM} de 20V a 100V

Las cuales se colocaron en el microscopio óptico (figuras 5.25) para apreciar los efectos del maquinado a diferentes voltajes (figuras 5.26-5.35).

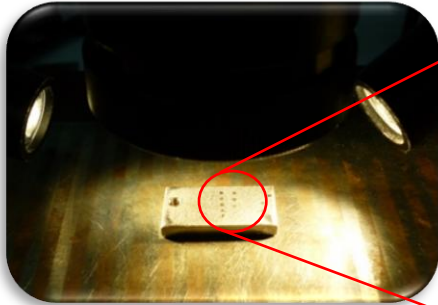


Figura 5.25. Detalle de microscopio

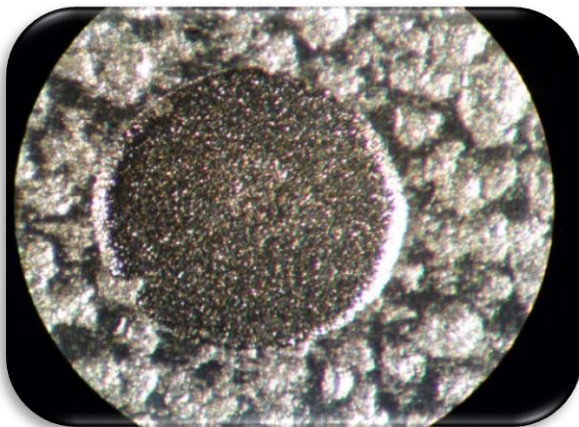
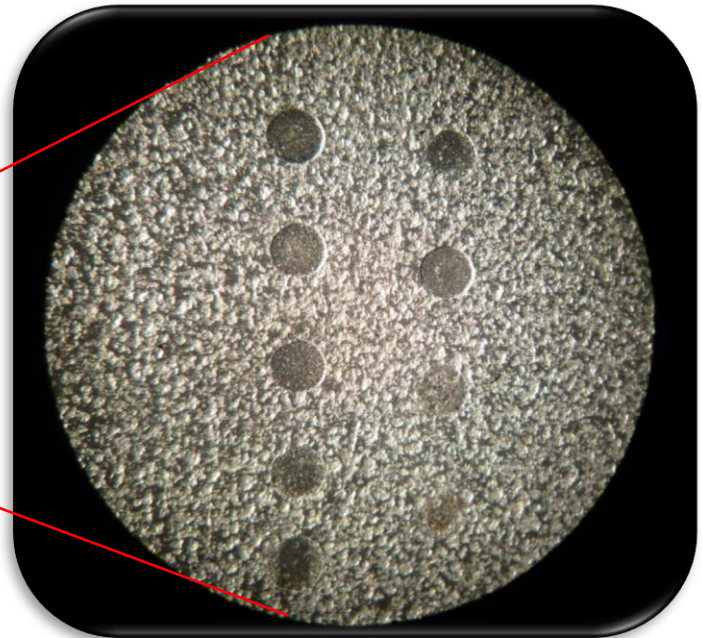


