



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA
FUENTE DE VOLTAJE CON
APLICACIÓN A MICROMANUFACTURA POR
ELECTROEROSIÓN**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

MECÁNICA - MECATRÓNICA

P R E S E N T A:

ING. ANGÉLICA ZAMORA VÁZQUEZ

TUTORES:

DR. ALBERTO CABALLERO RUIZ
M.I. JOSÉ CASTILLO HERNÁNDEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA NOVIEMBRE, 2009.

JURADO ASIGNADO:

Presidente : Dr. Leopoldo González González

Secretario : Dr. Leopoldo Ruiz Huerta

Vocal : Dr. Alberto Caballero Ruiz

1^{er}. Suplente: M. I. Miguel Ángel Bañuelos Sucedo

2^{do}. Suplente: M. I. Eduardo Garduño

Lugar donde se realizó la tesis:

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, CCADET.
Grupo de Micromecánica y Mecatrónica, GMM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Alberto Caballero Ruiz.

FIRMA

Este trabajo fue realizado en el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica dentro del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico en la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo la tutoría del Dr. Alberto Caballero Ruiz y del M.I. José Castillo Hernández. Con las aportaciones del Dr. Leopoldo Ruiz Huerta, y el apoyo del M.I. Eduardo Garduño y el M.C. José G. Bañuelos Muñetón. Apoyado por CONACYT a través del proyecto 60895, y PAPIME-PE105909.

Agradecimientos

A mi Mamá y a mi Papá, Angélica y Carlos, cuyo apoyo incondicional representan las alas que me han permitido llegar cada día más lejos. Es gracias a ustedes que yo puedo realizar mis metas y objetivos. Ustedes son mi gran ejemplo e inspiración para que todos los días yo de un paso más adelante. Nunca podré terminar de agradecerles por la educación con la que me han formado. Los amo y les dedico este trabajo ya que esta realización en mi Vida es producto de la gran Fé y Amor que han depositado en mí.

A mis hermanitos, Carlos y Oscar, quienes siempre me han demostrado su cariño, amor y aprecio con apoyo y comprensión. Son ustedes quienes complementan mi Hogar, mi lugar de Paz para un mundo lleno de realidad. Gracias por las agradables experiencias que vivimos juntos, por escucharme y compartir cada vez que la Vida tenía una lección difícil que enseñarme, por darme el ejemplo de que ser “la mayor” no tiene nada que ver con ser el más sabio.

A mi familia, a mi abuelita Marcela, por siempre estás al pendiente de qué ruta lleva mi camino. A mis tías Sara, Bety y Paulina con quienes siempre es muy grato compartir una taza de café y platicar hasta la madrugada. A todas mis tías, tíos, primas y primos con quienes las reuniones familiares son de dolores de panza por risa y, con todo el gusto, maratónicas! Son todos ustedes por lo que uno agradece a Dios conocer tan vívidamente el concepto de la palabra “Familia”.

A Héctor, mi complemento. Por todo el apoyo, orientación, paciencia y cariño que has tenido conmigo todos estos años que hemos disfrutado y aprendido juntos. Eres mi ejemplo y guía. Gracias por impulsarme a ser mejor como persona y profesionista, por ser mi refugio, por conocerme a tal grado que las palabras pierden sentido. Agradezco por la familia de la que me has dejado formar parte: Gustavo, Irene, tus papás, tus hermanos y todos con quienes me siento en mi propia casa al brindarme su apoyo y amistad.

A mi tutor y amigo Alberto Caballero, principal impulsor de mi proyecto profesional. Te agradezco infinitamente por el apoyo y las incontables enseñanzas que me diste, por ser el principal responsable de mi formación como profesionista durante todos estos años junto con la paciencia y buena voluntad que ello requirió, por ser sincero y abierto a la comunicación. Gracias por los retos, por hacerme saber de mis capacidades.

A mi amigo y tutor José Castillo, a quien debo mucho del conocimiento “fino” de cómo hacer que un circuito funcione adecuadamente, de cómo alambrear, de cómo realizar un impreso, pero sobretodo, de cómo responder humildemente y con sabiduría ante las preguntas de todos aquellos que acudan a uno con preguntas. Sin duda recibir tu apoyo y aportaciones fue determinante en este proyecto. Muchas gracias!

A Leopoldo Ruiz, jefe del laboratorio. Gracias por permitirme tener las herramientas necesarias para la realización de este proyecto. Por ser parte de mi formación como profesionista, por compartir de manera agradable estos años de constante crecimiento personal y profesional.

A mis amigos de laboratorio, Ricardo, Ángel, Germán, Ares, Rafael, Juan Jesús, y todos sin quienes mi estancia no hubiera sido la misma. Les agradezco mucho por el apoyo, por los cuestionamientos, por la amistad y por los muy gratos momentos que pasamos todos juntos.

A mis sinodales M.I. Miguel Ángel Bañuelos, M.I. Eduardo Garduño y Dr. Leopoldo González por las aportaciones valiosas hechas al presente trabaj

Índice

	Página
Introducción.....	1
CAPÍTULO 1	
Antecedentes.....	3
1.1. Métodos de Manufactura Convencionales.....	3
1.2. Antecedentes de la Electroerosión.....	4
1.3. Fenómeno de la Electroerosión.....	6
1.4. Principales Componentes de un Sistema de Maquinado por Electroerosión por Penetración.....	7
1.5. Tipos de Configuración de Máquinas EDM.....	8
1.6. Fuentes Eléctricas para EDM en el Mundo.....	10
1.6.1. Primeras Propuestas y sus Progresos.....	10
1.6.2. Fuente de relajación RC.....	11
1.6.3. Fuente con interrupción de corriente.....	11
1.6.4. Fuente EDM con semiconductores y elementos eléctricos pasivos.....	12
1.6.5. Fuente con interrupción vía transistor.....	12
1.6.6. Fuente de alta eficiencia.....	13
1.7. Pulsos Isofrecuenciales y Pulsos Isoenergéticos.....	14
1.8. Tasa de Remoción de Material.....	16
1.9. Clases de Descargas Eléctricas.....	16
1.10. Micromanufactura por Electroerosión.....	17
1.11. Cantidad de energía en el proceso de manufactura por EDM.....	18
1.12. Configuraciones de Micromáquinas para Electroerosión.....	20
1.13. Sistemas de Micromanufactura por Electroerosión Actualmente Disponibles en el Mercado.....	20
1.14. Aplicaciones del μ EDM.....	21
CAPÍTULO 2	
Planteamiento del Problema.....	24
2.1. Concepto de Micromanufactura.....	24
2.2. Micromanufactura en el Mundo.....	25
2.3. Investigación y Desarrollo de Métodos No Convencionales de Manufactura en el GMM.....	27
2.4. Objetivo.....	29
2.5. Alcances.....	29
CAPÍTULO 3	
Marco Teórico.....	30
3.1. Centro de μ EDM Implementado en el GMM.....	30
3.1.1. Adaptación de un sistema de de maquinado vertical CNC.....	30
3.2. Parámetros Determinantes para el Maquinado por Electroerosión.....	33
3.2.1. Tiempo de encendido de la fuente de energía.....	33
3.2.2. Tiempo de apagado de la fuente de energía.....	33
3.2.3. Frecuencia de maquinado.....	34
3.2.4. Material del electrodo o herramienta de trabajo.....	34
3.2.5. Medio dieléctrico.....	35
3.3. Procedimiento Experimental.....	35
3.4. Arreglo de Sistema EDM con Circuito de Relajación RC.....	36
3.5. Posicionamiento de la Herramienta.....	38

3.6. Resultados de la serie de experimentos.....	39
3.7. Análisis y Conclusión sobre los Resultados.....	40
3.8. Investigación de Fuentes Eléctricas para Aplicaciones a EDM.....	42
3.8.1. Inversor Resonante con Red LCC (Año: 2001).....	43
3.8.2. Generador de isopulsos con transistores (Año: 2003).....	44
3.8.3. Fuente de alta eficiencia para EDM (Año: 2005).....	45
3.8.4. <i>Chopper</i> de superposición cíclica para EDM (Año: 2006).....	46
3.8.5. Fuente para μ WEDM (Microwire EDM, Año: 2007).....	47
3.9. Resumen de las Característica de las Fuentes Analizadas.....	48
CAPÍTULO 4	
Desarrollo de Sistema Propuesto.....	50
4.1. Requerimientos del sistema.....	50
4.2. Uso de transistores para el control de corriente en el GAP.....	50
4.3. Sistema de Generación de Pulsos para μ EDM Propuesto.....	52
4.3.1. Controlador del MOSFET.....	53
4.3.2. Detector de corto circuito y detector de chispa/arco.....	54
4.3.3. Control de posición de la herramienta.....	58
4.3.4. Acoplamiento de señales.....	60
4.3.5. Flujo del medio dieléctrico.....	62
4.4. Implementación de un elemento amortiguador que disipe energía extra almacenada en el GAP.....	63
CAPÍTULO 5	
Pruebas y Resultados.....	65
5.1. Sistema Implementado en Tarjeta de Prototipos.....	65
5.2. Experimentos con una fuente de pulsos isofrecuenciales.....	65
5.3. Sistema Implementado en Tarjeta de Circuito Impreso.....	71
5.4. Pruebas del Sistema Implementado.....	71
5.6. Aplicaciones para Maquinado de Silicio.....	77
CAPÍTULO 6	
Conclusiones y Trabajo a Futuro.....	79
6.1. Conclusiones.....	79
6.2. Trabajo a Futuro.....	81
Referencias.....	83
Anexo I.....	85
Anexo II.....	86
Glosario.....	89

Índice de Figuras y Tablas

Figura / Tabla	Página
Figura 1.1. Manufactura de acero por medio de método de arranque de viruta en torno.	4
Figura 1.2. Diferencia de los grados de libertad necesarios entre maquinado por arranque de viruta y EDM.	5
Figura 1.3. Fenómeno de la electroerosión.	6
Figura 1.4. Componentes básicos de un sistema de electroerosión por penetración.	7
Figura 1.5. EDM por penetración. Ejemplo de una herramienta cuyo espejo se ha maquinado.	8
Figura 1.6. Fresa EDM. (a) Esquema funcional. (b) Fotografía del proceso andando.	8
Figura 1.7. Esmeril EDM.	9
Figura 1.8. Máquina WEDM. (a) Esquema funcional. (b) Fotografía del proceso andando.	9
Figura 1.9. Panorama general del avance tecnológico de fuentes eléctricas para EDM.	10
Figura 1.10. Circuito básico de relajación.	11
Figura 1.11. Fuente EDM con interrupción de corriente eléctrica mediante un tubo tríodo.	12
Figura 1.12. Fuente EDM con semiconductores y elementos eléctricos pasivos.	12
Figura 1.13. Fuente EDM con transistor como interruptor.	13
Figura 1.14. Fuente EDM de alta eficiencia.	13
Figura 1.15. Pulsos de corriente de modo isofrecuencial. Figura obtenida por medio de un osciloscopio.	14
Figura 1.16. Pulsos de corriente de modo isoenergético. Figura obtenida de osciloscopio.	15
Figura 1.17. Formas de onda correspondientes a fuentes de pulsos de tipo isofrecuencial (izquierda) e isoenergética (derecha).	17
Figura 1.18. Microcráteres hechos con una fuente RC a $2\mu\text{m}$ de GAP.	19
Figura 1.19. Modelos estadísticos. (a) Gráfica de 3 coordenadas independientes mostrando la correlación entre energía descargada por chispa, volumen de la cavidad obtenida y distancia de GAP. (b) Histograma de la desviación estándar del diámetro y volumen de los cráteres generados en diversas muestras generadas a diferentes niveles de energía específica cada una.	19
Figura 1.20. Diferentes técnicas de μEDM .	20
 Tabla 2.1. Sistemas de μEDM comercialmente disponibles.	21
Figura 1.21. Nuevos sistemas de micromanufactura por electroerosión disponibles en el mercado.	21
 Tabla 1.2. Aplicaciones del μEDM .	22,23
Figura 2.1. Concepto de las μMH por generaciones.	26
Figura 2.2. Desarrollo de la micromecánica por el GMM. Los bloques de colores son áreas desarrolladas o en proceso, mientras que los bloques grises son áreas de oportunidad para el grupo.	28

Figura / Tabla	Página
Figura 3.1. Centro de maquinado vertical Boxford 190VC donde se monta el centro de μ EDM.	30
Figura 3.2. Sujeción de la herramienta a la flecha del servomotor y conexión con el circuito eléctrico por medio del tornillo prisionero.	31
Figura 3.3. Sistema de sujeción para el centro de maquinado por μ EDM desarrollado en el GMM. (a)Vista explosiva. (b)Vista superior. (c)Fotografía del sistema de fijación de piezas de trabajo propuesto.	32
🔗Tabla 3.1. Descripción del sistema de sujeción de la pieza de trabajo en el centro de μ EDM desarrollado en el GMM.	32
🔗Tabla 3.2. Factores de control y sus niveles para el experimento.	36
🔗Tabla 3.3. Combinación de parámetros. Combinación de los diferentes factores de control y sus respectivos niveles.	36
Figura 3.4. Arreglo del sistema de μ EDM con circuito de relajación RC.	37
🔗Tabla 3.4. Acciones de control de la posición de la herramienta.	38
Figura 3.5. Señales del sistema de control de posición.	38
Figura 3.6. Circuito monitor del estado del GAP.	39
Figura 3.7. Aproximación para medir el volumen desplazado por los maquinados de cada experimento. P: Profundidad de corte.	39
🔗Tabla 3.5. Resultado de los experimentos. Orden de descendente en cuanto a tasa de remoción de material de la pieza de trabajo.	40
Figura 3.8. Señales de voltaje (con referencia en) y corriente (con referencia en) obtenidas del maquinado del experimento No. 6.	41
Figura 3.9. Gráfica de voltaje en el capacitor, voltaje visto por el GAP.	42
Figura 3.10. Fuente resonante LCC. (a) Esquema del circuito eléctrico. (b) Pulsos EDM obtenidos experimentalmente.	43
Figura 3.11. Fotografías comparativas de los cortes obtenidos con otros sistemas de corte y el sistema propuesto por R. Casanueva.	44
Figura 3.12. Generador de isopulsos con transistores TBJ y FET.	45
Figura 3.13. Fuente de alta eficiencia para EDM. (a) Diagrama a bloques de la fuente. (b) Señales de onda generadas en el GAP.	46
Figura 3.14. Fuente de superposición cíclica de señales de corriente. (a) Diagrama a bloques de la fuente. (b) Señales de control y de corriente de salida del sistema.	46
Figura 3.15. Fuente de μ WEDM. (a) Diagrama eléctrico. (b) Señales en el GAP.	47
Figura 3.16. Maquinados por μ WEDM. Microdientes y microrendijas maquinados con alambre de cobre de (a,c) $\varnothing 70\mu\text{m}$ y (b,d) $\varnothing 50\mu\text{m}$	48
🔗Tabla 3.5. Características de fuentes recientes 2001 a 2007.	49
Figura 4.1. Diagrama conceptual de los transistores BJT y FET.	51
🔗Tabla 4.1. Indicación de las flechas y bloques según su color.	52
Figura 4.2. Diagrama a bloques del sistema de μ EDM propuesto.	52
Figura 4.3. Tiempos de respuesta y propagación del circuito MC34151 controlador de MOSFET propuesto.	53
Figura 4.4. Acoplamiento de CD/CD. (a) Diagrama esquemático. (b) Niveles de voltaje resultantes.	54
Figura 4.5. Formas de onda de voltaje y corriente en el GAP. (a)Dada una condición de chispa. (b)Dada una condición de cortocircuito.	55