Figura 5.26. Detalle de microscopio $V_{EDM}=100V$

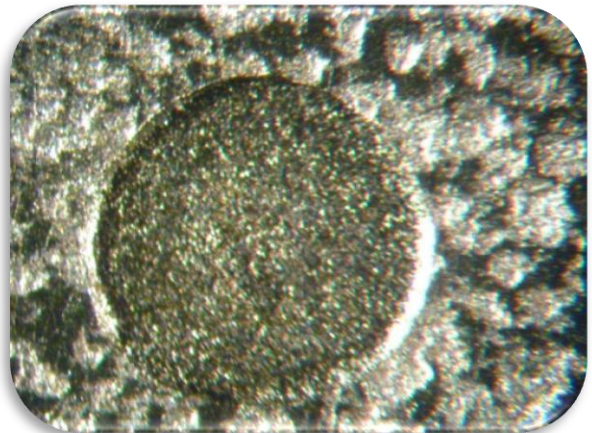


Figura 5.27. Detalle de microscopio $V_{EDM}=100V$, sin bomba

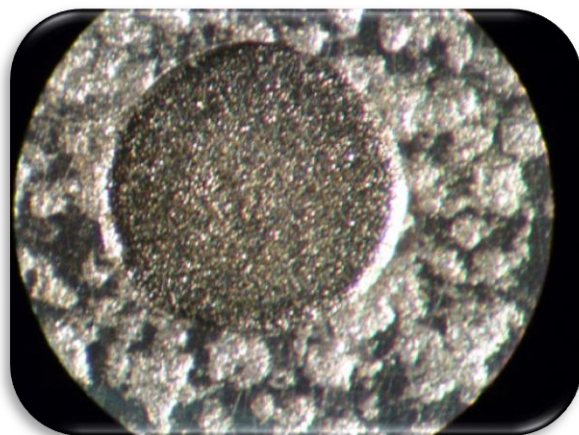


Figura 5.28. Detalle de microscopio $V_{EDM}=90V$

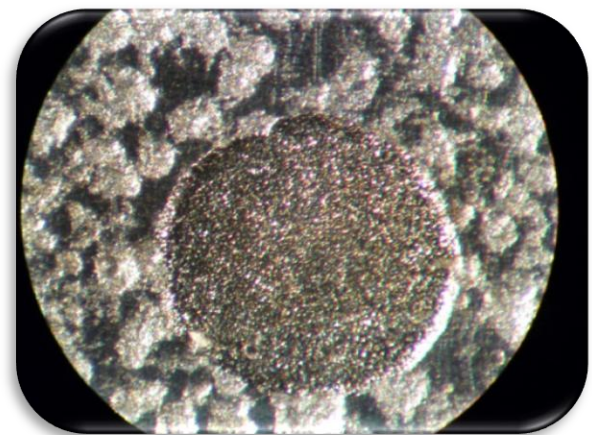


Figura 5.29. Detalle de microscopio $V_{EDM}=80V$

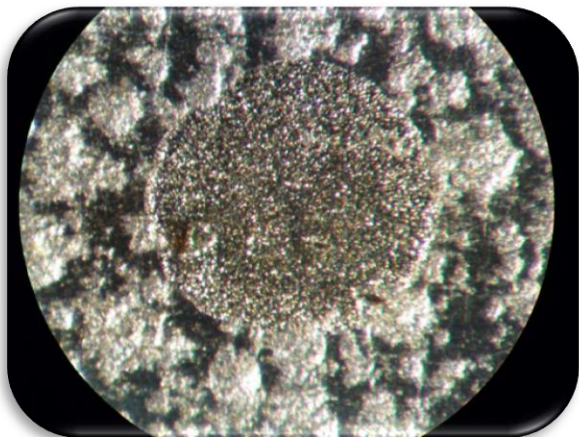


Figura 5.30. Detalle de microscopio $V_{EDM}=70V$

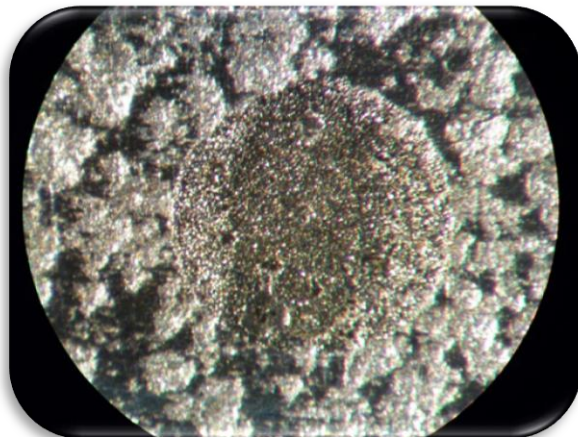


Figura 5.31. Detalle de microscopio $V_{EDM}=60V$

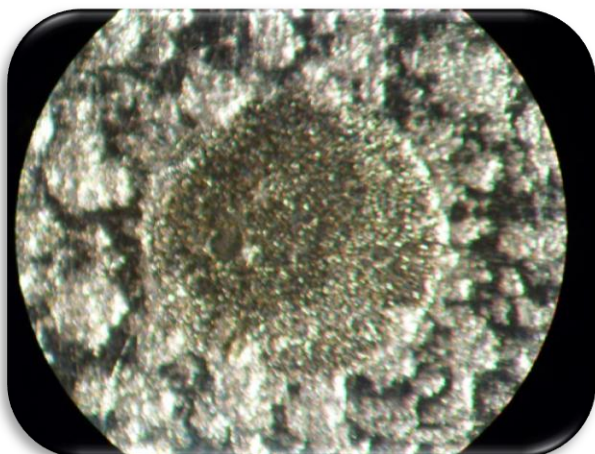


Figura 5.32. Detalle de microscopio $V_{EDM}=50V$

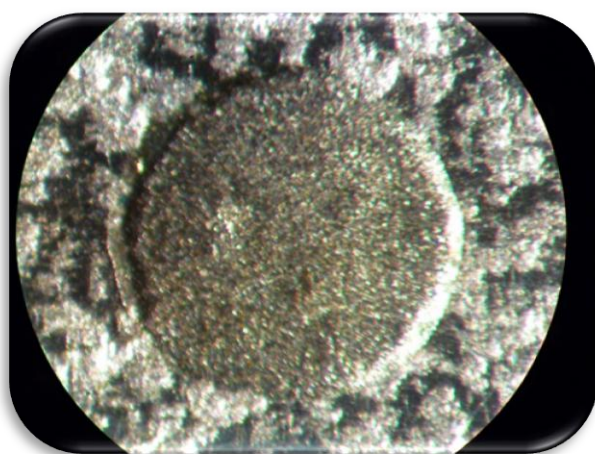


Figura 5.33. Detalle de microscopio $V_{EDM}=40V$

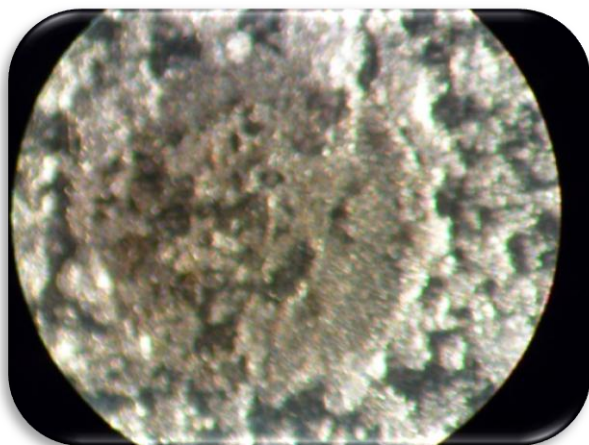


Figura 5.34. Detalle de microscopio $V_{EDM}=30V$

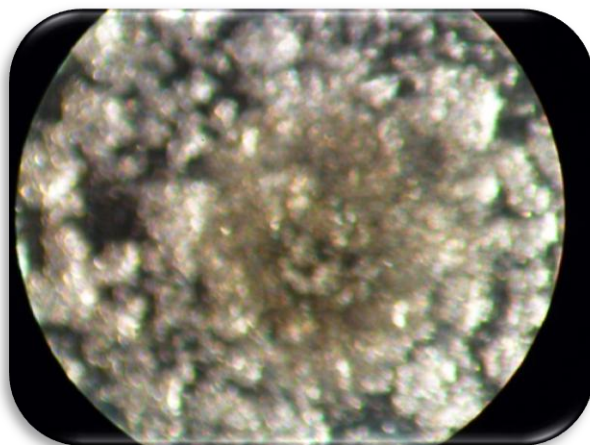
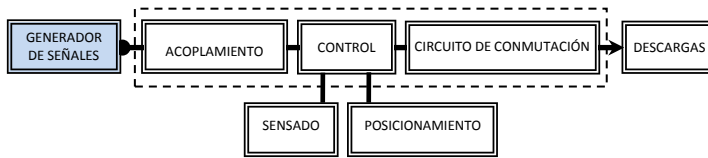


Figura 5.35. Detalle de microscopio $V_{EDM}=20V$

5.2.2 Variación ciclo de trabajo



Ya que se obtuvieron resultados favorables de penetración se optó por variar el estado activo de la señal de conmutación con un $V_{EDM} = 50V$. Se comenzó con una disminución a 142ns equivalentes a un 14.2% del ciclo de trabajo (menos energía en cada descarga) ver figura 5.36, al inicio se mantuvieron estables las señales de control pero al cabo de 5 minutos de operación comenzó la aparición periódica de arcos eléctricos (figura 5.37) y al final de la prueba no se apreció mejoría alguna en el acabado (figura 5.38).

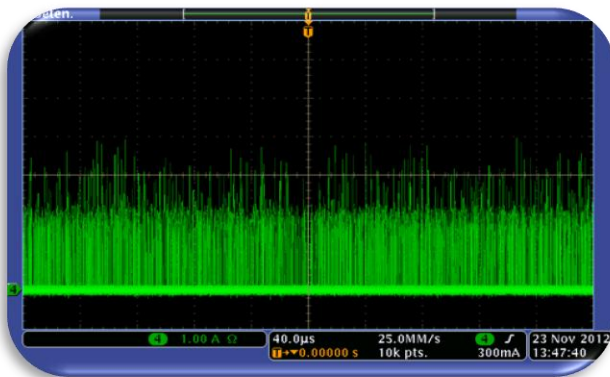


Figura 5.36. Menor amplitud de descargas $V_{EDM} = 50V$

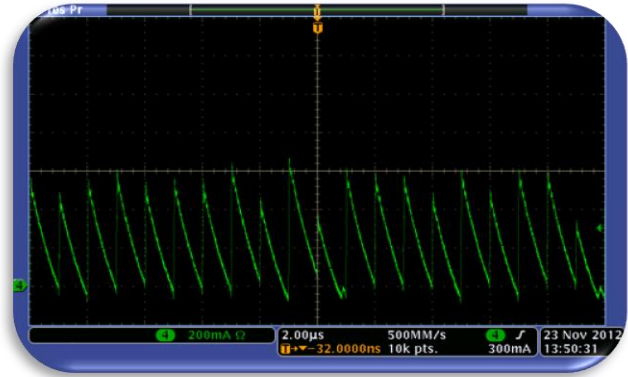


Figura 5.37. Aparición de arcos eléctricos $V_{EDM} = 50V$

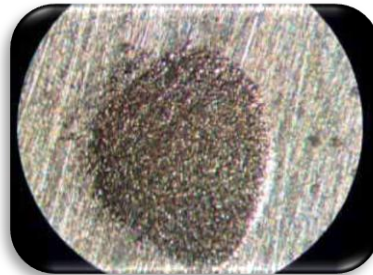


Figura 5.38. Detalle de maquinado con ciclo de trabajo al 14.2%

Al aumentar el estado activo de la señal de conmutación a 302 ns, el ciclo de trabajo se estableció en un 30% (más energía en cada descarga), este incremento significó un aumento de corriente en R_{Gate} , lo que al paso de 20 segundos de operación provocó un daño físico al generador de pulsos (optoacoplador, driver, MosFet, R_{Gate} , y R_{Shunt}), ver Figura 5.39.