Figura / Tabla	Página
Figura 4.6. Diagrama esquemático de la implementación de los comparadores de voltaje que detectan (1) Chispa/arco (2) Corto circuito en el GAP.	56
Figura 4.7. Circuito multivibrador monoestable 74LS123.	57
Figura 4.8. Pulso del circuito multivibrador monoestable dado el flanco de bajada del comparador al ocurrir chispa.	57
Figura 4.9. Respuesta de los comparadores de voltaje NE529 y los multivibradores monoestables 74LS123 dada una condición de chispa/arco y corto circuito en el GAP.	58
↻ Tabla 4.2. Acciones a tomar sobre la herramienta dada la condición del voltaje de GAP.	59
Figura 4.10. Diagrama esquemático de la implementación del circuito TL494.	59
Figura 4.11. Circuito de control de posición de la herramienta.	60
Figura 4.12. Interacción de señales lógicas que dictan al controlador del MOSFET.	60
Figura 4.13. Desacoplamiento de la señal del generador de funciones.	61
Figura 4.14. Comportamiento ideal de la fuente propuesta.	62
↻ Tabla 4.3. Tiempo de respuesta del conjunto de circuitos encargados de apagar la fuente de corriente una vez que se detecta chispa.	62
Figura 4.15. Hélice inmersa en el medio dieléctrico para proveer flujo constante.	63
Figura 4.16. Elementos propuestos para drenar la energía después de anulado al canal de plasma.	64
Figura 5.1. Primera versión del sistema para μ EDM propuesto por el GMM.	65
Figura 5.2. Sistema propuesto sin retroalimentación. Configuración de pulsos isofrecuenciales.	66
Figura 5.3. Espigas mínimas y máximas de corriente obtenidas por diferentes tiempos de encendido del MOSFET. $V_{Lógico}$ son los pulsos lógicos de control que entran al controlador del MOSFET.	67
↻ Tabla 5.1. Cálculos de energía de maquinado obtenidos a partir de diferentes tiempos de encendido del MOSFET.	68
Figura 5.4. Gráfica de ΔE contra el tiempo de encendido del MOSFET (TON). Inestabilidad del sistema a mayor tiempo de encendido.	69
↻ Tabla 5.2. Rugosidades obtenidas en cada experimento	69
Figura 5.5. Maquinado de cráteres por μ EDM con diferentes tiempos de encendido del MOSFET.	70
Figura 5.6. Inestabilidad del sistema. Chispas que se generan fuera del pulso del control del MOSFET.	70
Figura 5.7. Sistema para μ EDM propuesto por el GMM.	71
Figura 5.8. Señales de entrada y salida del controlador del MOSFET.	72
Figura 5.9. Señales experimentales del detector de chispa.	72
Figura 5.10. Tiempo de retraso entre el inicio del paso de energía por el GAP en forma de chispa y la respuesta del circuito detector de chispa propuesto.	73
Figura 5.11. Señal de corriente acotada dada.	73

Figura / Tabla	Página
↗ Tabla 5.3. Parámetros operacionales para el maquinado de la figura 7.10.	74
Figura 5.12. Pulsos experimentales de tipo isoenergético obtenidos por el sistema propuesto.	74
Figura 5.13. Señales detectadas por chispa fuera de la señal de encendido del MOSFET.	75
Figura 5.14. Comportamiento inestable del sistema propuesto.	76
Figura 5.15. Formas de onda presentadas en el maquinado, unas acotadas otras sin control.	76
Figura 5.16. Maquinados obtenidos con el sistema propuesto implementado en PCB.	77
Figura 5.17. Mediciones por microscopía por fuerza atómica.	77
Figura 5.18. Maquinado en una oblea de silicio.	78

Introducción

En años recientes, las máquinas herramienta han presentado una evolución tecnológica enfocada a la reducción de su volumen, su consumo energético e incremento en precisión, aunado a una tendencia hacia el desarrollo de máquinas herramienta acordes al tamaño de piezas que se desean manufacturar. Este tipo de máquinas están enfocadas al desarrollo de piezas pequeñas de precisión con geometrías tridimensionales complejas en materiales variados. A dichas máquinas se les ha denominado micromáquinas herramienta (μ MH). La propuesta de μ MH basadas en arranque de material brinda un atractivo campo de aplicación, sobretudo por la gran cantidad de materiales que pueden ser manufacturados. Sin embargo, cuando se trata de manufacturar materiales de alta dureza, la fabricación de herramientas resulta un aspecto complicado y costoso. Existen otras alternativas para manufacturar materiales muy duros como: manufactura por láser, chorro de agua, ataque electroquímico y maquinado por electroerosión. A estos métodos de manufactura se les conoce como energéticos [2], sin contacto o no convencionales. Los métodos de manufactura tienen una característica importante: Las herramientas de trabajo no necesitan ser, a diferencia del método de arranque de viruta, más duras que la misma pieza de trabajo a maquinar. Hoy en día ello hace que este tipo de maquinado no convencional facilite, e incluso, sea indispensable para realizar ciertas tareas.

El Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM, desde su creación, ha realizado aportaciones importantes al campo de desarrollo de la micromecánica. Como parte de la investigación en el campo de la micromanufactura, el GMM ha tomado como una de sus diversas líneas de investigación el desarrollo de μ MH basadas en métodos energéticos con el fin de explorar su amplio campo de conocimiento, así como las ventajas que aporta su uso. El presente trabajo de tesis tiene el honor de presentar la incursión en la investigación y desarrollo de un sistema de generación de chispa con aplicaciones a la micromanufactura por electroerosión (μ EDM). Este trabajo se desarrolla en seis capítulos. En el primero de éstos se presenta la problemática que resuelve el método de manufactura por electroerosión y sus características. Así mismo, se explica cómo es la naturaleza de la generación de chispas en el seno de un medio dieléctrico. Se exponen también las configuraciones más típicas a las que han evolucionado las máquinas que funcionan bajo este principio de funcionamiento. Todo este preámbulo da paso

al planteamiento de las características de la micromanufactura por electroerosión y algunas de sus aplicaciones.

En el Capítulo 2, se presenta un panorama general de la micromanufactura; sus alcances, algunas de las necesidades que cubre, los trabajos y propuestas destacados en el mundo y, cómo el GMM ha incursionado en este campo; para entonces plantear las necesidades de incursionar en el estudio y desarrollo de sistemas que se basen en la aplicación de métodos energéticos. En este apartado se plantea el objetivo y los alcances de este trabajo de tesis.

En el Capítulo 3 se plantea el marco teórico de este trabajo de tesis. Se presenta cómo se implementó un sistema de μ EDM en las instalaciones del GMM, y el desarrollo de algunas herramientas que dicha tarea implicó. Se expone también una serie de experimentos realizados con una fuente de relajación RC, con la que se probó la influencia que tienen algunos parámetros determinantes en el EDM. Así mismo, con base en el análisis de los resultados obtenidos, se concluye sobre el propio comportamiento del circuito implementado.

En este mismo capítulo se hace un resumen de un conjunto de artículos recientes relacionados con sistemas de generación de chispa para EDM, con base a la información obtenida de estas fuentes bibliográficas, se cimentó el diseño de la propuesta de esta tesis. Al final del capítulo, se expone una tabla con los datos más relevantes de cada propuesta analizada.

En el Capítulo 4, llamado “Desarrollo del Sistema Propuesto” se plantean los requerimientos y especificaciones del sistema propuesto; acordes a lo estudiado en la literatura y a la experiencia obtenida en la práctica. En este capítulo se expone un diagrama a bloques del sistema propuesto completo y, para su explicación, se hace una división por subsistemas para detallar cada uno de ellos en una secuencia que pueda ser comprendida en conjunto.

En el Capítulo 5 se exponen las pruebas y resultados obtenidos por el sistema propuesto. Algunas de las mediciones obtenidas mediante *AFM* resultaron alentadoras debido a que se alcanzaron rugosidades de maquinado de hasta 0.275 [μ m] Ra. Un logro competitivo.

Por último, en el Capítulo 6, se tendrán las conclusiones, así como el trabajo a futuro que puede desarrollarse a partir del cimiento que pone este trabajo de tesis.



Capítulo 1

Antecedentes

1.1. Métodos de Manufactura Convencionales

A lo largo de la historia del hombre se han desarrollado diversas técnicas de manufactura de metales, cuyas metodologías se han ido perfeccionando en medida a la utilidad y versatilidad que representara su utilización para la fabricación de diferentes tipos de piezas. Como un avance significativo en el desarrollo de tecnología de manufactura de metales se tiene el advenimiento de máquinas herramienta basadas en el arranque de viruta para lograr formas determinadas. Dentro de este tipo de herramientas se consideran principalmente al torno, la fresa y el taladro, con los que en conjunto se han logrado piezas con una infinidad de formas y acabados hechos con diferentes materiales. Dada la naturaleza de este método convencional de manufactura, la viabilidad de su empleo se ve afectada directamente por las condiciones del tipo de material a trabajar y de la disponibilidad de herramientas suficientemente resistentes y durables que soporten el desgaste que conlleva el arranque de viruta, lo que implica a su vez que la herramienta sea necesariamente de un material más duro que el material de la pieza de trabajo a maquinar. Debido a esta condición, los problemas de desgaste en las herramientas de corte para maquinar nuevas aleaciones extremadamente duras empleadas en diversas industrias (aeronáutica, automotriz, etcétera) se convierte en un asunto de suma importancia en la manufactura [2]. En la figura 1.1 se observa un método de manufactura por arranque de viruta en torno, y se aprecia el desgaste de la herramienta con la que se lleva a cabo el corte.



▲ **Figura 1.1.** Manufactura de acero por medio de método de arranque de viruta en torno.

Atendiendo a las necesidades de maquinado en materiales de alta dureza y alta resistencia a la corrosión exigido por nuevas aleaciones metálicas, surgen una serie de métodos nuevos con principios de funcionamiento sin contacto entre la herramienta y la materia prima a mecanizar, a los cuales se les conoce como **métodos energéticos** [2]. Entre estos métodos podemos encontrar a la manufactura por electroerosión, por ultrasonido, corte por chorro de agua,

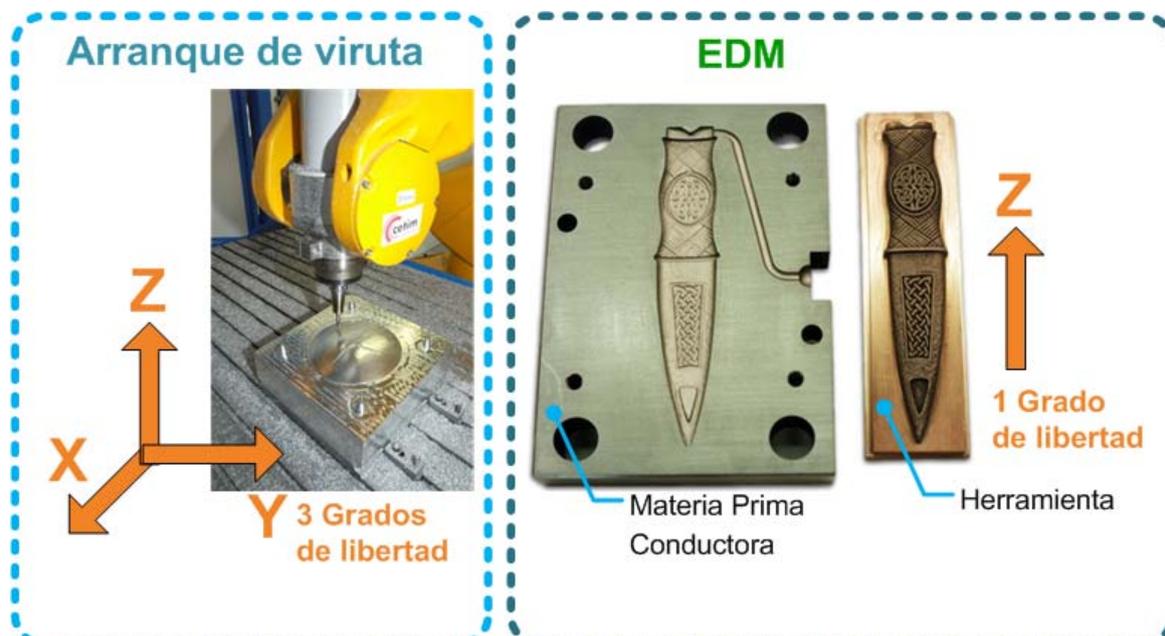
mecanizado electrolítico, mecanizado por láser, entre otros.

1.2. Antecedentes de la Electroerosión

Estudiando el efecto destructor que tiene una chispa eléctrica sobre los contactos de un interruptor fue como los científicos B. R. y N.I. Lazarenko en Rusia llegaron en 1943 a la conclusión de poder aplicar este efecto destructor a una finalidad práctica; el mecanizado de metales mediante descargas eléctricas. La electroerosión es un proceso que, basándose en el empleo directo de una corriente eléctrica, consigue la fiel reproducción de la forma de un electrodo de manera automática en una pieza de material conductor eléctrico en forma complementaria. Para llevar a cabo su cometido de reproducción de formas, la electroerosión requiere de utilizar corrientes pulsantes unidireccionales de energía determinada. Hasta entonces los únicos procedimientos empleados para dar forma a los metales estaban basados en la fundición, la deformación plástica y el arranque de viruta [2].

Se puede afirmar que con la manufactura por electroerosión (EDM) nació un nuevo y revolucionario sistema de mecanizado de los metales, que a diferencia de los hasta entonces conocidos, para éste no cuentan ni la dureza, ni la tenacidad de los metales a mecanizar. Desde aquel entonces el fenómeno ha sido objeto de amplias e intensivas investigaciones, y gracias a ello se ha ido perfeccionando de tal manera que hoy en día constituye un medio imprescindible para la fabricación de todo tipo

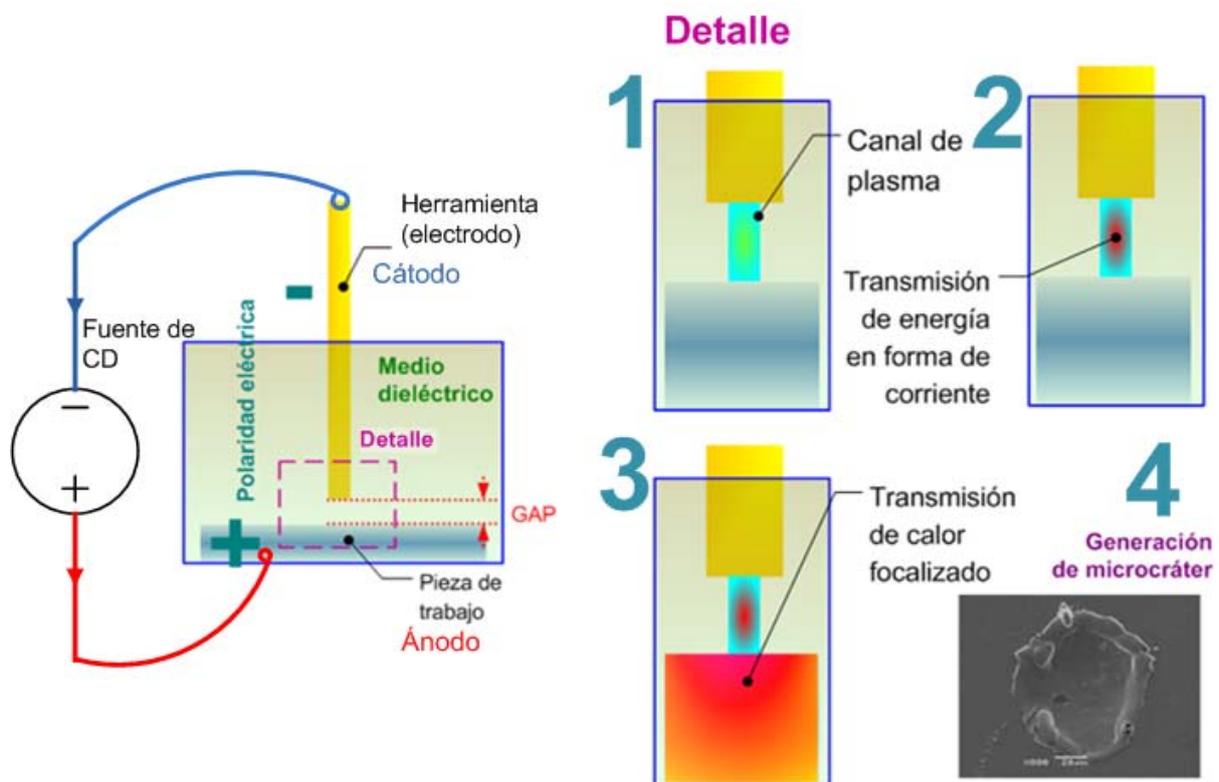
de moldes, estampas, troqueles y matrices, además de un amplio campo de aplicaciones en la elaboración de piezas de difícil realización por otros procedimientos, permitiendo una ejecución del trabajo de forma racional, económica y precisa. Por ejemplo, el estampado de dados sobre una pieza de trabajo de alta dureza llevada a cabo por una máquina EDM por penetración, a diferencia de los otros procedimientos, no necesita de movimientos relativos entre herramienta y pieza, como sucede concretamente en el mecanizado por arranque de viruta. En este caso el único movimiento necesario es el de penetración o avance de uno de los electrodos, el que funge como herramienta y que se estampa como un sello sobre el otro electrodo, la pieza de trabajo. En la figura 1.2 se hace una comparación entre una máquina fresadora convencional (izquierda) y una máquina EDM por penetración (derecha). En el primer caso, para realizar una forma determinada sobre una pieza de trabajo es necesario contar con tres grados de libertad para la herramienta de corte; mientras que en el segundo caso, sólo se requiere de un grado de libertad [2].



▲ **Figura 1.2.** Diferencia de los grados de libertad necesarios entre maquinado por arranque de viruta y EDM.

1.3. Fenómeno de la Electroerosión

El método de descarga por electroerosión se lleva a cabo mediante un proceso térmico que utiliza descargas eléctricas para erosionar la pieza de trabajo, se trata de un proceso sin contacto que ejerce fuerzas muy pequeñas sobre la pieza de trabajo y la herramienta; esto lo hace deseable para el maquinado de piezas miniatura ya que no deforma la pieza de trabajo [3]. Los eventos consecutivos para la generación de un microcráter por electroerosión se describen en la figura 1.3.



▲ **Figura 1.3.** Fenómeno de la electroerosión.

La descripción de los cuatro puntos de la figura 1.3 es la que sigue:

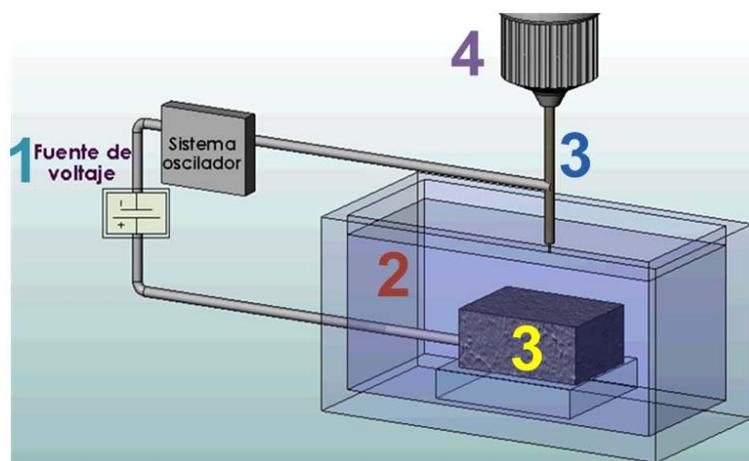
- 1) Se polarizan con una fuente de voltaje de corriente directa ambos electrodos. El campo eléctrico entre la herramienta y la pieza de trabajo es suficientemente fuerte para ionizar el medio dieléctrico de forma tal que se crea un canal de gas ionizado o plasma entre ambos electrodos.
- 2) Por este canal de plasma es posible transmitir energía entre ambos electrodos en forma de corriente eléctrica.

- 3) El canal de plasma actúa como una fuente de calor focalizado sobre la superficie de la pieza de trabajo, así ésta se calienta localmente a una temperatura mayor a la de su punto de fusión y se funde una pequeña porción.
- 4) El material fundido se remueve y solidifica debido al flujo constante y relativa baja temperatura del medio dieléctrico [3]. En consecuencia se genera un microcráter.

1.4. Principales Componentes de un Sistema de Maquinado por Electroerosión por Penetración

El proceso de electroerosión se compone principalmente de los siguientes componentes (figura 1.4):

- 1) Fuente de Corriente directa. Capaz de conmutar a frecuencias altas y controlar la energía de cada descarga.
- 2) Medio dieléctrico. Encargado de brindar estabilidad y refrigeración local al proceso EDM.
- 3) Pieza de trabajo y herramienta: Electroodos.
- 4) Sistema de posicionamiento (servocontrol). Necesario para colocar el electrodo a una distancia entre 1 y 5 [μm] de la pieza de trabajo, con una resolución aproximada de 0.5 [μm].

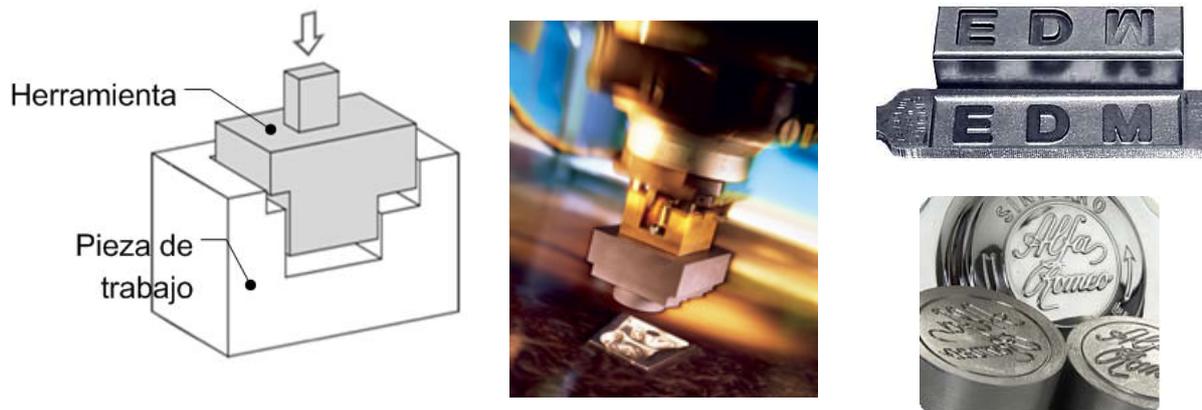


▲ **Figura 1.4.** Componentes básicos de un sistema de electroerosión por penetración.

1.5. Tipos de Configuración de Máquinas EDM

Existen básicamente cuatro configuraciones del máquinas EDM:

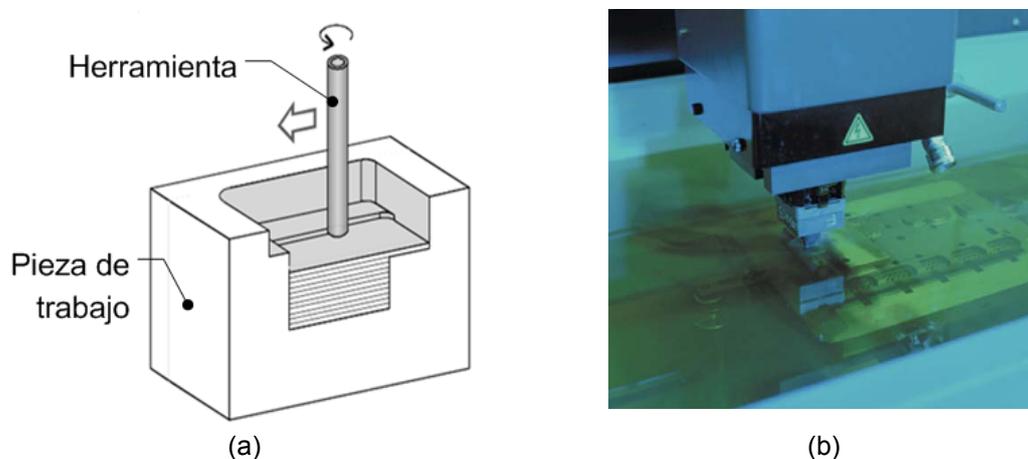
- a) Máquina EDM por penetración, conocida como *die-sink EDM* en inglés. La herramienta tiene una forma determinada que se maquina en la pieza de trabajo de forma complementaria como se muestra en la figura 1.5



▲ **Figura 1.5.** EDM por penetración. Ejemplo de una herramienta cuyo espejo se ha maquinado.

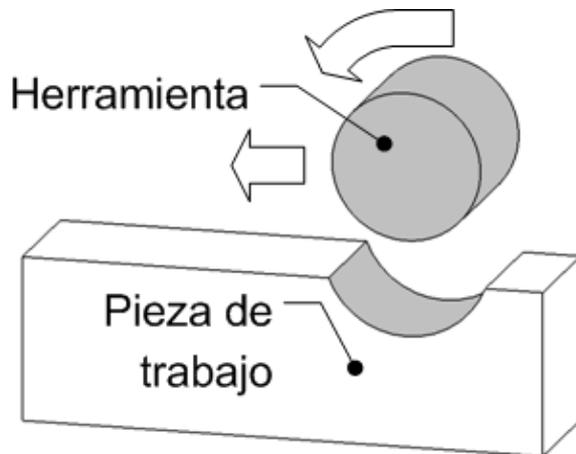
Esta misma configuración es aplicada a la manufactura de barrenos pasados, adaptando la funcionalidad de un taladro al colocar una herramienta de diámetro equiparable al diámetro del barreno a manufacturar.

- b) Fresadora EDM, conocida como *milling EDM*. Las funciones de una máquina herramienta fresadora convencional son compartidas con una fresadora EDM, la diferencia es el principio de remoción de material. En la figura 1.6 se muestra cómo se lleva a cabo este proceso.



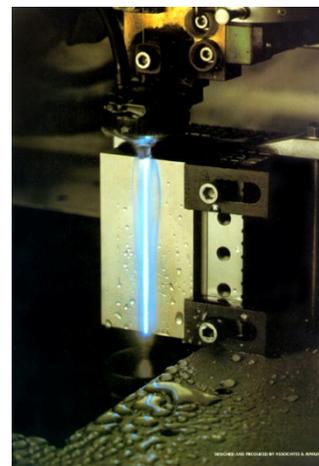
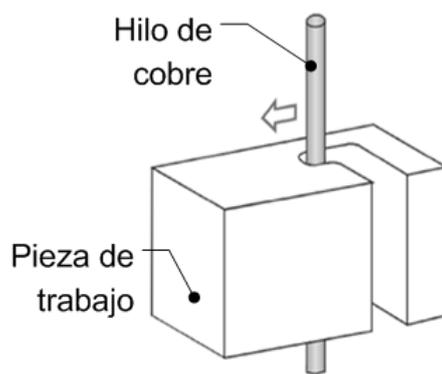
▲ **Figura 1.6.** Fresa EDM. (a) Esquema funcional. (b) Fotografía del proceso andando.

- c) Esmeril EDM. Conocido como *Grinding EDM*. Al igual que un esmeril convencional, mediante una herramienta circular con movimiento rotacional se erosiona la pieza de trabajo. Ver figura 1.7.



◀ **Figura 1.7.** Esmeril EDM.

- d) Máquina EDM de Hilo, conocida como WEDM del inglés *wire EDM*. La herramienta para erosionar la pieza de trabajo es un hilo de cobre, el cual puede ser de diferentes calibres. A diferencia de la máquina anterior, la herramienta y la pieza de trabajo deben tener movimiento relativo entre sí. Ver figura 1.8.



▲ **Figura 1.8.** Máquina WEDM. (a) Esquema funcional. (b) Fotografía del proceso en operación.

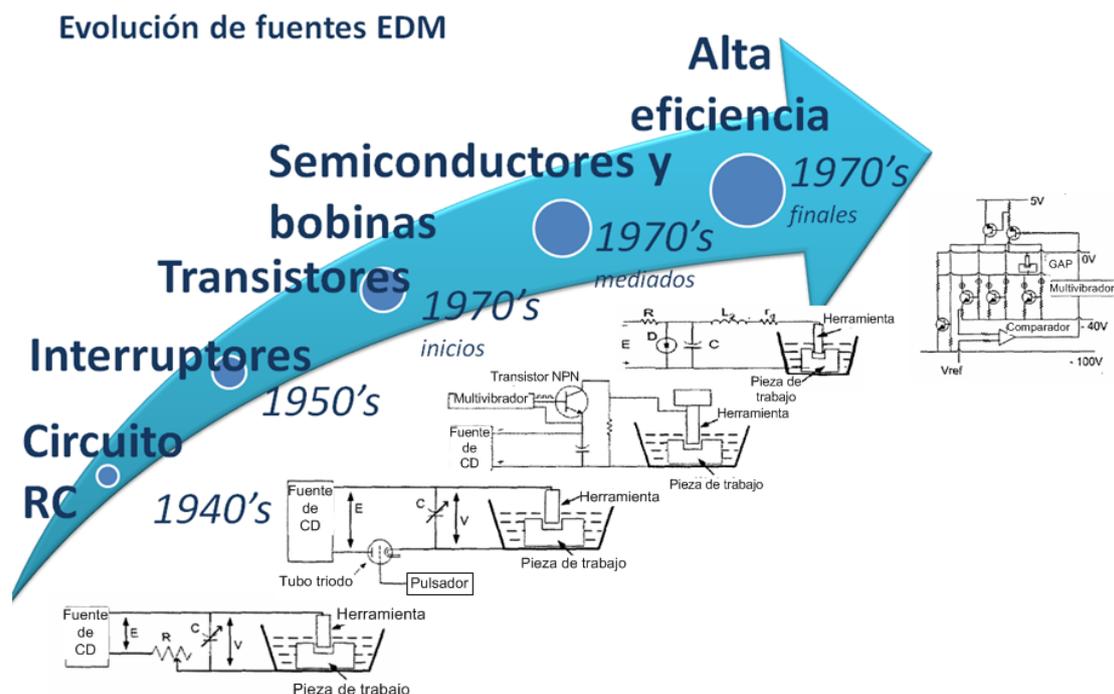
Las diferencias clave entre una y otra configuración de máquina EDM es la forma de las herramientas empleadas y el movimiento relativo entre ambos electrodos. La combinación de estas diferencias dan las configuraciones antes presentadas. Por

ejemplo, entre las maquina de penetración y el taladro, la diferencia es forma de la herramienta.

1.6. Fuentes Eléctricas para EDM en el Mundo

1.6.1. Primeras Propuestas y sus Progresos

En la figura 1.9 se muestra un panorama del avance tecnológico que han tenido las fuentes eléctricas aplicadas a la manufactura por electroerosión desde sus inicios en los años 40's en Rusia. Se puede observar que el advenimiento de diferentes dispositivos electrónicos ha traído consigo el desarrollo y mejora de sistemas eléctricos implementados aplicados al EDM. Por ejemplo, con el desarrollo de tecnología en nuevos materiales se pudo dar el salto entre una fuente básica RC y una fuente con interruptores eléctricos, cuya ventaja es la limitación de corriente de maquinado entregada por el capacitor, y de esa manera se mejoran los acabados del maquinado. Así mismo, en la década de los 70's se comenzó a utilizar al transistor como un componente básico en el diseño de las fuentes para EDM, lo que representó un salto tecnológico muy importante, por la facilidad de control que se tiene con este tipo de dispositivos. La tecnología de transistor fue utilizada en conjunto con elementos eléctricos pasivos como bobinas, dada su naturaleza de almacenar energía en forma de corriente eléctrica y alcanzar rangos energéticos mayores de maquinado [8].

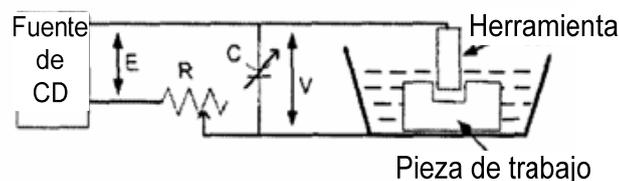


▲ **Figura 1.9.** Panorama general del avance tecnológico de fuentes eléctricas para EDM.

Las fuentes correspondientes a la figura 1.9 se describen a continuación:

1.6.2. Fuente de Relajación RC

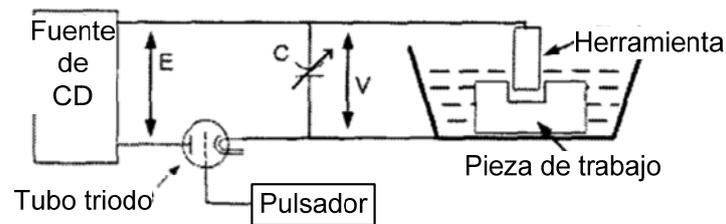
Esta fuente eléctrica fue la que se utilizó en los inicios de este método de manufactura por electroerosión, cuando en 1943 B. R. y N.I. Lazarenko en Rusia realizaron los primeros estudios sobre este fenómeno [8]. El uso de estas fuentes aún es factible para diferentes tipos de aplicaciones, sobretodo cuando se necesitan maquinados rápidos, su costo de implementación es bajo. Sin embargo, su eficiencia es muy baja pues la resistencia usada para transmitir corriente al capacitor está conectada a la fuente de voltaje ininterrumpidamente, lo que genera excesivas pérdidas de potencia debido al calentamiento por efecto Joule manifestado en ella. Esto eventualmente provoca que la resistencia eléctrica tienda a ser nula, generando peligrosamente un corto circuito en la fuente de corriente directa encargada la potencia eléctrica. Dicho circuito se muestra en la figura 1.10.



▲ **Figura 1.10.** Circuito básico de relajación.

1.6.3. Fuente con Interrupción de Corriente.

Con el fin de limitar la corriente de maquinado, es posible implementar un interruptor en serie que “corta” la fuente de alimentación eléctrica hacia el capacitor que brinda la energía de maquinado. Este cambio logró que los elementos del circuito tuvieran menos pérdidas de potencia por efecto Joule, ya que el ciclo de trabajo de la transmisión de energía de la fuente hacia los dispositivos externos a la misma dejó de ser del 100%. Así mismo, se logró una mejora en el acabado sobre la pieza de trabajo ya que la energía de maquinado era más controlable. Igualmente se investigó sobre el concepto de “tiempo de descanso del fluido dieléctrico” para un maquinado más eficiente que evitara los eventos de arco eléctrico [8]. La figura 1.11 muestra este circuito.

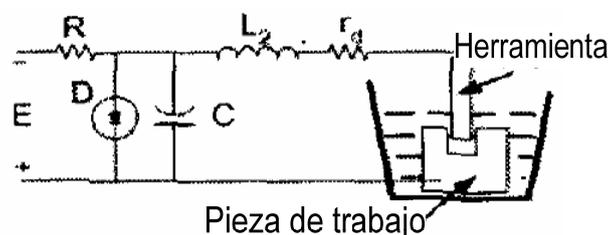


▲ **Figura 1.11.** Fuente EDM con interrupción de corriente eléctrica mediante un tubo triodo.