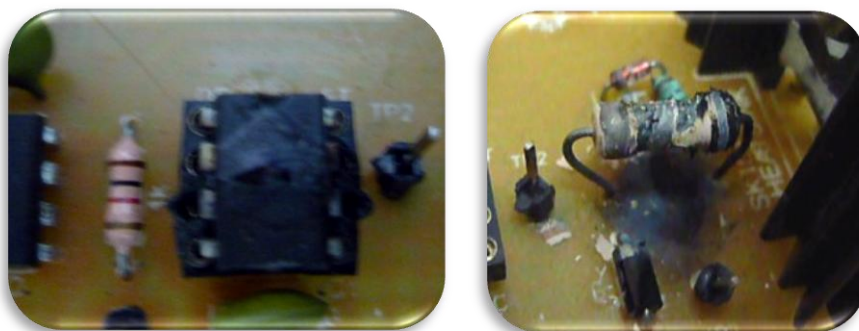


Figura 5.39. Daño en PCB con ciclo de trabajo al 30%

5.3 Prueba de Estampado

Una vez reparado el prototipo y como prueba final se sustituyó el electrodo circular por uno con el logotipo del laboratorio del grupo de trabajo de Micromecánica y Mecatrónica del CCADET, el cual tiene una profundidad de 0.5mm, en una probeta de 7mm², se implementó en el porta electrodo y se comenzó a maquinar con un $V_{EDM}=50V$ por un periodo de 30 hrs., al final de las cuales se obtuvo un grabado en la pieza de trabajo con las características de la figura 5.40.

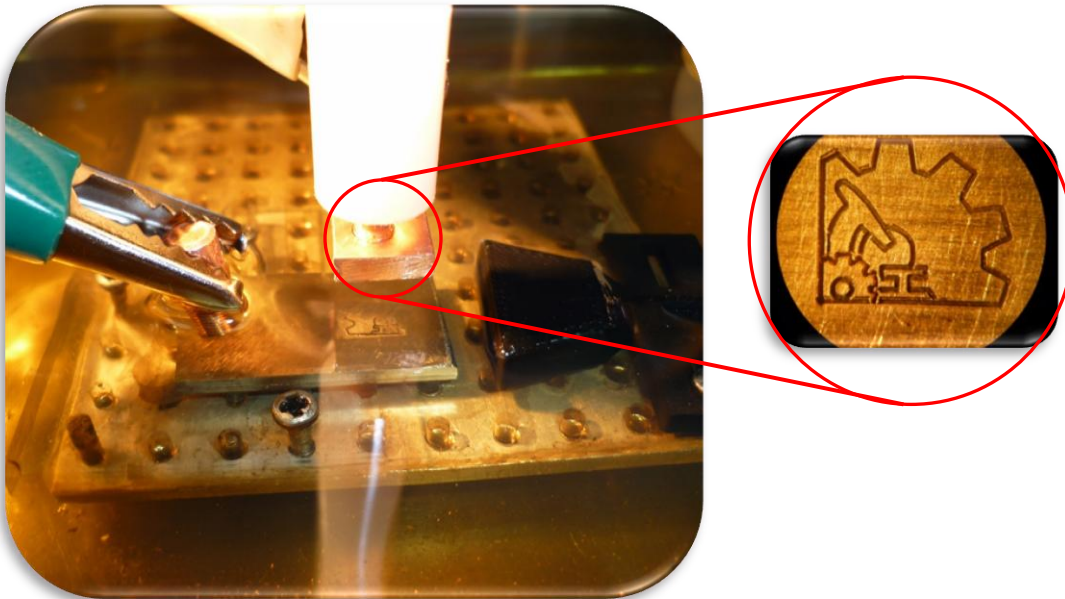


Figura 5.40. Detalle de nuevo electrodo con logotipo a maquinar y proceso de μ EDM con logotipo 3D después de 5hrs.

En la prueba final del electrodo con logotipo después de reunir 30 horas de maquinado se tuvieron los resultados mostrados en las figura 5.41-5.44.



Figura 5.41. Detalle de electrodo

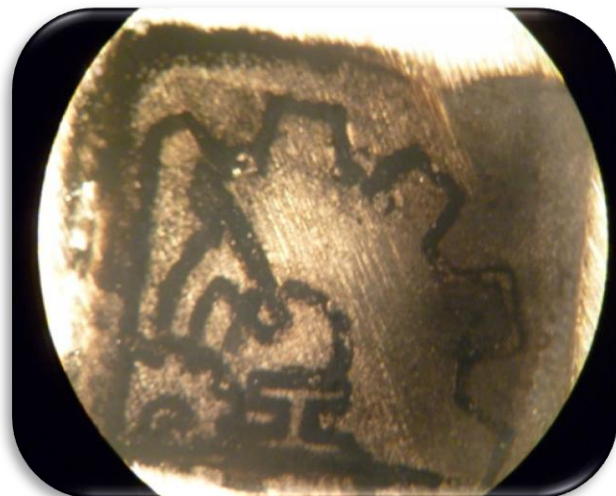


Figura 5.42. Detalle maquinado con impurezas

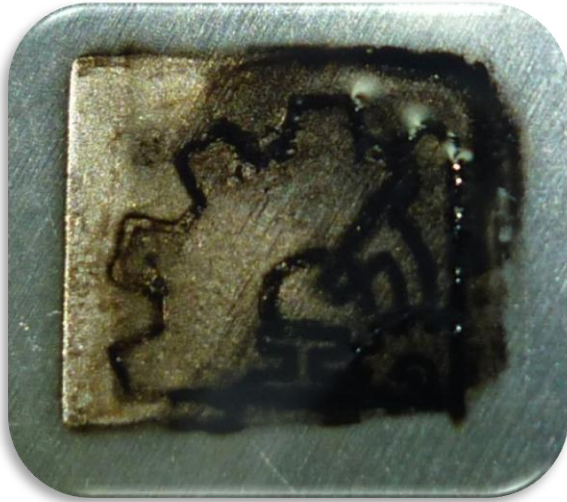


Figura 5.43. Detalle de maquinado en el microscopio

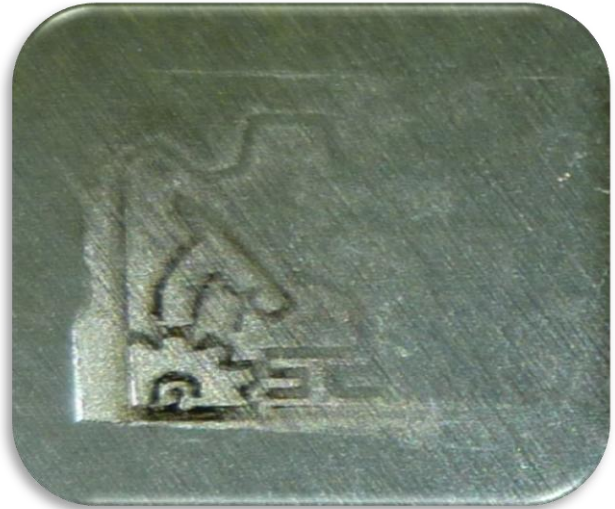


Figura 5.44. Detalle de maquinado limpio

5.4 Resultados obtenidos

Tomando como referencia pruebas de microEDM realizadas con diferentes tiempos de duración se observaron cuales fueron los parámetros más influyentes y cómo afectaron en el proceso de micromanufactura, es decir:

1. El voltaje de la fuente de V_{EDM} es propiamente el encargado de suministrar la energía entregada en cada descarga, así mismo debe ser capaz de superar la resistencia del medio dieléctrico propiciando el medio para su generación. Además dependiendo su valor nos permitirá establecer una tasa de remoción de material (un grado de rugosidad), independientemente del tiempo de maquinado (figura 5.45).

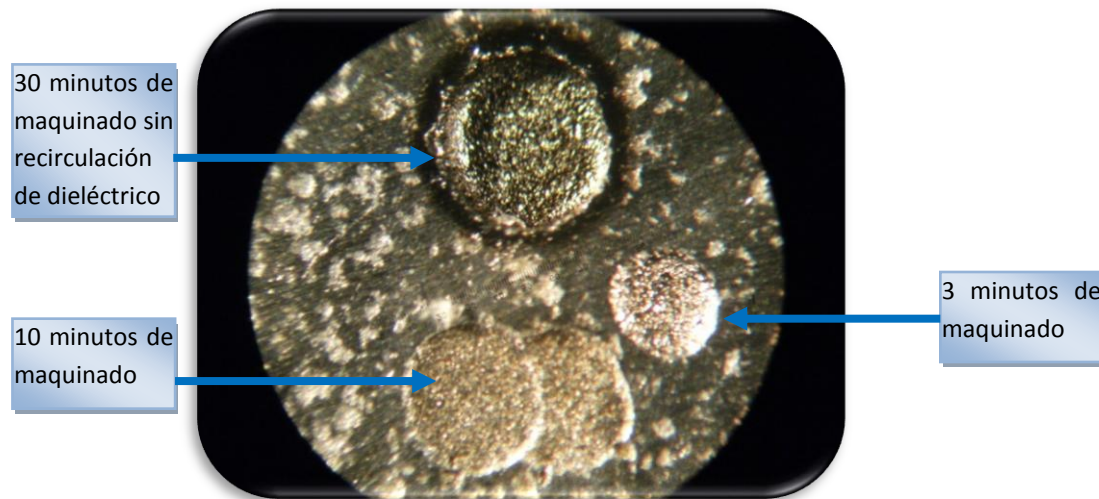


Figura 5.45. Maquinados con $V_{EDM}=100V$ con diferentes tiempos de operación

2. La frecuencia de trabajo proporcionada en este caso por el generador de funciones también define la velocidad de conmutación o cantidad de pulsos por segundo, es decir, la cantidad de energía que se permitirá entregar en cada descarga a través de los electrodos.
3. Con un $V_{EDM}=30V$ y un ciclo de trabajo 17.3%, sólo se produjeron arcos eléctricos, motivo por el cual se incrementó la diferencia de potencial en la fuente V_{EDM} , es decir, en comparativa con un prototipo que hace uso de un generador de relajación, aproximadamente a partir de los 30V y un ciclo de trabajo del 50% se observa un trabajo de remoción de material [13], con este nuevo prototipo la referencia cambió de $V_{EDM}=50V$ en adelante (esto se apreció al realizar pruebas de penetración desde 20V hasta los 100V). Como consecuencia la duración de los tiempos de maquinados se vio ampliada.

Existen otros factores que influyen en la calidad del maquinado como lo son el tipo de dieléctrico utilizado y si existe un sistema de recirculación del mismo, para nuestro caso se llevaron pruebas con un sólo tipo: “dieléctrico comercial” y en la mayoría de los casos se realizaron bajo la acción de un sistema de recirculación; exprofeso se realizaron otras sin esta acción (fig. 5.45) en donde al no haber un flujo que remueva la partículas carbonizadas resultado de las altas temperaturas producidas por las descargas en el aceite dieléctrico, estas tienden a acumularse en forma de residuos en la periferia de los orificios maquinados.

Resumiendo, de la gama posible de parámetros a seleccionar: una señal cuadrada TTL, con ciclo de trabajo al 17%, frecuencia de 1 MHz. y variando el voltaje V_{EDM} fue posible obtener una variedad de maquinados en la pieza de trabajo. Dos de estas muestras fueron llevadas para su observación en un microscopio electrónico y se midió su grado de rugosidad (fig. 5.46-5.47).

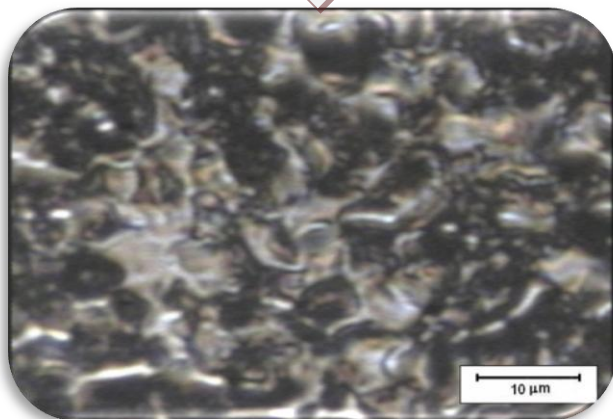
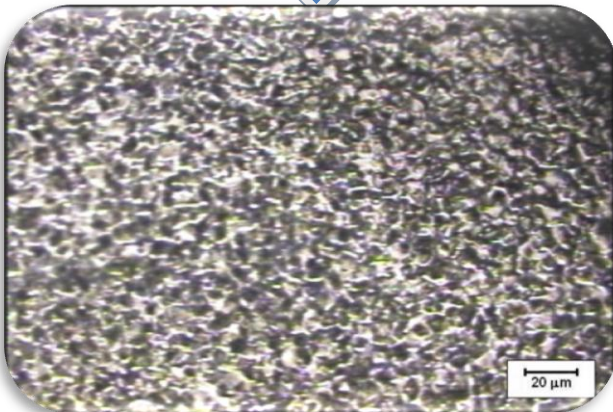
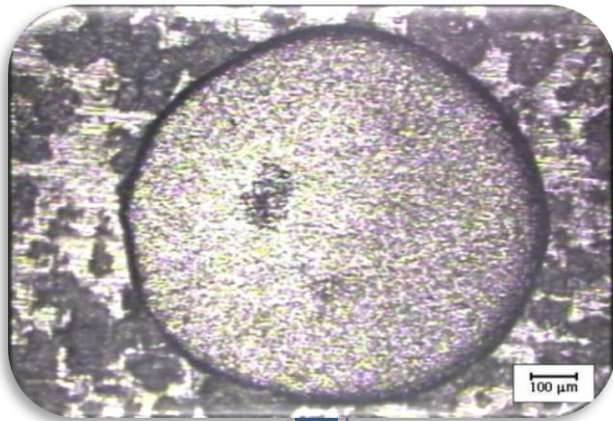