1.6.4. Fuente EDM con Semiconductores y Elementos Eléctricos

Pasivos

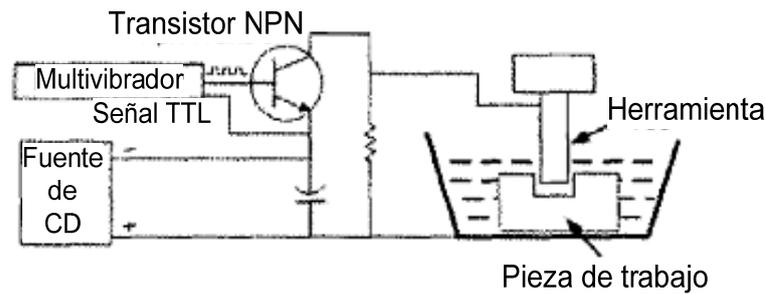
Dada la fuerza con la que los electrones viajan desde un electrodo a otro por el canal de plasma, la forma de onda transitoria del paso de corriente llega a ser de naturaleza bipolar, efecto indeseable en EDM. Para corregir este problema se hace uso de un diodo de “*freewheeling*” o de protección que impide que haya corriente de regreso que puedan dañar a la fuente de alimentación. Además, la bobina que se encuentra conectada en serie con la herramienta, el *GAP* y la pieza de trabajo tiene la función de suministrar corriente extra en los tiempos de apagado con el fin de incrementar la tasa de remoción de material [8]. Esta fuente se ilustra en la figura 1.12.



▲ **Figura 1.12.** Fuente EDM con semiconductores y elementos eléctricos pasivos.

1.6.5. Fuente con Interrupción Vía Transistor

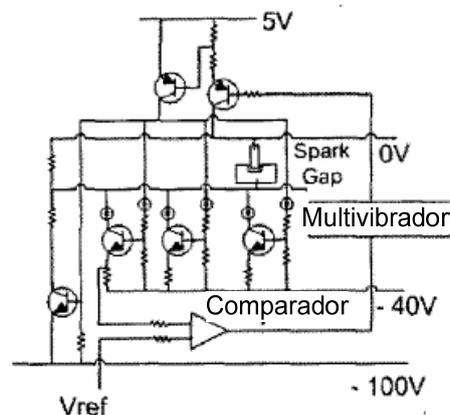
Gracias al desarrollo tecnológico en el campo de los semiconductores que como consecuencia trajo el advenimiento de nuevos dispositivos semiconductores como el transistor, se pudo implementar una fuente EDM que por primera vez controlara el paso de corriente a través del *GAP* por medio de señales con forma de onda cuadrada con niveles de voltaje de entre 0 y 5 [V] (TTL *Transistor-Transistor Logic*). Con esto se abrió un campo amplio de conocimiento en relación a fuentes eléctricas aplicadas al EDM [8]. En la figura 1.13 se muestra esta fuente EDM.



▲ **Figura 1.13.** Fuente EDM con transistor como interruptor.

1.6.6. Fuente de Alta Eficiencia

El principio de funcionamiento de la fuente de alta eficiencia mostrada en la figura 1.14 se basa en el hecho de que, para mantener una cierta cantidad de corriente en el *GAP*, no es necesario mantener el mismo nivel de voltaje con el que en principio se ionizó el canal de plasma en el medio dieléctrico. En el momento de transferencia de energía en forma de corriente eléctrica entre ambos electrodos, el voltaje puede ser mucho menor al voltaje de ionización del fluido dieléctrico. Por ejemplo, en el esquema de la fuente se muestran tres voltajes: 5 [V] para la operación de encendido/apagado de transistores, -100 [V] para ionizar el medio dieléctrico, y -40 [V] para que una vez que se haya iniciado la transferencia de energía en chispa eléctrica, sea este voltaje el que mantenga la transferencia de energía y así, utilizar menos energía suministrada total en el proceso entero. En el esquema también se observa un elemento comparador de niveles de señales de voltaje, que es el mecanismo mediante el cual el sistema sabe que es momento de hacer el intercambio de niveles de voltajes de polarización (entre -100 y -40 [V]) [8].



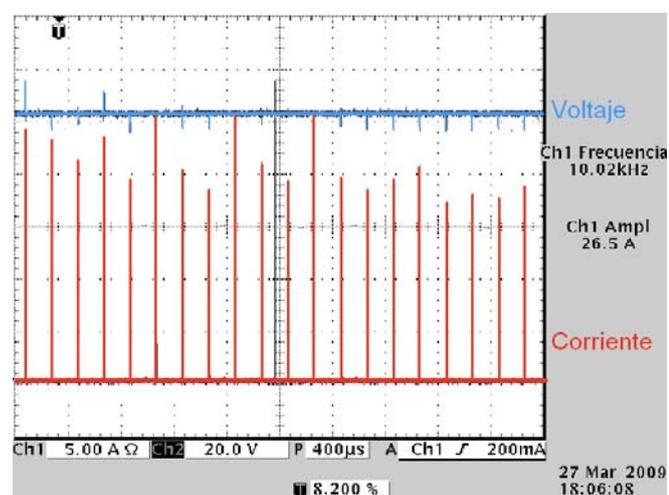
▲ **Figura 1.14.** Fuente EDM de alta eficiencia.

Hoy en día estas propuestas representan el antecedente del principio de funcionamiento de algunas fuentes eléctricas aplicadas al EDM, lo que sirve como cimiento para nuevos diseños de sistemas afines.

1.7. Pulsos Isofrecuenciales y Pulsos Isoenergéticos

A partir de la implementación de fuentes transistorizadas aplicadas al EDM surgen dos conceptos importantes sobre la aplicación de la energía de maquinado que se logra con este tipo de sistemas, éstos son pulsos isofrecuenciales y pulsos isoenergéticos. Definidos a continuación:

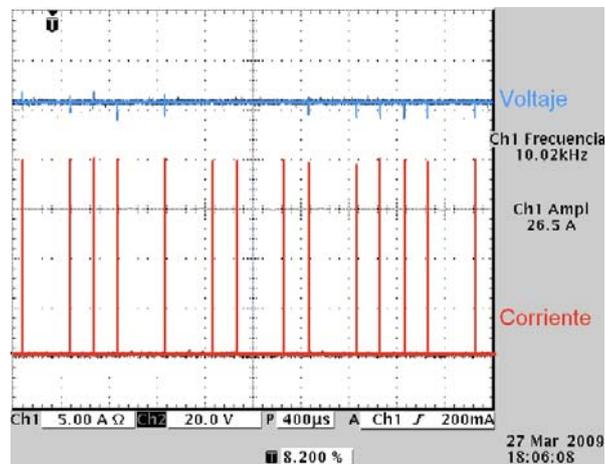
- a) Pulsos Isofrecuenciales: Con los cuales se mantiene una frecuencia constante de las descargas eléctricas, asegurando con ello una tasa de remoción de material constante. La energía de maquinado no es constante por lo que el tamaño en diámetro y volumen de los cráteres generados en cada descarga no es uniforme [8]. En la figura 1.15 se observa el comportamiento de las descargas en este modo:



▲ **Figura 1.15.** Pulsos de corriente de modo isofrecuencial. Figura obtenida por medio de un osciloscopio.

- b) Pulsos Isoenergéticos: Con los cuales se proveen pulsos de energía de magnitudes similares, logrando con ello un buen acabado en la superficie de la pieza de trabajo, pues en principio el diámetro y volumen de los

microcráteres generados es uniforme [8]. La ocurrencia de estos pulsos no necesariamente es periódica. Ver figura 1.16.



▲ **Figura 1.16.** Pulsos de corriente de modo isoenergético. Figura obtenida de osciloscopio.

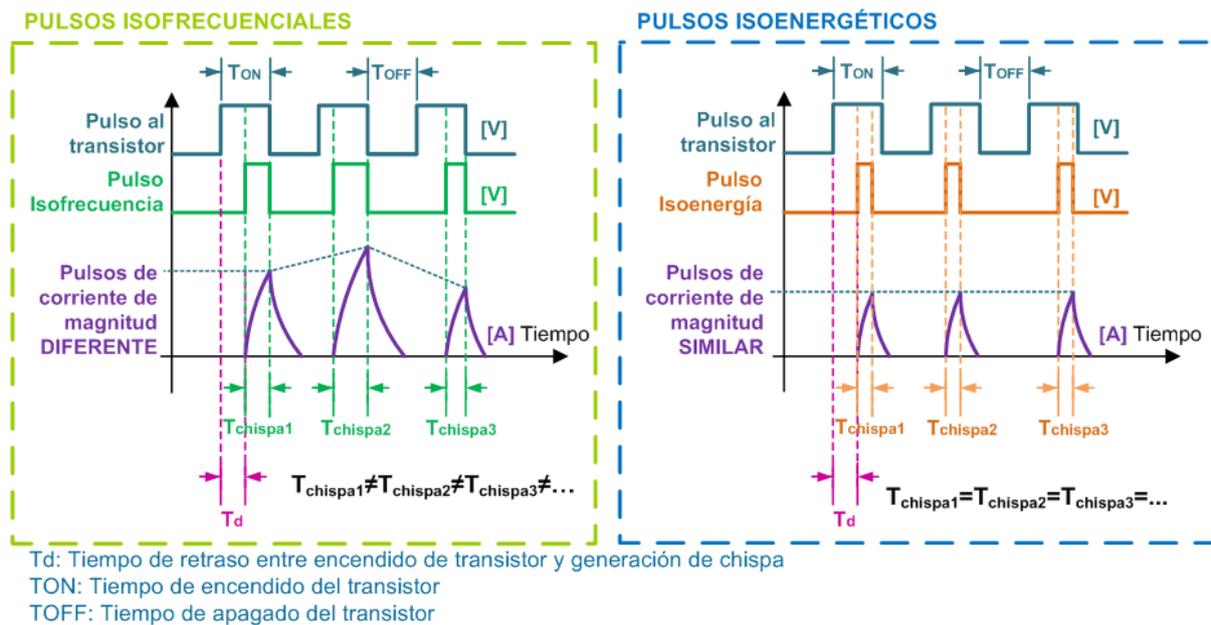
El transistor, trabajando en las regiones de corte y saturación, funciona como interruptor de una fuente de alto voltaje conectada directamente a ambos electrodos, permitiendo el paso y cese de corriente entre ellos. En el momento que se manda un pulso de nivel lógico alto al transistor, bajo el esquema de lógica positiva, éste funciona como un interruptor cerrado que permite que el voltaje entre ambos electrodos sea el provisto por la fuente de alto voltaje, provocando la ionización del medio dieléctrico, y la eventual generación de chispa, esto último ocurre de manera completamente aleatoria, ello quiere decir que este tiempo de retardo no es igual en todos los casos. Esto es verdadero tanto en una fuente de pulsos isofrecuenciales como en pulsos isoenergéticos.

En una fuente isofrecuencial se genera una chispa cada determinado periodo de tiempo, cuya duración está en función de:

1. Tiempo de retraso entre inicio de pulso e inicio de transmisión de energía entre electrodos (T_d), y
2. Tiempo total de encendido del transistor (T_{ON}).

En este punto radica la diferencia entre los pulsos de corriente isofrecuenciales y los pulsos isoenergéticos, pues en el segundo caso, se busca que el tiempo de chispa

se cuente a partir de la generación de la misma, de modo que todos los eventos tengan la misma duración y amplitud. Ver figura 1.17.



▲ **Figura 1.17.** Formas de onda correspondientes a fuentes de pulsos de tipo isofrecuencial (izquierda) e isoenergética (derecha).

1.8. Tasa de Remoción de Material

La tasa de remoción de material (TRM) y el acabado de la superficie maquinada dependen de la magnitud y duración de la descarga [7]. Cuando la corriente eléctrica se incrementa, así mismo pasa con la TRM, pero el acabado fino de la pieza de trabajo se pierde. Cuando la frecuencia de las descargas se incrementa, el acabado sobre la superficie de la pieza de trabajo se hace más fino, pero el desgaste del electrodo aumenta [8].

1.9. Clases de Descargas Eléctricas

Durante la generación de chispa, existen cuatro condiciones que pueden presentarse. La primera condición es llamada “circuito abierto” que es cuando la herramienta está a una distancia de la pieza de trabajo tal que la fuerza del campo eléctrico generado entre ambos no es suficientemente alta para ionizar el medio dieléctrico y permitir el paso de corriente eléctrica entre ellos; para este caso, la diferencia de potencial entre los electrodos es igual al de la fuente de alto voltaje. El

segundo caso, óptimo para el sistema eléctrico en EDM, llamado “chispa eléctrica”, es cuando la corriente eléctrica viaja directamente a través del canal de plasma formado en el *GAP*. El tercer caso es el llamado “arco eléctrico” que ocurre cuando la corriente pasa por partículas dispersas del material removido que se encuentran en el *GAP*, lo que provoca una inestabilidad y posibles daños al sistema eléctrico ya que la corriente suministrada no es controlable. El cuarto caso, llamado “corto circuito”, se presenta cuando hay contacto físico entre el electrodo y la pieza de trabajo, el voltaje de la fuente se ve reducido a cero y la corriente tiende al valor límite de máxima nula.

1.10. Micromanufactura por Electroerosión

En la micromanufactura por electroerosión (μ EDM), el proceso de electroerosión convencional se aplica a nivel de micrómetros. En EDM convencional, la cantidad de material extraído es una función de la energía que atraviesa el micrométrico espacio entre los dos electrodos. Mayor paso de energía resulta en mayor cantidad de eliminación de material y también una superficie más rugosa, a causa de los cráteres generados en la pieza de trabajo. En μ EDM, la clave es limitar la energía en la descarga para alcanzar mejores precisiones en la rugosidad y, por lo tanto, buen acabado superficial. Para lograrlo, la energía por descarga se reduce al mínimo y la frecuencia de maquinado se incrementa. Por el proceso de μ EDM se pueden maquinar materiales tales como silicio y ferrita cuya resistencia específica es alta, además de que presentan el problema de agrietarse cuando son procesadas por el proceso de electroerosión convencionales. Esta cualidad del μ EDM lo hace desempeñar un papel crucial en la fabricación de micro sistemas mecatrónicos y otras micropartes para las industrias manufactureras [1].

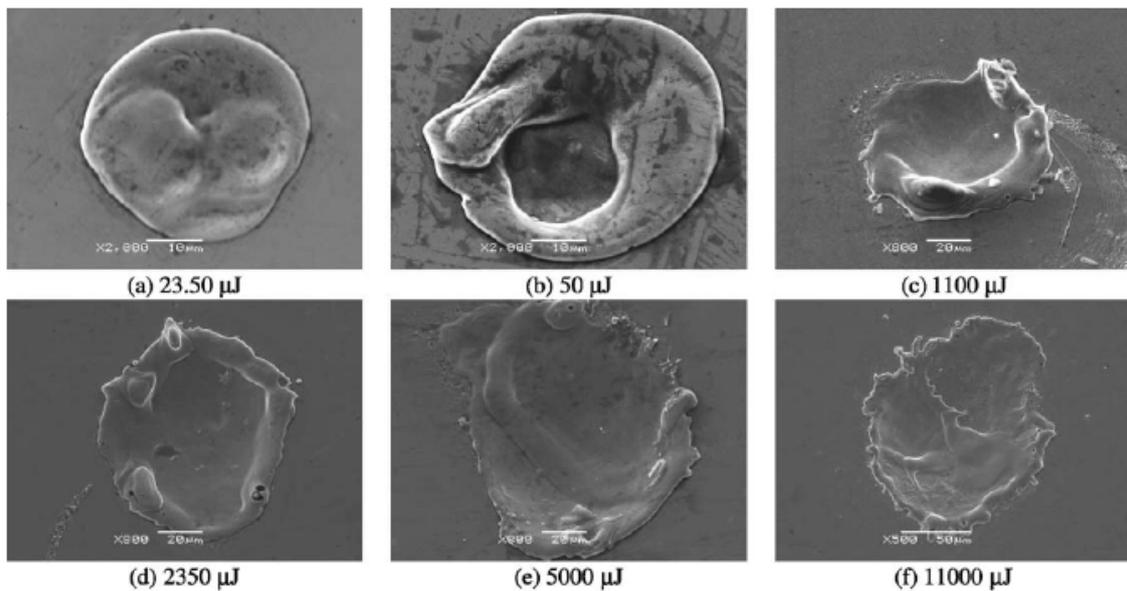
La diferencia entre el μ EDM con el proceso a escala convencional es el orden de la energía utilizada en cada descarga; que es del orden de Joules en EDM convencional (0.05 a 1 J) [4], y de microJoules en μ EDM ($< 50 \mu$ J) [5]. Además, en la escala convencional el tamaño de la herramienta es más grande en varios órdenes de magnitud que el diámetro de las herramientas empleadas en μ EDM, por lo tanto el diámetro del canal de plasma que se forma en μ EDM es mucho menor que el formado en escala convencional. El radio del canal de plasma se incrementa

en función del tiempo, por lo tanto puede ser controlado a partir del tiempo de duración del pulso [6]. Así mismo, el proceso de μ EDM es más complejo debido a efectos despreciables en la escala convencional, por ejemplo el calentamiento del electrodo debido a su tamaño, lo cual limita la cantidad de energía que puede ser suministrada en cada descarga y, en consecuencia, la tasa de remoción de material. El efecto de la fuerza viscosa sobre el electrodo causado por el constante flujo del medio dieléctrico también es más crítico en el campo del μ EDM ya que el electrodo es más susceptible a deformaciones [3].