Figura 5.46. Detalle de maquinados con $V_{EDM} = 50V$

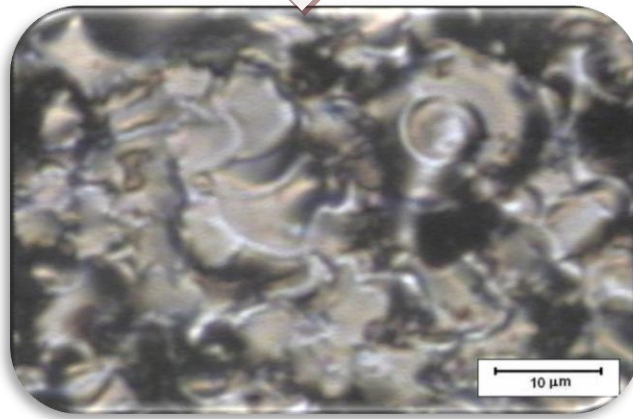
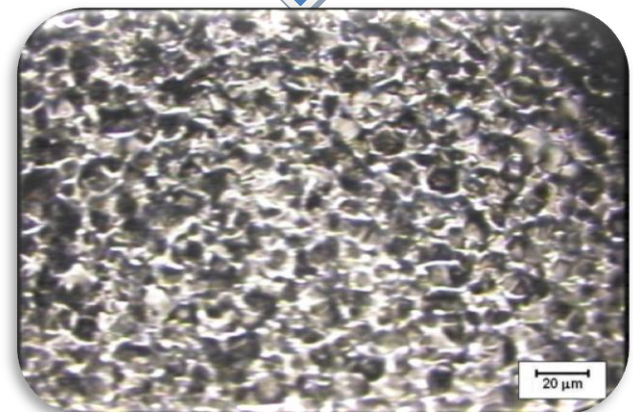
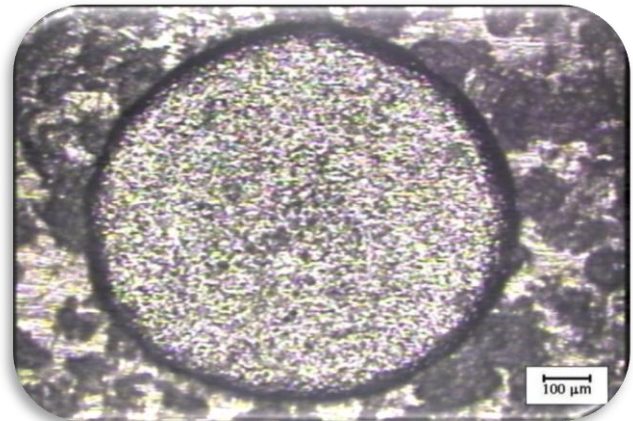


Figura 5.47. Detalle de maquinados con $V_{EDM} = 100V$

Además con una reconstrucción 3D por software se apreció el efecto de los cráteres superpuestos producidos por las descargas eléctricas. Para el caso de $V_{EDM} = 50V$ la rugosidad promedio es de $0.241\mu m$ (figura 5.48) y para el caso de $V_{EDM} = 100V$ es de $0.561\mu m$ (figura 5.49).

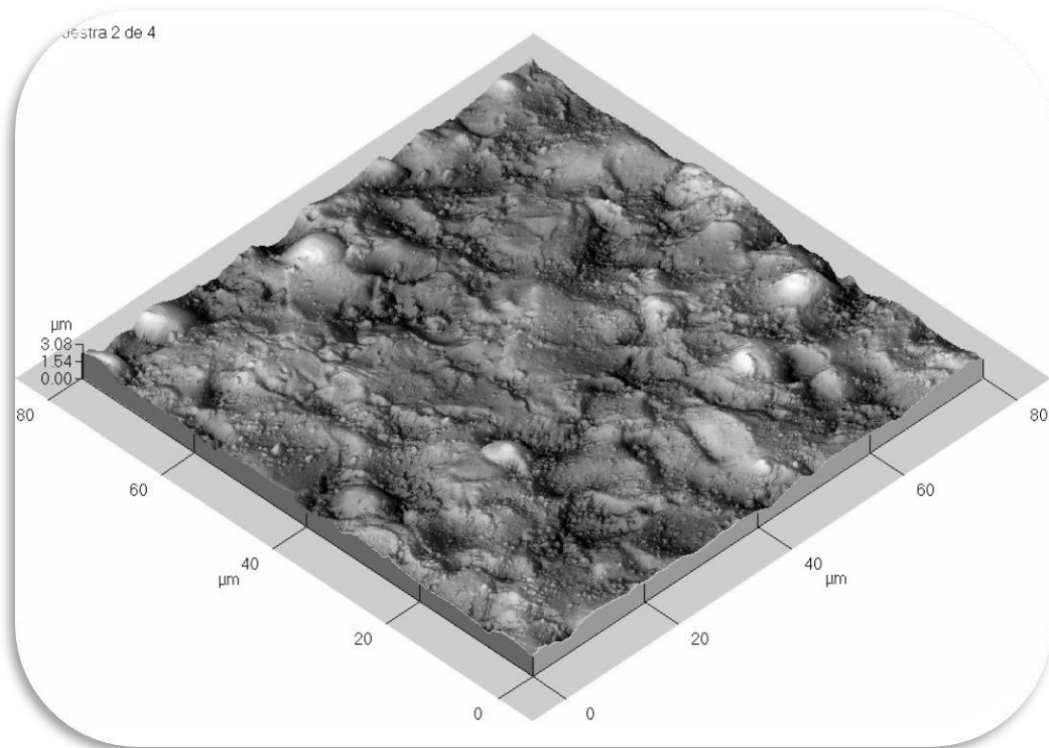


Figura 5.48. Rugosidad promedio de $0.241\mu m$ con $V_{EDM} = 50V$

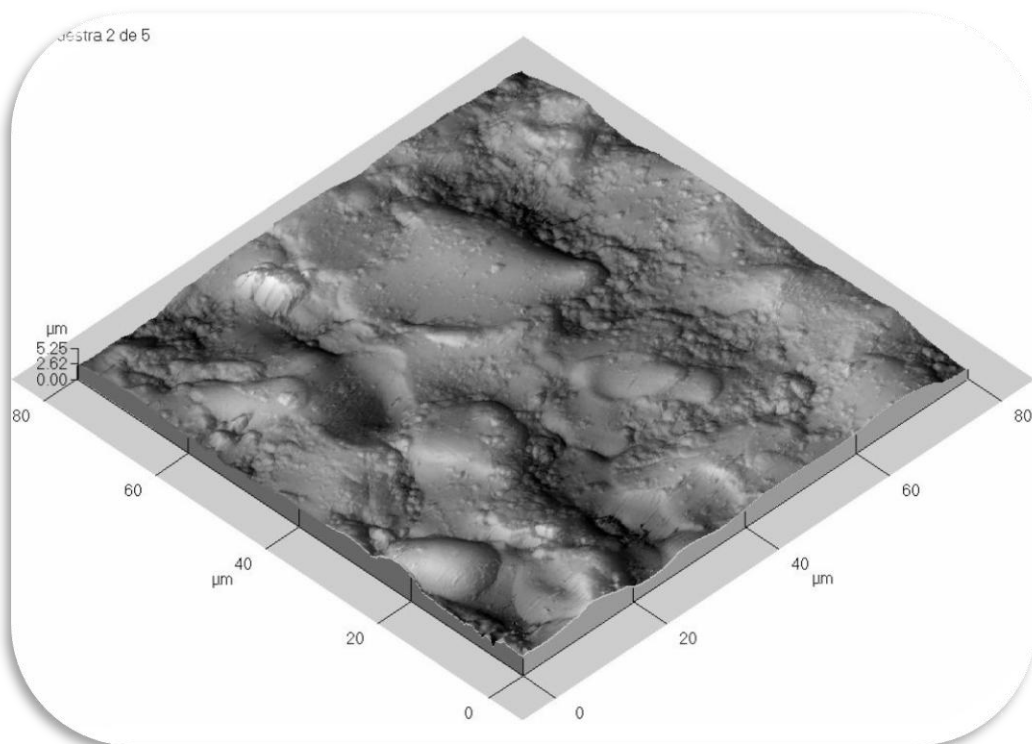


Figura 5.49. Rugosidad promedio de $0.561\mu m$ con $V_{EDM} = 100V$

A continuación (figura 5.50) en color verde se muestra la señal captada por la sonda de corriente en el osciloscopio la cual representa una sola descarga generada con un $V_{EDM}=100V$ y calculando el área bajo la curva con las formulas para potencia eléctrica se obtuvo el valor de energía ($76.5\mu J$) en dicha descarga.

$$p(t) = \frac{E(t)}{dt}, \quad dE(t)=p(t)*dt, \quad E = \int_b^a p(t)*dt$$

$$P = V_{EDM} * I, \quad E = V(\text{Area bajo la curva})$$

$$E = 100V \left(\frac{(4.5A)(100ns)}{2} + \frac{(4.5A)(240ns)}{2} \right) = 76.5\mu J$$

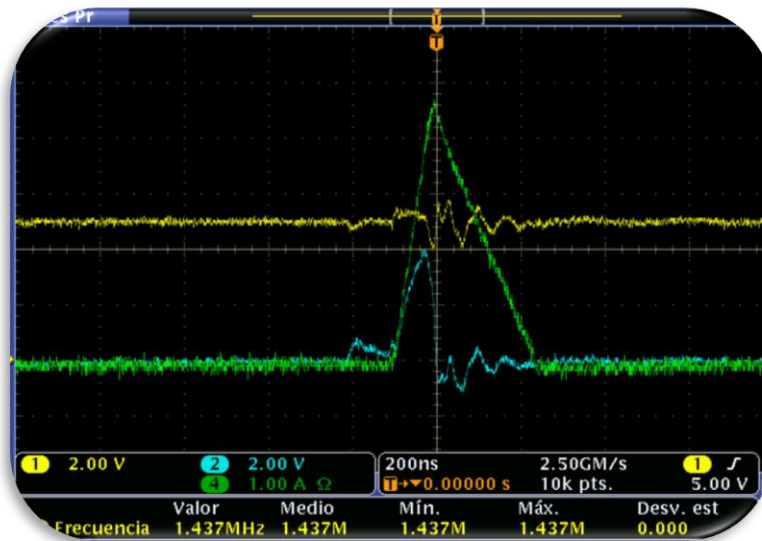


Figura 5.50. Descarga de energía de $76.5\mu J$ con $V_{EDM}=100V$

Así mismo se llegaron a detectar descargas máximas de $195\mu J$ (figura 5.51) y mínimas de $10.5\mu J$ (figura 5.52), las cuales definieron los límites de eficiencia que se pudieron lograr, producto de la combinación de los parámetros que intervinieron en el proceso de conmutación propuesto.

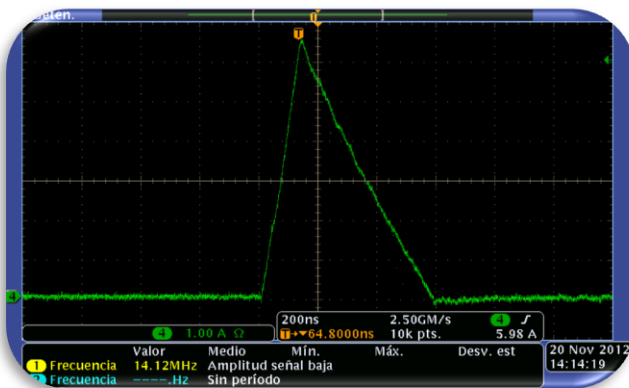


Figura 5.51. $195\mu J$ de energía máxima de descarga con $V_{EDM}=100V$

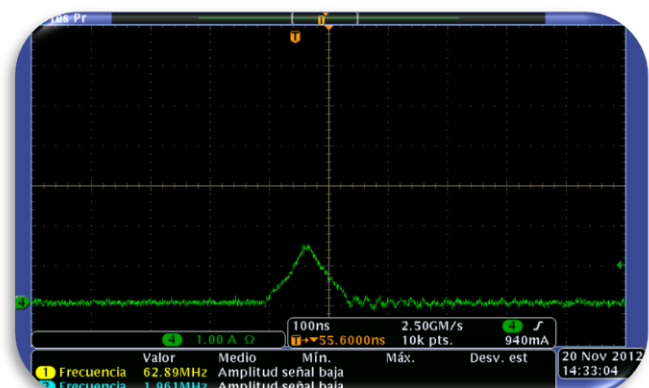


Figura 5.52. $10\mu J$ de energía mínima de descarga con $V_{EDM}=100V$

En la búsqueda de estos parámetros se identificaron gráficamente en el osciloscopio las formas de onda del proceso de μEDM : corto circuito (figura 5.52), descarga (figura 5.53) y arco (figura 5.54).