1.11. Cantidad de energía en el proceso de manufactura por EDM

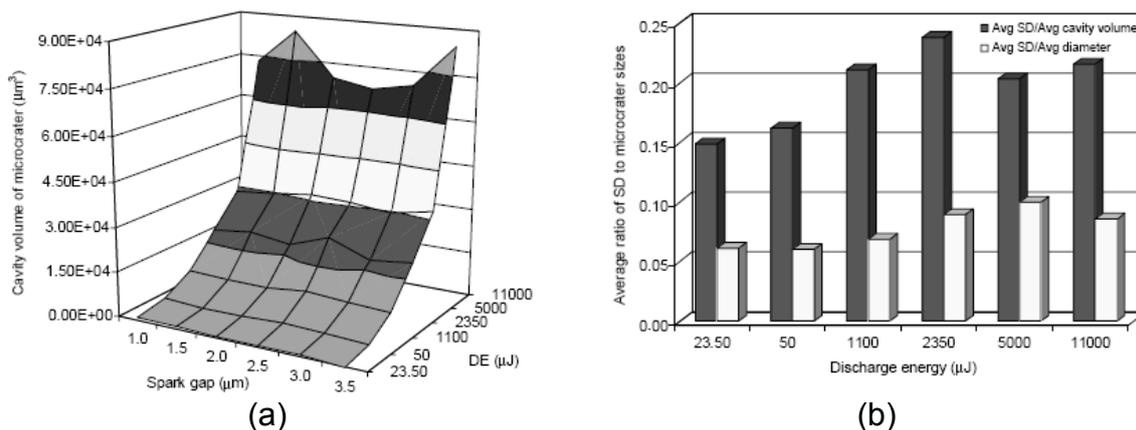
Con el fin de mejorar los procesos de control de las fuentes de máquinas EDM, es muy importante entender el efecto de los parámetros críticos de maquinado involucrados en el mecanismo de remoción de material. Algunos trabajos teóricos relacionados con los parámetros del proceso de maquinado por EDM, tales como voltaje, corriente, energía por descarga, tiempo de apagado entre pulsos, duración de pulso y distancia entre la herramienta y pieza de trabajo donde se genera la chispa; han sido estudiados como una serie de factores directamente involucrados en el tamaño del cráter producido por cada descarga y la integridad de su superficie. Por ejemplo, Y. S. Wong et al. realizaron un análisis de microcráteres generados por μ EDM a diferentes niveles de energía (entre 20 y 11000 μ) [5]. En cada nivel de energía se generaron varios cráteres y se determinó que a mayor energía el diámetro de los cráteres presentaba una desviación estándar mayor, por lo que la calidad de superficie es menos controlable. Estas características indican que la cantidad de energía aplicada por descarga es un parámetro de manufactura muy importante para obtener cráteres de tamaños, profundidades y diámetros uniformes, cuando las características de acabado superficial de la pieza así lo requiere. La eficiencia a bajas energías (<50 μ J) es entre siete y ocho veces mayor que a energías más altas (>1100 μ J) [5].

En la figura 1.18 se muestran los resultados experimentales obtenidos utilizando una fuente basada en un circuito de relajación resistencia-capacitor RC, con pulsos únicos y variando los niveles de energía en cada caso [5].



▲ **Figura 1.18.** Microcráteres hechos con una fuente RC a $2\mu\text{m}$ de GAP [5].

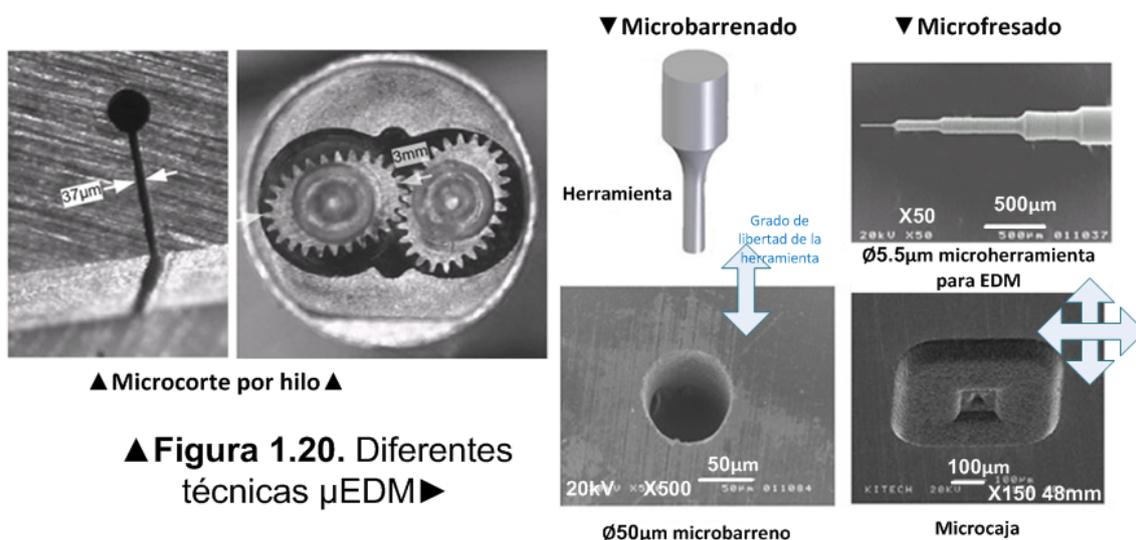
Las imágenes mostradas en la figura 1.19 hacen referencia al comportamiento estadístico del efecto de la energía de maquinado respecto a los microcráteres generados. En la figura 1.19(a) se hace una relación entre el volumen del cráter generado por una chispa, la energía suministrada por dicha chispa y la distancia del GAP. Así mismo, en la figura 1.19(b), se tiene un histograma que relaciona la desviación estándar del diámetro y volumen de los cráteres con la energía suministrada en cada caso [5].



▲ **Figura 1.19.** Modelos estadísticos. (a) Gráfica de 3 coordenadas independientes mostrando la correlación entre energía descargada por chispa, volumen de la cavidad obtenida y distancia de GAP. (b) Histograma de la desviación estándar del diámetro y volumen de los cráteres generados en diversas muestras generadas a diferentes niveles de energía específica cada una [5].

1.12. Configuraciones de Micromáquinas para Electroerosión

Las configuraciones de máquinas para electroerosión vistas, en la sección 1.6., aplicadas en la escala convencional son igualmente aplicadas a la escala de micromanufactura; la diferencia entre una y otra escala radica en el tamaño del electrodo, por ende en los niveles de voltaje y corriente, así como, en la energía utilizada en el proceso. Algunos de los resultados obtenidos alrededor del mundo son los que se muestran en la figura 1.20.



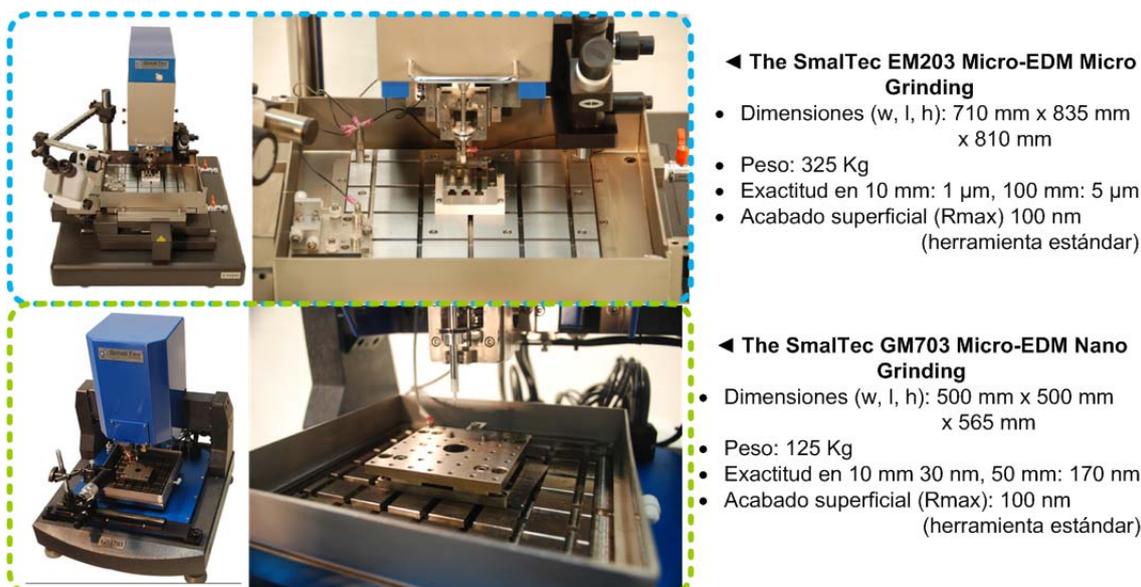
▲ Figura 1.20. Diferentes técnicas μ EDM ►

1.13. Sistemas de Micromanufactura por Electroerosión Actualmente Disponibles en el Mercado

En la tabla 1.1 se presentan algunos sistemas para μ EDM comercialmente disponibles [22]. En esta tabla se resumen algunas de las características de los sistemas de generación de pulsos de dichos sistemas, así como el tipo de aplicaciones de manufactura que tiene el usuario con estas máquinas. En la figura 1.21 se muestra un par de este tipo de sistemas.

Máquina	Fuente de Alimentación	Control de Movimiento	Tamaño de la Herramienta	Aplicaciones del Usuario
Panasonic (WEDG)	Generador con circuito de relajación (RC) Ancho de pulso: 10[ns]	Resolución: 0.1[μ m] Precisión de posicionamiento: 1[μ m]	Agujeros de $\text{Ø}5[\mu\text{m}]$. La máquina fabrica sus propias herramientas	Tres ejes de maquinado y WEDG fabrica engranes, ejes, etc. Así como agujeros y cavidades complejas.
Sarix	No revelado Ancho de pulso: 50[ns] 0.05-40[A]	Resolución: 1[μ m] Precisión de posicionamiento: 1[μ m]	Herramienta de $\text{Ø}12[\mu\text{m}]$ (comprados)	Agujeros. Herramientas de formas determinadas maquinas formas determinadas. Maquinado en 3 ejes.
Pacific Controls	555 estable (voltaje de GAP doble) Ancho de pulso: 2.5[μ s] 0.002-100[A]	Seguimiento a 0.5[μ m]	Herramienta de $\text{Ø}2.5[\mu\text{m}]$ (comprados)	Únicamente agujeros. No se mencionan herramientas de formas determinadas. Maquinado sólo en eje Z.
Agie	No revelado	Resolución: 0.1[μ m] Precisión de posicionamiento: 1[μ m]	Alambre de $\text{Ø}25[\mu\text{m}]$ (comprado)	Cualquier forma en 2-D. No es posible inclinar el alambre.

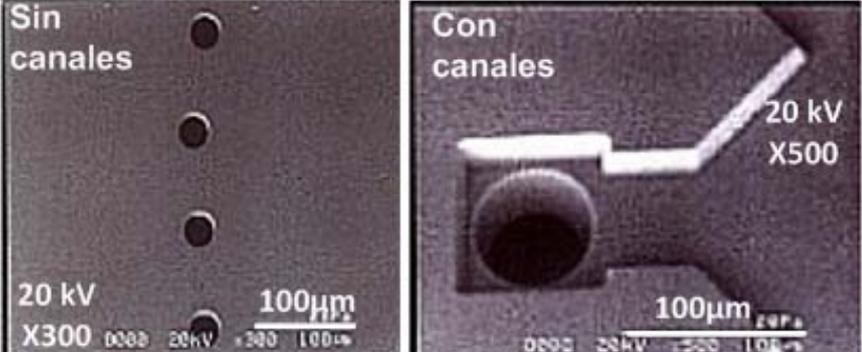
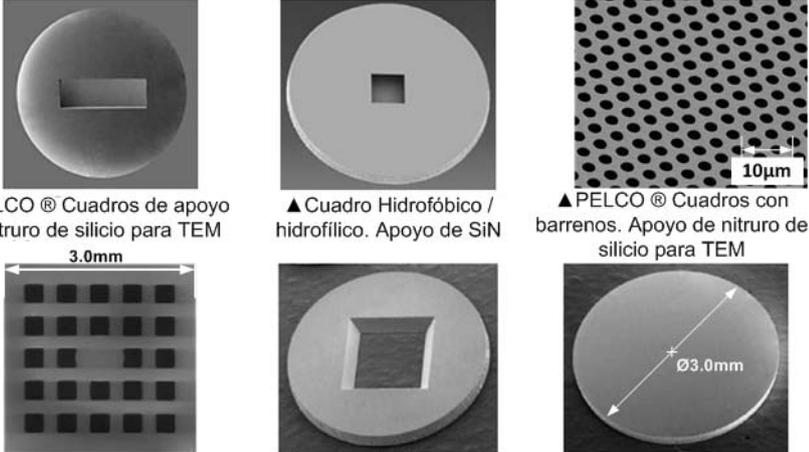
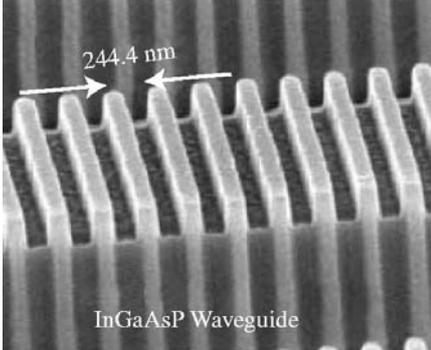
▲ **Tabla 2.1.** Sistemas de μ EDM comercialmente disponibles.

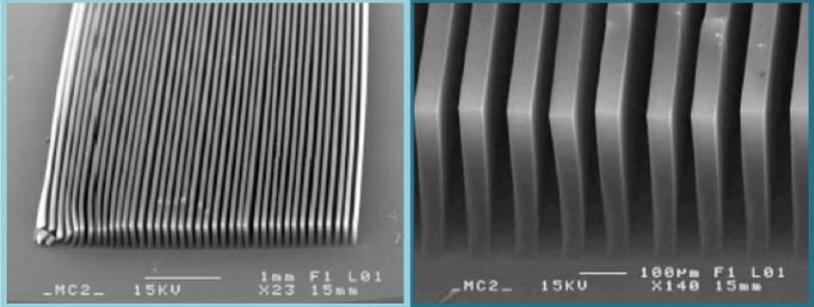
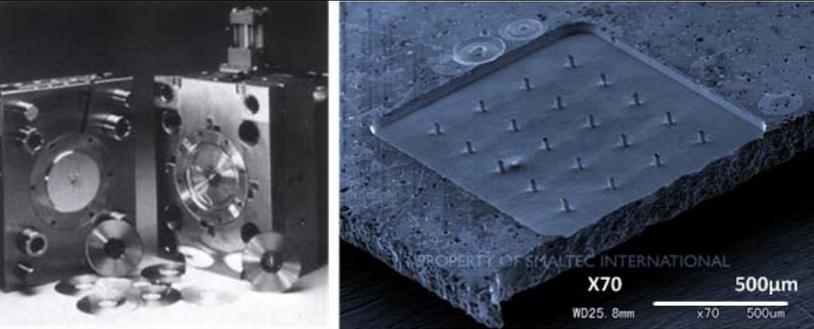
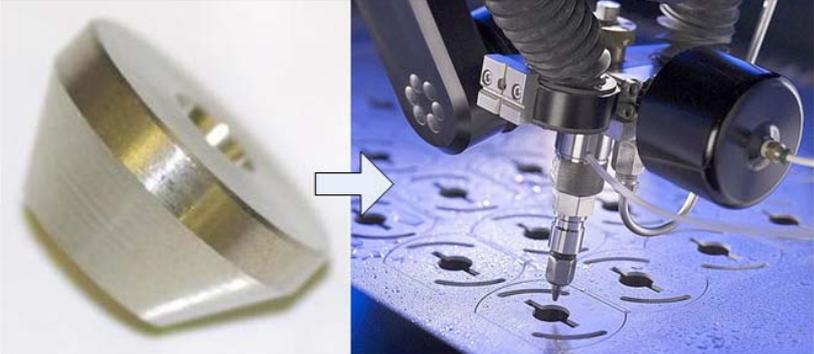


▲ **Figura 1.21.** Nuevos sistemas de micromanufactura por electroerosión disponibles en el mercado.

1.14. Aplicaciones del μ EDM

Algunas de las aplicaciones que se ha dado a este tipo de tecnologías se muestran en la tabla 1.2 [26].

Aplicación	Ejemplo
Fabricación de boquillas para inyección de tinta	
Fabricación de boquillas para inyectores de combustible en motores diesel	
Fabricación de cuadros de apertura para microscopios eléctricos de barrido (SEM scanning electron microscope)	 <p>▲ PELCO ® Cuadros de apoyo de nitruro de silicio para TEM 3.0mm</p> <p>▲ Cuadro Hidrofóbico / hidrofílico. Apoyo de SiN</p> <p>▲ PELCO ® Cuadros con barrenos. Apoyo de nitruro de silicio para TEM 10µm</p> <p>▲ PELCO ® Films Apoyo dióxido de silicio para TEM</p> <p>▲ Apertura de Marcos de silicio (sin el apoyo de películas delgadas)</p> <p>▲ Nitruro de silicio recubierto de discos de 3 mm (en blanco) Ø3.0mm</p> <p>• TEM: <i>Transmission Electron Microscopy</i>. Microscopía por transmisión de electrones.</p>
Fabricación de microcanales para guía de ondas	 <p>244.4 nm</p> <p>InGaAsP Waveguide</p>

Fabricación de microaletas de refrigeración	
Fabricación de moldes para lentes de contacto y otros micromoldes.	
Fabricación de orificios para válvulas de máquinas de corte por chorro de agua	

▲ **Tabla 1.2.** Aplicaciones del μ EDM.

Ahora que se ha hablado de los principales aspectos de la manufactura por electroerosión, se procederá a plantear los objetivos y alcances del presente trabajo de tesis.



Capítulo 2

Planteamiento del Problema

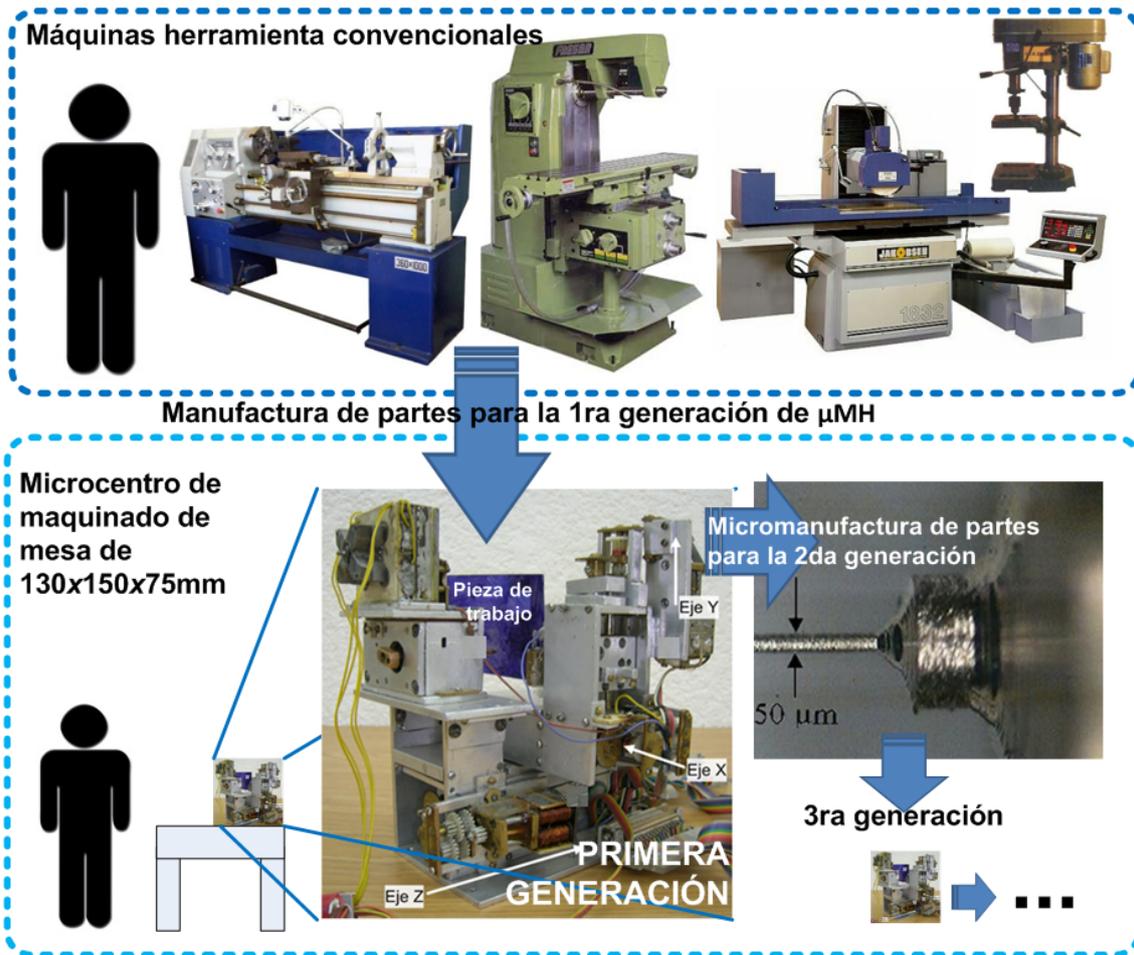
1.1. Concepto de Micromanufactura

La micromanufactura es la tecnología básica de la ingeniería en microescala para la producción de componentes en miniatura. Se trata de un conjunto de procesos para la creación de estructuras, dispositivos o sistemas con tamaños del orden de milímetros y hasta micrómetros. La mayoría de las tecnologías que se han utilizado en la micromanufactura son las tecnologías existentes adaptadas a la miniaturización de las estructuras, dispositivos y sistemas. Las aplicaciones específicas de estos procesos incluyen las micropilas de combustible, microbombas, los sistemas de microfluidos, micromoldes, sub actuadores y sensores en miniatura y dispositivos médicos. De acuerdo a los fenómenos de mecanizado, los procesos de micromaufactura se clasifican en los siguientes grupos: remoción por fuerza mecánica, fundición y vaporización, abración, disolución, deformación plástica, solidificación, laminación y recomposición [1].

1.2. Micromanufactura en el Mundo

Hace tres décadas surgió interés en el mundo por la miniaturización de piezas mecánicas y sistemas electromecánicos, para lo que se propusieron algunos métodos basados en sistemas de tecnología microelectrónica, y ello dio paso a microsistemas electromecánicos, hoy en día mejor conocidos como MEMS (*Microelectromechanical Systems*). Mediante los sistemas basados en la tecnología microelectrónica se pueden generar componentes para sistemas micromecánicos con formas sencillas de dos y media dimensiones. Los materiales empleados en esta tecnología son el silicio, óxido de silicio, películas delgadas de algunos metales como el silicio y materiales piezoeléctricos como el cuarzo. Los MEMS son aplicados en diversas industrias, como la automotriz, biomédica, computación, etcétera [24].

La fabricación de microcomponentes utilizando sistemas micromecánicos, tales como microfábricas, se propuso en los 90's como una nueva alternativa para cubrir algunas aplicaciones donde los MEMS no pudieran ser utilizados. Para este fin, en Japón, se propuso la creación de herramientas que podían ser de diferentes materiales, además estar constituidas por diversas partes que le dieran una estructura tridimensional. Con lo que se desarrollaron micromanipuladores de dimensiones equiparables a las piezas que éste producía. Esto aportó un concepto importante: La aplicación de los métodos convencionales de manufactura para crear micropiezas y microdispositivos para que después éstas, en forma conjunta, fabriquen piezas equiparables o menores a su propio tamaño. Estas micropiezas a su vez podrían ensamblarse para formar una μ MH de segunda generación que genere micropiezas todavía más pequeñas que las de su predecesora, y así sucesivamente [24]. El diagrama de la figura 2.1 explica este concepto.



▲ Figura 2.1. Concepto de las μ MH por generaciones.

Las microfábricas consumen menos energía, espacio y recursos. Las micropiezas producidas por ellas pueden ser aplicadas a la medicina donde las demandas de microequipo son para microscopía, diagnóstico, cirugía no invasiva, entre otras. Así mismo, en el desarrollo de robots dedicados a la inspección de lugares inaccesibles o peligrosos para el hombre, inspección de tuberías, transportación de maquinaria, etcétera [24].

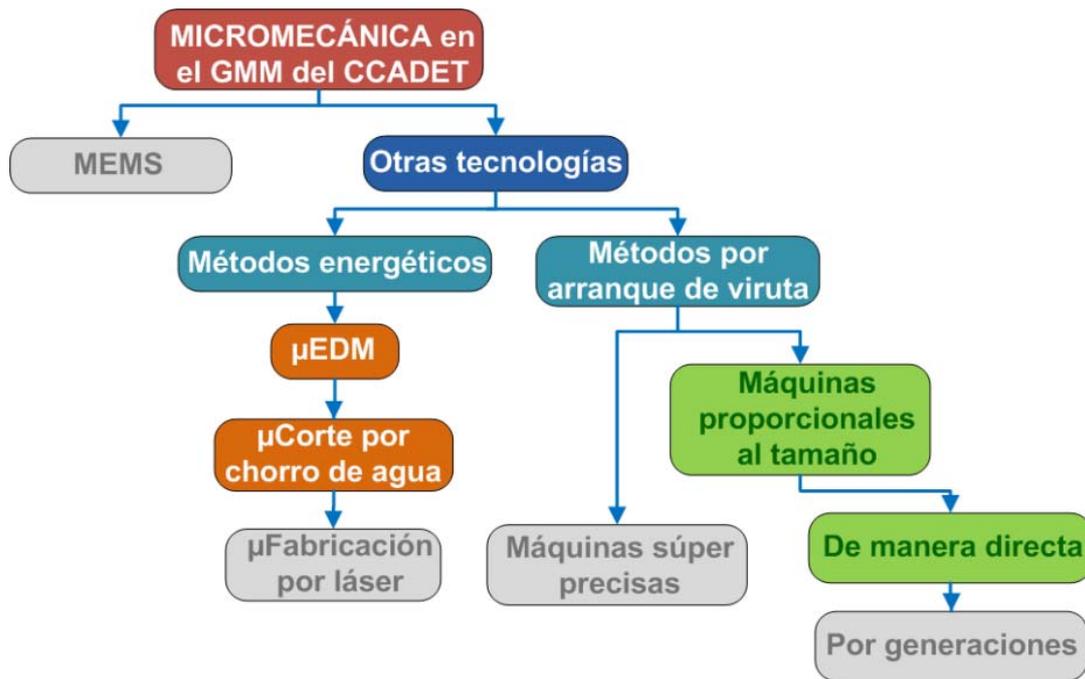
La primera micromáquina herramienta (μ MH), desarrollada en 1996 en Japón fue un microtorno, cuyas dimensiones son 32x28x30[mm]. Esta μ MH tiene precisiones de 1[μ m] y logró maquinar una flecha de 50[μ m] de diámetro. Un año más tarde, en Ucrania se desarrolló un microcentro de maquinado con dimensiones de 130x150x75[mm] que igualmente tenía la resolución de 1[mm] y con la posibilidad de realizar tareas de torneado, fresado, taladrado y rectificado. Con esta μ MH se logró maquinar una flecha de 200[μ m] de diámetro. Hoy en día muchos países como Alemania, Korea, Suiza, EU y México tienen interés en este campo [24].

En México, este tipo de investigaciones se iniciaron en 1999 al continuar el proyecto de la μ MH desarrollada en Ucrania, a través de su creador el Dr. Erns Kussul y su llegada a México [25]. Desde entonces, el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) del Centro de Ciencias Avanzadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM ha tomado interés en el desarrollo de micropartes, así como en todos los desarrollos tecnológicos indirectos que conlleva.

Este tipo de máquinas están enfocadas al desarrollo de piezas pequeñas de precisión con geometrías tridimensionales complejas en materiales variados. La propuesta de μ MH basadas en arranque de material brinda un atractivo campo de aplicación, sobretodo por la gran cantidad de materiales que pueden ser manufacturados. Sin embargo, cuando se trata de manufacturar materiales de alta dureza, la fabricación de herramientas resulta un aspecto complicado y costoso. Existen otras alternativas para manufacturar materiales muy duros como manufactura por láser, choro de agua, ataque electroquímico y maquinado por electroerosión. A estos métodos de manufactura se les conoce como energéticos o sin contacto.

1.3. Investigación y Desarrollo de Métodos No Convencionales de Manufactura en el GMM

Como parte de la investigación de en el campo de la micromanufactura, el GMM ha tomado como una de sus líneas de investigación el desarrollo de μ MH basadas en métodos energéticos con el fin de explorar su amplio campo de conocimiento, así como las ventajas que aporta su uso. En la figura 2.2 se muestra un panorama general de las áreas de investigación en las que incursiona el GMM.



▲ **Figura 2.2.** Desarrollo de la micromecánica por el GMM. Los bloques de colores son áreas desarrolladas o en proceso, mientras que los bloques grises son áreas no exploradas de momento por el grupo.

Los métodos de manufactura sin contacto tienen una característica importante: Las herramientas de trabajo no necesitan ser, a diferencia del método de arranque de viruta, más duras que la misma pieza de trabajo a maquinarse. Hoy en día ello hace que este tipo de maquinado no convencional facilite, e incluso, sea indispensable para realizar ciertas tareas. Por ejemplo, en el caso de la manufactura de corte por chorro de agua que, para realizar un corte en materiales tan duros como acero inoxidable o tan blandos como el papel, utiliza el mismo chorro de agua para llevar a cabo el corte. Otro ejemplo es el maquinado por electroerosión (EDM) que, con la misma herramienta hecha de cobre o grafito (ver Anexo I, tabla A.1 [10]) puede maquinarse desde latón hasta titanio (ver Anexo I, tabla A.2 [10]); debido a que la herramienta ejerce fuerzas muy pequeñas sobre la pieza de trabajo, ya que en principio no existe contacto entre ambas. Esta cualidad, entre otras, que hace a este tipo de métodos no convencionales de manufactura sujeto de interés para la investigación dentro del GMM.

Como parte del desarrollo de sistemas de manufactura por métodos no convencionales en el país, se emprenderá la tarea de implementar un sistema de micromanufactura por electroerosión (μ EDM) por penetración.

1.4. Objetivo

Desarrollar un sistema para la generación de chispa para su aplicación en procesos de micromanufactura por electroerosión.

1.5. Alcances

- ⇒ Adaptar un centro de maquinado vertical CNC con el fin de usar los carros de desplazamiento X,Y e Z para del sistema desarrollado para μ EDM presentado en esta tesis.
- ⇒ Desarrollar un sistema de sujeción de materia prima dentro de un tanque de fluido dieléctrico.
- ⇒ Determinar experimentalmente la influencia de parámetros determinantes en manufactura en EDM.
- ⇒ Buscar y analizar un determinado conjunto de sistemas de generación de chispa aplicados al EDM y μ EDM.
- ⇒ Desarrollar un sistema electrónico que controle la corriente de maquinado por μ EDM.
- ⇒ Desarrollar un circuito de control para la posición de la herramienta.
- ⇒ Realizar pruebas de funcionamiento y mediciones de rugosidad de los acabados obtenidos en maquinados por el sistema propuesto.
- ⇒ Proponer mejoras y trabajo a futuro del sistema propuesto con base a la experiencia adquirida durante este trabajo.

El desarrollo del presente trabajo de tesis se hará con base al orden de los puntos expuestos. En el siguiente capítulo se presenta la implementación de un centro de micromaquinado por electroerosión en el GMM, sus primeras incursiones en la investigación sobre este método de manufactura alternativo.