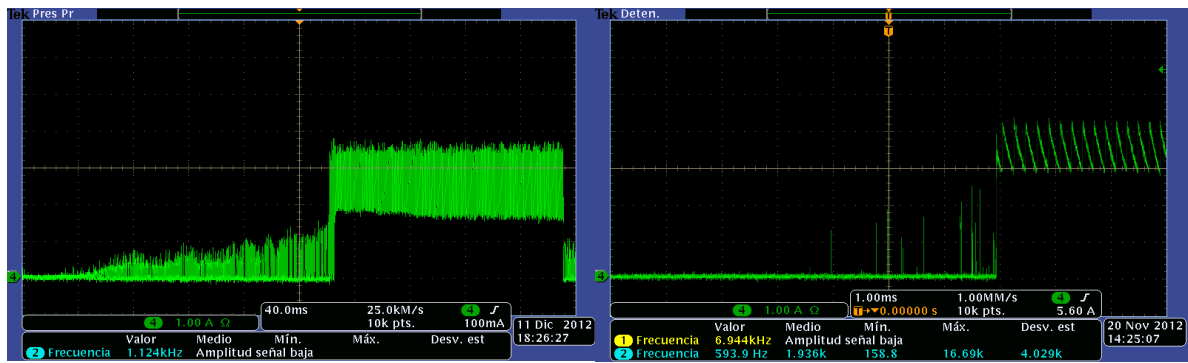


Figura 5.53. Detección de condición de corto circuito

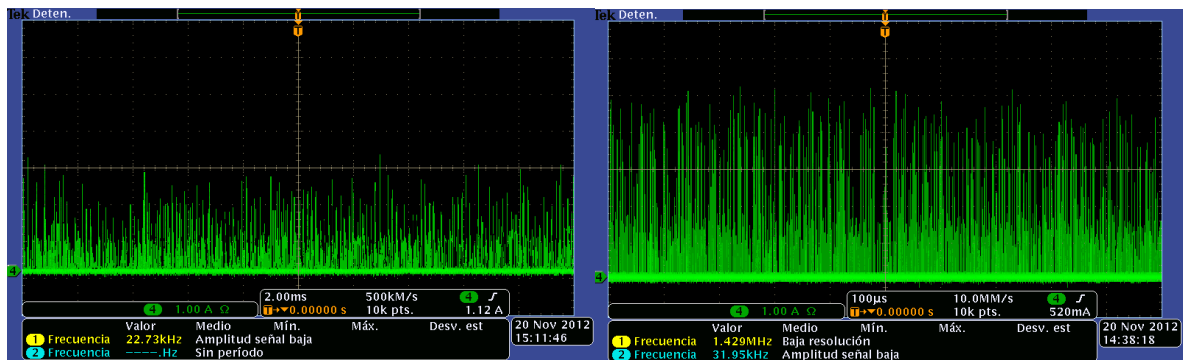


Figura 5.54. Detección de condición descargas

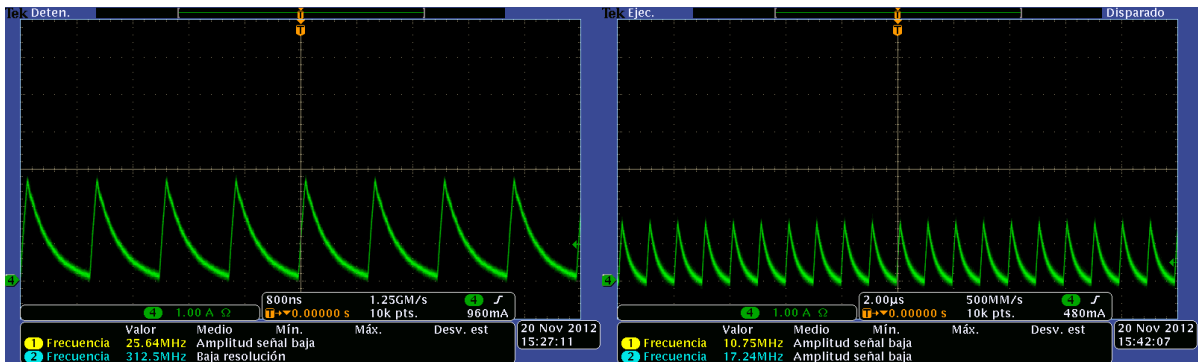


Figura 5.55. Detección de condición de arco

Por ultimo, en la lógica de control del motor se observó que con el Modo 1 sólo hubo un ligero aumento de partículas carbonizadas en la periferia del maquinado que en el Modo 2; además en ambos caso esta deposición sólo se presentó en la pieza de trabajo y no en el electrodo (figura 5.57), y su desgaste no fue perceptible bajo el microscopio de aumento. En la tabla 5.4 se enlistaron los parámetros de operación funcionales del prototipo.

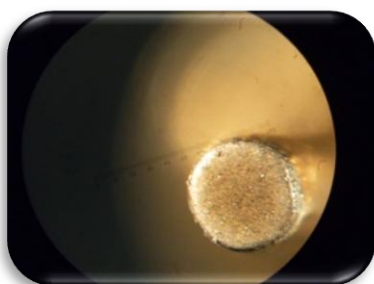


Figura 5.57. Detalle de electrodo (1mm Ø)

En resumen los parámetros de trabajo identificados son:	
a.	Tiempos de maquinado ininterrumpido de 14hrs. (sin efectos de sobrecalentamiento)
b.	Tiempo de maquinado en suma de 24hrs. (sin efectos de sobrecalentamiento)
c.	Frecuencia de trabajo de 1MHz, señal cuadrada TTL, ciclo de trabajo del 17%.
d.	Trabajo efectivo con niveles de V_{EDM} de 50V a 100V. (10.5 μ a a 195 μ)
e.	Penetraciones con electrodo circular con $\varnothing 1\text{mm}$ y logotipo de 7mm ² en acero inoxidable
f.	Regulación de niveles de rugosidad promedio de 0.241 μ m hasta 0.561 μ m.

Tabla 5.4. Parámetros funcionales de operación

Conclusiones

Se obtuvo un prototipo electrónico funcional capaz de realizar micromanufactura EDM por penetración el cual permite controlar la energía del proceso. Se identificaron sus parámetros de operación habilitándolo para operar durante tiempos prolongados de maquinado sin presentar síntomas de malfuncionamiento o sobrecalentamiento, con lo que se da cumplimiento cabal al objetivo del presente trabajo de tesis.

Una de las dos premisas de este trabajo fue que con menos energía se obtienen acabados superficiales “más finos”, esto es, con un nivel de rugosidad menor, esto se justificó mediante la definición de μ EDM (al regular la energía de las descargas con base a los niveles reportados). La otra en consecuencia fue considerar que al elevar la frecuencia de operación principal se propiciaría también esta regulación en las descargas.

Además este mismo dispositivo se diseñó y calibró para implementar a futuro un control más eficaz como el control difuso a través de una tarjeta de desarrollo ARDUINO.

Durante las pruebas virtuales del dispositivo se obtuvo originalmente una pobre calidad en las señales de control, esto se atribuyó a la inductancia generada por la resistencia de cerámica de potencia utilizada como carga; una de las propuestas para contrarrestar sus efectos era la incorporación de un Snubber o “amortiguador” en la etapa de conmutación, pero no se implementó debido a que esta carga sólo era temporal y su función era la de simular la carga real (electrodos sumergidos en dieléctrico modelados como un pequeño capacitor en paralelo con una resistencia) permitiendo probar y ajustar los parámetros de control del dispositivo, esto es, la carga real no es inductiva.

Una consideración notable es pensar que una reducción del ciclo de trabajo se puede visualizar como un aumento de la frecuencia de operación del MosFet, es decir, que el tiempo que permanece inactiva la señal se puede considerar que está compuesto por dos partes pasivas: una exactamente igual al tiempo que se encuentra activa la señal y la otra formada por el resto de la misma. En el dispositivo desarrollado, el tiempo activo de la señal fue de 173ns y el inactivo de 827ns (este último es equivalente a 173ns + 654ns), y recalculando la frecuencia de trabajo tomando tiempos de actividad e inactividad iguales (ciclo de trabajo al 50%) se obtuvo un valor de 2.89MHz, más un tiempo inactivo de 654ns. Consiguiendo con esta consideración triplicar prácticamente el límite de la frecuencia de trabajo (originalmente establecida en 1MHz), proveyendo así de una perspectiva más amplia del fenómeno de microEDM y mejorando los resultados encontrados.

En otros términos, la frecuencia de operación del MosFet no está determinada por ciclo de trabajo, al variarlo por definición la frecuencia de trabajo no cambia pero sí la energía (potencia por tiempo). Tomando en cuenta que los circuitos no atienden a definiciones sino a exigencias que en este caso son de conmutación, el MosFet tiene una frecuencia de conmutación máxima de 9.5MHz y un periodo de 105.26ns este último comprende un tiempo activo máximo de 52.6ns y por debajo de este valor teórico el dispositivo ya no puede operar. El prototipo diseñado se ajustó para trabajar con tiempo activo de 173ns por lo que se está trabajando la conmutación a una tercera parte de su capacidad. Además nótese que manteniendo un tiempo activo (≥ 52.6 ns) en el ciclo de trabajo, el aumento del tiempo inactivo solo reflejaría el valor de la frecuencia de trabajo, lo cual a primera vista impactaría en la velocidad con que se llevan a cabo las descargas y por ende los tiempos de maquinado.