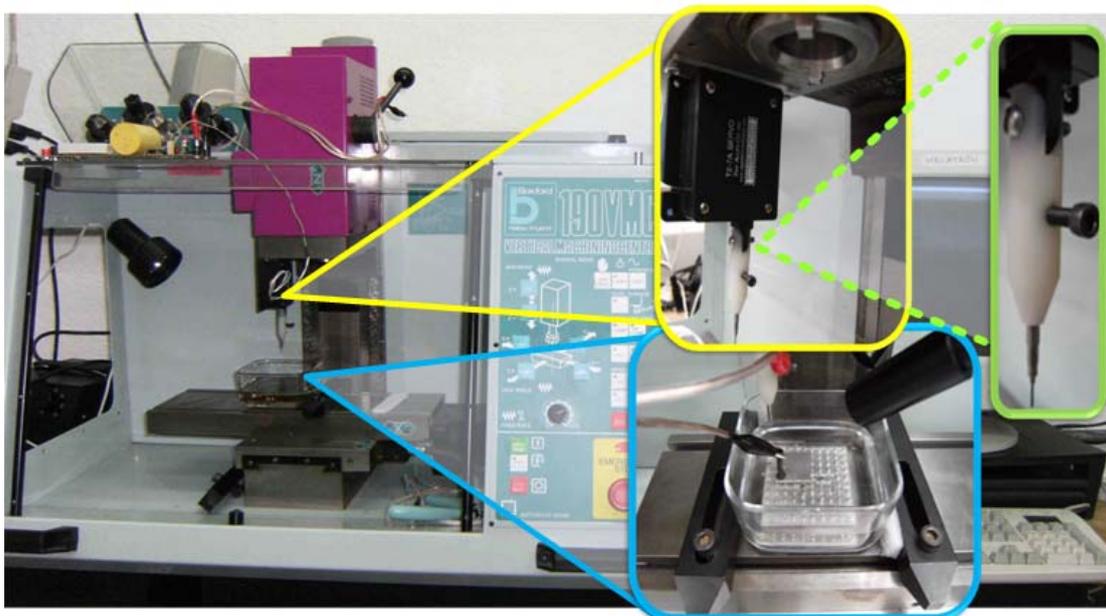
Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Centro de μ EDM Implementado en el GMM

3.1.1. Adaptación de un sistema de de maquinado vertical CNC

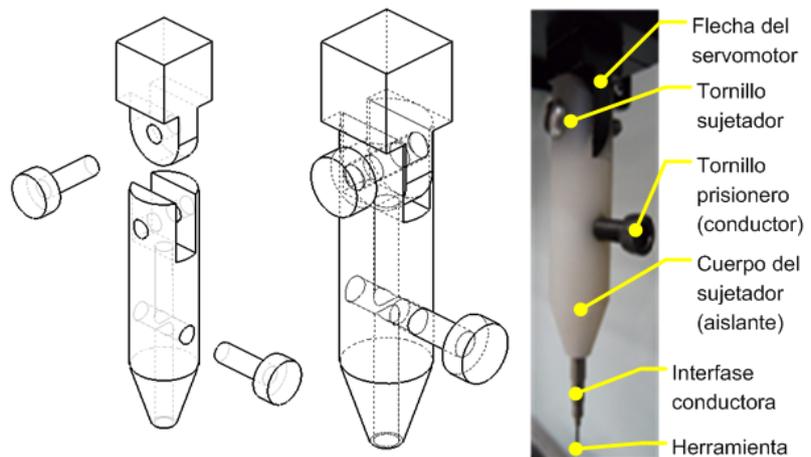
El presente trabajo de tesis representa los inicios del Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) en el ámbito de la micromanufactura por electroerosión (μ EDM). Con el fin de facilitar la tarea de implementar un centro de μ EDM en las instalaciones del GMM, se adaptó un centro de maquinado vertical de control numérico (CNC) comercial relativamente pequeño (800x600x500 [mm]), que ya estaba disponible (ver figura 3.1). Así mismo, se desarrolló un conjunto de herramientas para la sujeción de piezas de trabajo a colocar inmersas dentro de un tanque de fluido dieléctrico.



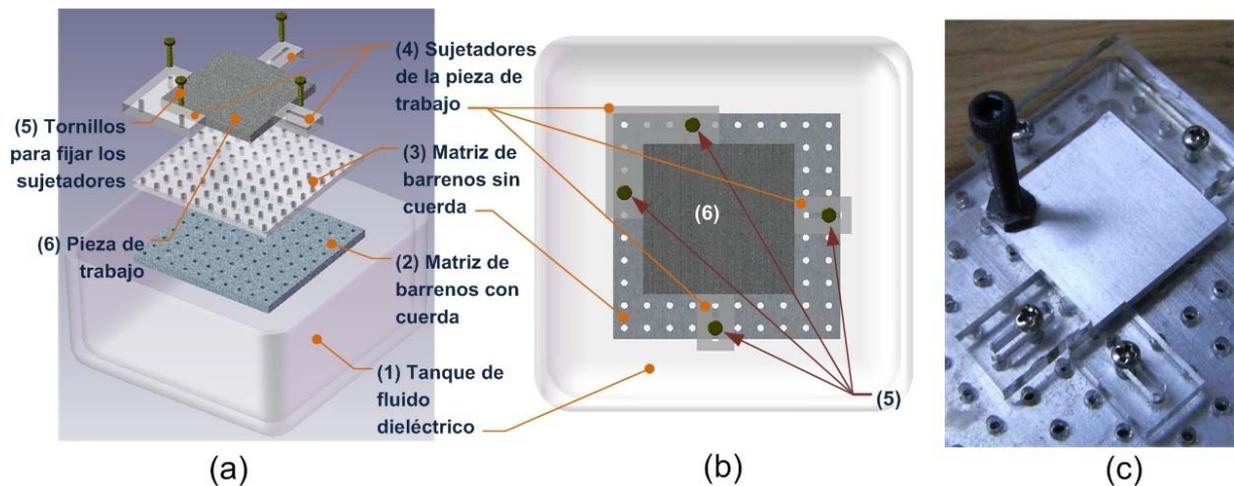
▲ **Figura 3.1.** Centro de maquinado vertical Boxford 190VC donde se monta el centro de μ EDM.

Como puede observarse en la figura 3.1 al árbol del centro de maquinado vertical CNC se adhirió un servomotor de corriente directa y movimiento lineal (recuadro amarillo), a cuya flecha se le anexó un portaelectrodo hecho de material aislante (recuadro verde). Mediante un tornillo prisionero se hace contacto eléctrico con la herramienta o electrodo, ver figura 3.2. Sobre la bancada de la misma máquina se coloca un recipiente de vidrio PYREX[®], que funge como tanque de fluido dieléctrico (recuadro azul), éste se mantiene fijo mediante las propias abrazaderas del la máquina CNC incluidas en su herramienta de apoyo. Gracias a este arreglo, y la disponibilidad del uso de esta máquina, se tiene la posibilidad dar a la herramienta del sistema μ EDM movimiento en los ejes X, Y e Z, especialmente en este último eje que facilita el cambio de herramienta, la colocación de la misma para el maquinado, y retiro rápido en caso de emergencia.

Figura 3.2. ►
Sujeción de la herramienta a la flecha del servomotor y conexión con el circuito eléctrico por medio del tornillo prisionero..



Para llevar a cabo la sujeción de piezas de trabajo a maquinar en el centro de μ EDM se desarrolló una bancada interna al tanque de fluido dieléctrico y un conjunto pequeño de sujetadores, cuyo diseño se basó en que la fuerza ejercida por la herramienta sobre la pieza de trabajo es casi nula, hecho que reduce a una sola función requerida por estos elementos: mantener la pieza de trabajo en el mismo lugar mientras se le maquina, sin necesidad de presionarla fuertemente. Por la misma razón, los materiales empleados son blandos y de fácil manejo para su maquinado. En la figura 3.3 se muestra el sistema de sujeción de piezas de trabajo dentro del tanque de fluido dieléctrico. En la fotografía de la figura 3.3(c) el tornillo puesto en la pieza de trabajo tiene la función de brindar a ésta un punto de conexión con la fuente eléctrica.



▲ **Figura 3.3.** Sistema de sujeción para el centro de maquinado por μ EDM desarrollado en el GMM. (a) Vista explosiva. (b) Vista superior. (c) Fotografía del sistema de fijación de piezas de trabajo propuesto.

En la tabla 3.1 se hace un resumen de los elementos de este sistema con base a la numeración mostrada en la figura 3.3.

No.	Material	Descripción
1	Vidrio PYREX [®]	La temperatura del gas ionizado que conforma el canal de plasma formado por la electroerosión llega a ser mayor a los 8000°C [11,19], por lo tanto la temperatura del fluido dieléctrico se va incrementando conforme se maquina. El vidrio PYREX [®] tiene la propiedad de manejar temperaturas altas [12], además de no ser poroso y de fácil limpieza.
2	Aluminio	Placa con una matriz de barrenos pasados con cuerda interna. Es la parte inferior de la bancada y se fija permanentemente al fondo del tanque. Se usó metal como base para que las cuerdas no se dañaran fácilmente. Se eligió aluminio dada su resistencia a la oxidación y ligereza.
3	Acrílico	Es la parte superior de la bancada del sistema. Aísla eléctricamente a la pieza No. 2. y evita que ésta sea maquinada junto con la pieza de trabajo. Los barrenos son coincidentes entre la pieza 2 y 3.
4	Acrílico	Hay dos tipos: Una en forma de escuadra, y dos rectángulos con una ranura por el medio para ajustarlos a la pieza de trabajo y fijarlos con tornillos. Su función es mantener fija la posición de la pieza de trabajo sobre la bancada aprisionándola entre ellos.
5	Metal	Fijan fuertemente la posición de los sujetadores que aprisionan la pieza de trabajo.
6	Material de tipo conductor	Ver tabla A.1 en el Anexo I.

▲ **Tabla 3.1.** Descripción del sistema de sujeción de la pieza de trabajo en el centro de μ EDM desarrollado en el GMM.

La manufactura de estas herramientas de sujeción resultan sencillas dada la simplicidad de sus formas, además de la accesibilidad y facilidad de manufactura de la materia prima con las que fueron hechas. Este sistema de sujeción ha sido probado con éxito en las pruebas de maquinado del centro de μ EDM. Los planos de todas las piezas se encuentran en el Anexo II.

A continuación se expondrán algunas pruebas de manufactura que se hicieron con el fin de conocer experimentalmente la influencia de parámetros determinantes para la tasa de remoción en EDM utilizando un circuito sencillo de relajación RC (resistencia-capacitor).

3.2. Parámetros Determinantes para el Maquinado por Electroerosión

El acabado obtenido por EDM, en escala meso o micro, depende de varios factores críticos durante el maquinado. Algunos de ellos son: el tiempo de encendido de la fuente de energía por periodo, el tiempo de apagado para la estabilización del medio dieléctrico, la frecuencia de operación del sistema, el material de la herramienta, el material de la pieza de trabajo, el tipo de sustancias constitutivas del fluido dieléctrico, etcétera.

3.2.1. Tiempo de encendido de la fuente de energía

Del tiempo de encendido de la fuente de energía depende la cantidad de energía de maquinado, esta cantidad de energía se ve reflejada directamente en la cantidad de material calentado y fundido de la pieza de trabajo; y por último en el tamaño y forma del microcráter formado. Por lo tanto el tiempo de encendido de la fuente de energía, o bien, el tiempo de pulso del generador de chispas es determinante para el acabado superficial del maquinado por EDM.

3.2.2. Tiempo de apagado de la fuente de energía

El tiempo de apagado de la fuente de energía está relacionado con el tiempo que le toma al fluido dieléctrico recuperar sus cualidades normales después de haber sido

ionizado. Normalmente este tiempo es más largo que el tiempo de chispa, ya que además se espera que en tiempo de apagado los residuos recién desprendidos de la pieza de trabajo sean arrastrados por el mismo flujo contante del medio dieléctrico.

3.2.3. Frecuencia de maquinado

La frecuencia de maquinado influye directamente en la tasa de remoción del material de la pieza de trabajo. De acuerdo con el tiempo de encendido y apagado de la fuente de energía, la frecuencia de maquinado podría hacerse máxima siempre y cuando se tenga en consideración el calentamiento en los componentes electrónicos que un maquinado a alta frecuencia genera.

3.2.4. Material del electrodo o herramienta de trabajo

En principio cualquier material conductor puede ser apto para la fabricación de electrodos o herramientas, no obstante dependiendo de ciertas características propias de cada elemento, hará que este se comporte de diferente manera. Así se puede constatar que aquellos que poseen un punto de fusión más elevado y una resistividad menor son los más aptos [2]. Los materiales más comunes para las herramientas de EDM son cobre y grafitos en sus múltiples variedades. La temperatura de fusión del cobre es de 1050 [°C] mientras que el grafito no funde, pasa directamente a vapor por sublimación a una temperatura de 3350[°C]. En el proceso de electroerosión no sólo interviene en efecto térmico, sino que además existe una erosión mecánica debido a las implosiones de las burbujas generadas. Tomando en cuenta que el grafito está compuesto por gránulos aglomerados, cuanto más fino sea el tamaño de grano, más compacto será el material y por tanto mayor resistencia ofrecerá el desgaste. Si además, se considera que estos granos desprendidos del electrodo tienen que evacuarse a través del *GAP*, los granos de tamaño grande puede que sean superiores a dicho *GAP* y por tanto tendrán dificultades de evacuación creando condiciones de cortocircuito entre ambos electrodos [2].

3.2.5. Medio dieléctrico

Los fluidos dieléctricos específicamente desarrollados para el proceso de EDM son hidrocarburos altamente refinados o sintéticos. Existen innumerables características físicas y químicas que pueden ser usadas para definir e identificar el desempeño de cada fluido. Las características físico-químicas de los dieléctricos para EDM influyen de manera decisiva en el desempeño del proceso, tales características pueden ser resistencia dieléctrica, viscosidad, punto de ebullición y estabilidad a la oxidación [13]. El fluido dieléctrico tiene un papel fundamental en el proceso ya que fluye a fin de retirar el material removido de la pieza de trabajo, a la vez que enfría a esta última y a la herramienta, con ello se asegura una condición constante del espacio entre la herramienta y la pieza de trabajo (*GAP*). Esto ayuda a que el acabado del maquinado sea uniforme y controlable, a que la tasa de remoción de material (TRM) sea constante, además, previene la condición de descarga en forma de arco eléctrico debido a la ramificación del paso de la corriente eléctrica a través de partículas de material removido que se encuentran flotando en la vecindad del *GAP* durante el maquinado.

3.3. Procedimiento Experimental

Con el fin de conocer experimentalmente el efecto que tienen algunos de los parámetros de maquinado mencionados anteriormente sobre la TRM en el μ EDM; se realizaron una serie de experimentos intercambiando tres parámetros operacionales. Se intercambiaron el material de la herramienta por cobre y grafito; así mismo se intercambiaron el material de la pieza de trabajo por latón y aluminio. El último parámetro que se intercambió fue el fluido dieléctrico, para el que se probó queroseno, aceite lubricante de para máquina CNC y un fluido comercial para máquinas EDM. A los parámetros intercambiados, en el campo del diseño de experimentos, se les conoce como “Factores de Control” y a los cambios que pasan éstos durante los experimentos se les conoce como “Niveles”. En la tabla 3.2 se resumen los factores de control con sus respectivos niveles. En la tabla 3.3 se despliegan las combinaciones posibles surgidas a partir de los elementos de la tabla 3.2. Cada prueba se maquinó por 15 minutos. La forma de las herramientas empleadas fue redonda, con diámetro de 0.5 [mm] para todos los casos.

Factor de control	Nivel		
	0	1	2
A. Herramienta	Cobre	Grafito	----
B. Materia prima	Aluminio	Latón	----
C. Fluido dieléctrico	Dieléctrico Comercial	Aceite lubricante	Queroseno

▲ **Tabla 3.2.** Factores de control y sus niveles para el experimento.

No.	Experimentos				
	A	B	C		
1	Cobre	Aluminio	0	Dieléctrico Comercial	0
2			0	Aceite	1
3			0	Queroseno	2
4		Latón	1	Dieléctrico Comercial	0
5			1	Aceite	1
6			1	Queroseno	2
7	Grafito	Aluminio	1	Dieléctrico Comercial	0
8			1	Aceite	1
9			1	Queroseno	2
10		Latón	1	Dieléctrico Comercial	0
11			1	Aceite	1
12			1	Queroseno	2

▲ **Tabla 3.3. Combinación de parámetros.**

Combinación de los diferentes factores de control y sus respectivos niveles.

3.4. Arreglo de Sistema EDM con Circuito de Relajación RC

El sistema empleado para desarrollar estas pruebas consiste de un circuito de relajación RC [14], que tiene como principal objetivo brindar impulsos de corriente de energía suficiente para sobrepasar el campo eléctrico de ruptura del fluido dieléctrico. Este circuito se polariza con una fuente de 30 [V_{DC}]. El valor equivalente de las resistencias es de aproximadamente 10 [Ω], el valor nominal del capacitor es de 20 [μF], lo que en teóricamente implica que la constante de tiempo de carga τ [s] de este circuito sea de:

$$\tau = RC \text{ [s]} \quad \dots \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde la frecuencia de maquinado teórica es:

$$F_m = \frac{1}{T} \text{ [Hz]} \quad \dots \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Sustituyendo valores:

$$F_m = \frac{1}{10 \cdot 20 \times 10^{-6}} = 5 \text{ [kHz]}$$

La energía teórica de maquinado por descarga se calcula con la ecuación 3.3:

$$E_{cap} = \frac{C \cdot V_{cap}^2}{2} \text{ [J]} \quad \dots \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Sustituyendo valores:

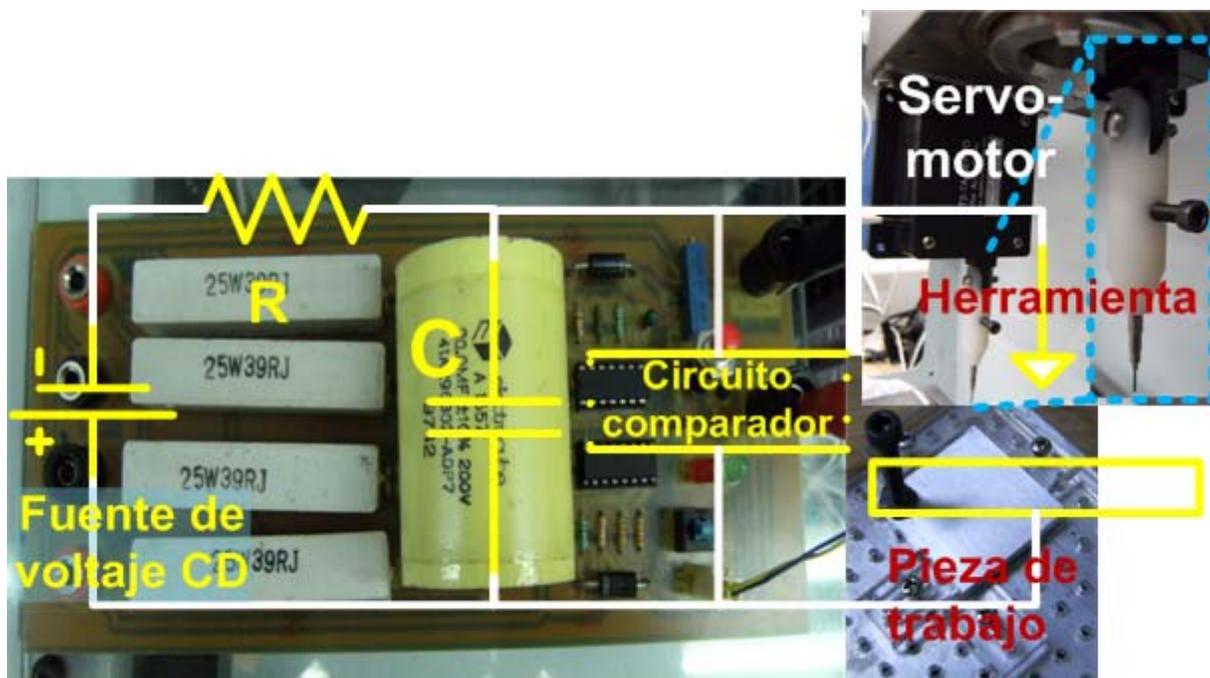
$$E_{cap} = \frac{20 \times 10^{-6} \cdot (30)^2}{2} = 9 \text{ [mJ]}$$

Donde:

C: Valor capacitivo [F]

V_{cap}: Voltaje en el capacitor [V]

La implementación de este sistema se muestra en la figura 3.4.