Trabajo a Futuro

Desde un punto de vista general, nótese que se trabajó en el desarrollo de un prototipo en un área muy particular del sistema eléctrico del EDM. Además, se hizo uso de diferentes equipos de laboratorio que sustituyeron una función determinada del mismo facilitando así su implementación y calibración. La ventaja de este proceder es que se puede concentrar la atención en un área específica al relegar el diseño de otros sistemas. La desventaja son las limitantes propias de cada equipo, debidas a su construcción o acoplamiento, y en este caso se encontró que:

1. Las fuentes de voltaje empleadas producen un efecto resonante en su salida el cual solamente se amortiguó con la implementación de núcleos de ferrita; este efecto debe de considerarse ya que en algún momento se diseñarán fuentes propias para el dispositivo eliminando cableado y proveyéndolo de autonomía. Además en su construcción se recomienda incorporar un filtro de línea para aislar señales parásitas de origen.
2. Como se utilizó un generador de funciones para establecer la frecuencia de trabajo a 1 MHz y regular su ciclo de trabajo se debe considerar la incorporación de éste por medio de un circuito específico para brindar menos vulnerabilidad al ruido por acoplamientos externos; en este trabajo de tesis se trató de reducir estos efectos por medio de un cable blindado (de línea) con la mínima longitud posible y conectores BNC para circuito impreso.
3. La estructura sobre la cual descansa el actuador lineal con el electrodo y la base que soportan el tanque de trabajo y pieza de trabajo, tienen la ventaja que pertenecen a un centro de maquinado CNC (equipo calibrado) y la desventaja de ser voluminoso. Para la micromanufactura con electrodos de penetración no se representó inconveniente alguno, pero al trabajar con un electrodo de estampado se pudo observar que el electrodo es el último de una cadena de eslabones, dificultando así su ajuste con la pieza de trabajo. Lo anterior se tradujo en un incremento en el tiempo de manufactura y maquinados desalineados.
4. Los avances tecnológicos en componentes electrónicos permiten que se encuentren las mismas funciones en circuitos integrados con especificaciones de operación superiores, por lo que es particularmente ineludible la búsqueda de nuevas configuraciones y componentes.
5. Para la lógica de control del motor se propusieron dos modalidades, que al ponerlas en práctica no se apreció tener ventaja en una respecto de la otra pero es imperativo analizar sus desventajas. Es decir, suponiendo que para el modo1, por alguna circunstancia (descarga de muy corta duración, desajuste de parámetros o partículas conductoras en el dieléctrico, etc.) se generara un arco, el sistema no podrá diferenciarlo de una descarga, y por tanto la lógica programada no detendría el motor, manteniéndose la condición de arco hasta que se genere un corto circuito, un GAP muy grande, o la destrucción de la estructura a trabajar.
6. En esencia cada una de las “limitantes” intrínsecas a la implementación de equipos de laboratorio se convierte en un área de oportunidad para mejorar el prototipo de microEDM. Además se sugiere realizar las curvas de comportamiento para cada nivel de voltaje V_{EDM} , e identificar el comportamiento más estable del proceso en cada una, así mismo considerar la incorporación de un circuito Snubber (anuqué la carga no sea inductiva) o un conmutado suave que contribuyan a reducir las pérdidas por conmutación.

Referencias

- [1] M. A. Béjar, Procesos de Manufactura, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile.
- [2] Yi Qin, Micro-Manufacturing Engineering and Technology, 2010, Ed. Elsevier.
- [3] H.K. Tönshoff, I. Inasaki, Sensors in Manufacturing, 2001, Ed. Wiley-VCH Verlag GmbH.
- [4] MICRO-ELECTROEROSIÓN: Revisión General, Micro Manufacturing, M² Tekniker Research alliance.
- [5] Umesh Kumar Vishwakarma, “Modelling Of Micro Electro Discharge Machining In Aerospace Material”, National Institute of Technology, Rourkela (India), 2011.
- [6] Informe: Mapa de la Micro-tecnología en Asturias, Fundación Prodintec, Instituto de Desarrollo Económico del Principado de Asturias IDEPA, 2009, España.
- [7] Duncan A. Grant, John Gowar. Power MosFet’s Theory and applications, Ed. Wiley.
- [8] Rolf Wuthrich, “Micromachining using electrochemical discharge phenomenon: fundamentals and applications of spark assisted chemical engraving”, Ed. William Anderw, 2009.
- [9] Robert Salas, José Fernando Pérez, Jimer Ramírez, Técnicas de diseño, desarrollo y montaje de circuitos impresos, Universidad de los Andes Venezuela.
- [10] Ron Mancini, Op. Amp. For every one, Cap. 17, Circuit Board Layout Techniques, Texas Instruments, 2002.
- [11] Mark J. Jackson, “Microfabrication AND Nanomanufacturing” Ed. CRC, 2006.
- [12] Angélica Zamora Vázquez, TESIS: Diseño e implementación de una fuente de voltaje con aplicación a micromanufactura por Electroerosión, 2009, UNAM.
- [13] Línea de trabajo del GMM, “Investigación de parámetros de operación del proceso de micromanufactura por electrodescarga, 2011, CCADET, UNAM.
- [14] Joemar’s Machinery & Electric Industrial Co. Ltd., “AZ series Operation manual CE Ver 1.0”, Taiwan.
- [15] Sergio Franco, Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos, Mc Graw Hill.
- [16] Arthur B. Williams, Amplificadores operacionales, Teoría y sus aplicaciones, Mc Graw Hill.
- [17] Ben Fleming, The EDM How to Book, Flemming Publications.
- [18] H.K. Tönshoff, I. Inasaki, Sensors in Manufacturing, Wiley, 2001.
- [19] J.B. Giraudi, C. Altini, Universidad de Buenos Aires. Facultad Ingeniería. “Apuntes de clase: electroerosión”.
- [20] Centro Integrado Politécnico ETI, “Introducción a la Electroerosión”, Tudela España.
- [21] I. Puertas Arbizu y C. J. Luis Pérez. UPNA. “El menos convencional de los mecanizados”. IT - Universidad Pública de Navarra.
- [22] Kharagpur, “Module 9 Non conventional Machining - Lesson 39- Electro Discharge Machining”
- [23] Katz Z., Tibbles C.J. “Analysis of Micro-scale EDM process”, International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, 25 (2005).
- [24] Masuzawa T., “Micro EDM”. Proceedings of the ISEM XIII (2001). 3-19. Fundación Tekniker.
- [25] Masuzawa T., “State of the Art Micromachining”. Anals of CIRP, Vol. 49/02/2000, 473-488.
- [26] Mecanizado por electroerosión de acero para herramientas, UDDEHOLM.
- [27] Sangkyun Kang, Sang-Joon J. Lee, Fritz B. Prinz “El tamaño es importante: pros y contras de la Miniaturización”, 2001.
- [28] Suman Chakraborty, “Mechanics_Over_Micro_and_Nano_Scales”, Ed. Springer, 2011.
- [29] Matthias Worgull, “Hot Embossing – Theory and Technology of Microreplication”, Ed. William Anderw, 2009.
- [30] Ningyuan Wang, “Investigation for Improvement and Application of MEMS-Based Micro-Electro-Discharge Machining (M³EDM)” University of British Columbia, 2011.
- [31] V.C. Venkatesh /Sudin Izman, “Precision Engineering”, Mc. Graw Hill, 2007.