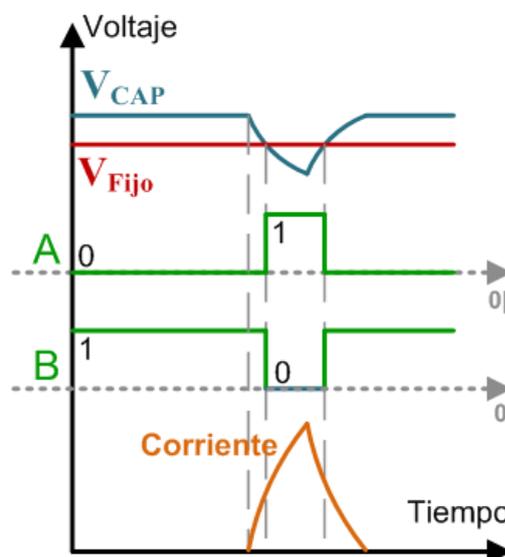
▲ **Figura 3.4.** Arreglo de sistema μ EDM con circuito de relajación.

3.5. Posicionamiento de la Herramienta

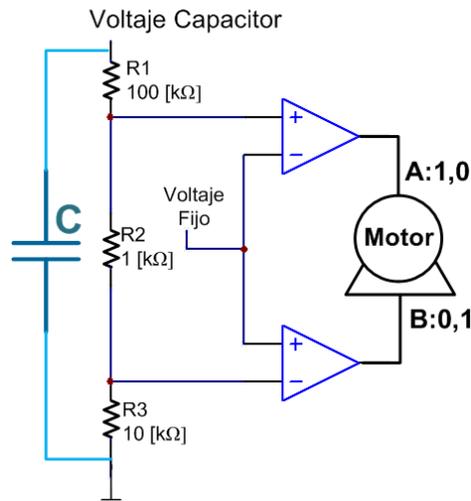
Si bien la herramienta del sistema de μ EDM propuesto está acoplado al árbol de la máquina CNC, no es viable utilizar el avance automático del eje Z de esta máquina ya que la tasa de remoción de material no es conocida y, por lo tanto, tampoco lo es dato de avance de herramienta. Con el fin de llevar un maquinado autónomo y continuo de la máquina CNC y continuo en función del material removido, se implementó un circuito de control de posición de la herramienta. Este sistema se basa en el monitoreo del valor del voltaje en el capacitor (V_{CAP} = voltaje de GAP) que, en el momento de ocurrir una descarga eléctrica, disminuye en función a la corriente que viaja entre ambos electrodos. El valor V_{CAP} es comparado contra un voltaje fijo (V_{Fijo}) cercano por debajo al primero, de esta manera en cuanto V_{CAP} disminuye las señales A y B dirigen a la herramienta en sentido opuesto, ver figura 3.5. El valor de V_{Fijo} se arregla por medio de un divisor de voltaje variable alimentado por una fuente de voltaje constante e independiente de V_{CAP} . El circuito comparador se muestra en la figura 3.6. En la tabla 3.4 se muestra la acción que toma el control sobre la herramienta dada la condición en el GAP; se “baja” la herramienta si ésta se encuentra aún lejos de la pieza de trabajo y, por lo tanto, la condición es circuito abierto. Por otro lado, se “sube” a la herramienta cuando está lo suficientemente cerca para producir cualquiera de las otras tres condiciones.

Condición en el GAP	Motor		Sentido Herramienta
	A	B	
Circuito Abierto	0	1	Baja
Chispa	1	0	Sube
Arco	1	0	Sube
Corto Circuito	1	0	Sube

▲ **Tabla 3.4.** Acciones de control de la posición de la herramienta.



◀ **Figura 3.5.** Señales del sistema de control de posición.

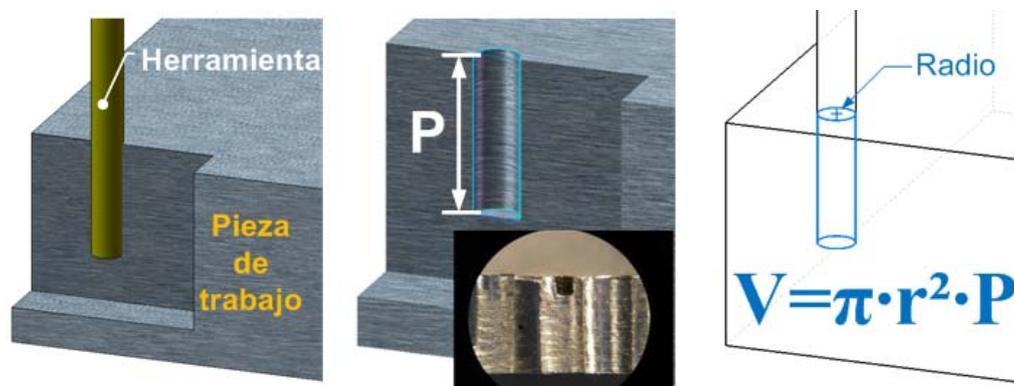


▲ **Figura 3.6.** Circuito monitor del estado del GAP.

Un pormenor de este diseño es que si cambia el valor del voltaje de la fuente de CD que polariza al capacitor, el voltaje fijo de referencia debe reajustarse al nuevo valor.

3.6. Resultados de la serie de experimentos

Los resultados de esta serie de experimentos se enfocan a la medición del material removido de la pieza de trabajo en cada experimento, a comparar todas las pruebas entre sí para, finalmente, determinar qué combinación resulta óptima para obtener la mayor TRM dentro del marco del conjunto de experimentos propuestos. Las mediciones del material removido se obtuvieron en función de la profundidad alcanzada en cada maquinado, aproximando la forma del maquinado a un cilindro perfecto cuyo radio corresponde al de la herramienta. En la figura 3.7 se muestra una fotografía de un maquinado obtenido por alguno de los experimentos de la tabla 3.2.



▲ **Figura 3.7.** Aproximación para medir el volumen desplazado por los maquinados de cada experimento. P: Profundidad de corte.

En la tabla 3.5 se concentran los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos realizados, con esto también se resumen los efectos del intercambio de parámetros de operación determinantes en el μ EDM.

No. Exp	Fluido Dieléctrico	Materia Prima	Electrodo	Tasa de Remoción de Material [mm^3/s]
6	Queroseno	Latón	Cobre	0.7841
5	Aceite	Latón	Cobre	0.7235
10	Comercial	Latón	Grafito	0.6679
9	Queroseno	Aluminio	Grafito	0.1820
1	Comercial	Aluminio	Cobre	0.1136
2	Aceite	Aluminio	Cobre	91.41×10^{-3}
7	Comercial	Aluminio	Grafito	62.47×10^{-3}
8	Aceite	Aluminio	Grafito	19.63×10^{-3}
3	Queroseno	Aluminio	Cobre	13.22×10^{-3}
11	Aceite	Latón	Grafito	10.45×10^{-3}
12	Queroseno	Latón	Grafito	8.37×10^{-3}
4	Comercial	Latón	Cobre	1.63×10^{-3}

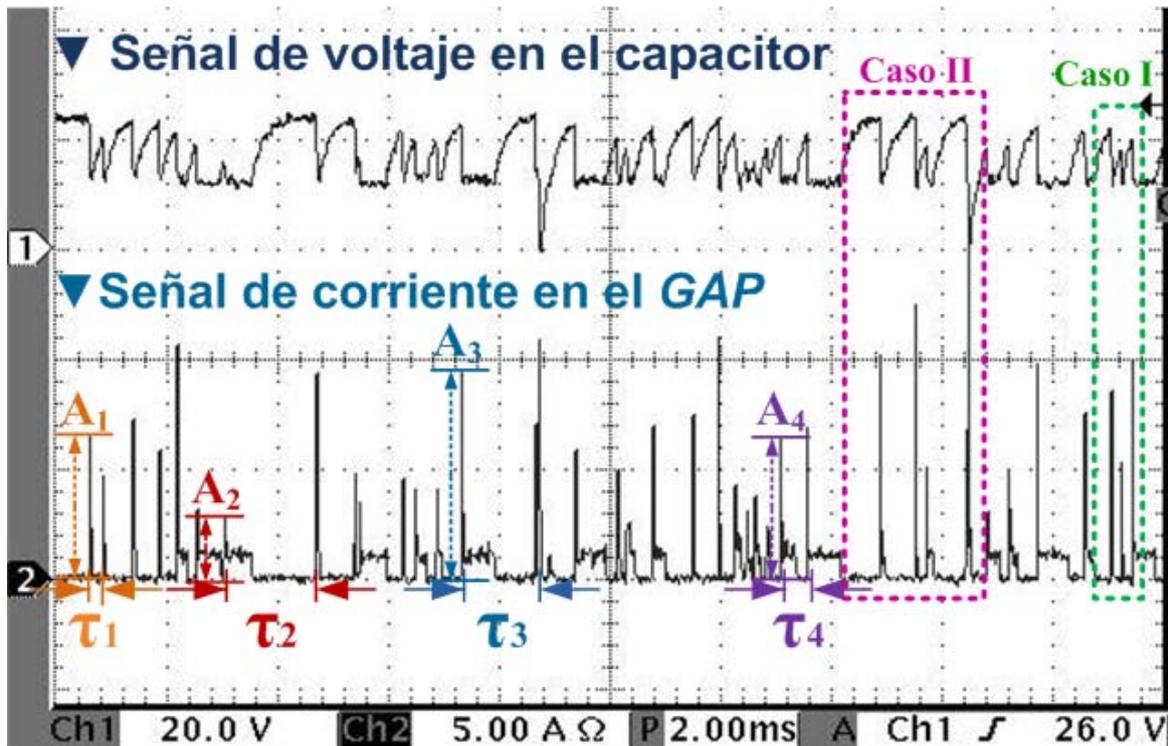
▲ **Tabla 3.5. Resultado de los experimentos.** Orden de descendente en cuanto a tasa de remoción de material de la pieza de trabajo.

3.7. Análisis y Conclusión sobre los Resultados

Una información obtenida del experimento respecto al sistema de generación de chispa por el circuito de relajación RC fue:

- 1) Inconstancia del periodo de tiempo entre la ocurrencia de las descargas, por lo que no pude señalarse frecuencia alguna de maquinado ($\tau_1 \neq \tau_2 \neq \tau_3 \neq \tau_4 \neq \dots \tau_n$).
- 2) Energía de maquinado no uniforme ($A_1 \neq A_2 \neq A_3 \neq A_4 \neq \dots A_n$)

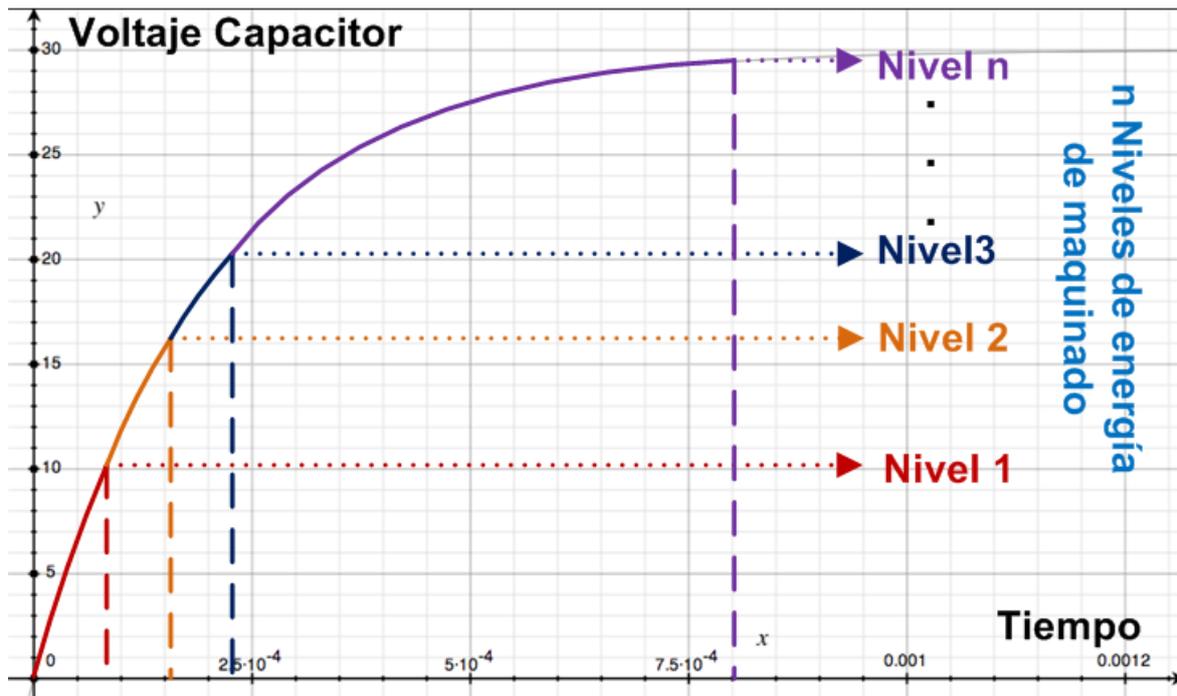
En la figura 3.8 se observan las señales obtenidas en el experimento No. 6, cuando se utilizó un electrodo de cobre, una pieza de trabajo de latón, inmersos en queroseno:



▲ **Figura 3.8.** Señales de voltaje (con referencia en ①) y corriente (con referencia en ②) obtenidas del maquinado del experimento No. 6.

Esta inconstancia de periodo y energía de maquinado se debe a que la energía requerida para ionizar el medio dieléctrico puede ser menor a la energía que almacena el capacitor después de un tiempo τ , por lo tanto las chispas pueden generarse aleatoriamente antes de que este tiempo trascorra (caso I de la figura 3.8). También puede ocurrir que la energía almacenada en el capacitor ya sea la máxima acumulable y aun así no ocurra chispa (caso II de la figura 3.8). Todo depende de la condición del medio dieléctrico, aunado a que la energía para ionizar el GAP va cambiando con el tiempo de acuerdo con la ecuación de carga de un capacitor, ecuación 3.4, cuya gráfica se muestra en la figura 3.9 donde se hace explícito el caso I:

$$V_{\text{cap}} = V_{\text{DC}} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) [\text{V}] \quad \dots \quad (\text{Ec. 3.4})$$



▲ **Figura 3.9.** Gráfica de voltaje en el capacitor, voltaje "visto" por el GAP.

Visto de otra manera, el voltaje en el *GAP* es variable y por lo tanto el comportamiento de las descargas también lo es. Esto se refleja directamente en un acabado poco uniforme de maquinado, ya que cada microcráter es de diámetro y profundidad proporcional a la energía de la chispa por la que fue formado [3]. Hoy en día las fuentes de tipo RC de éstas siguen siendo de extensa aplicación en EDM, debido a su gran facilidad de implementación y bajo costo. Además de que la energía promedio proporcionada por este tipo de circuitos se puede manejar por el simple hecho de cambiar el valor capacitivo del mismo. Sin embargo con el fin de lograr acabados más uniformes, mayores rangos de frecuencia de maquinado, y sobretodo, mejor eficiencia en EDM y μ EDM se han propuesto diversas soluciones, tales como las que se plantean a continuación.

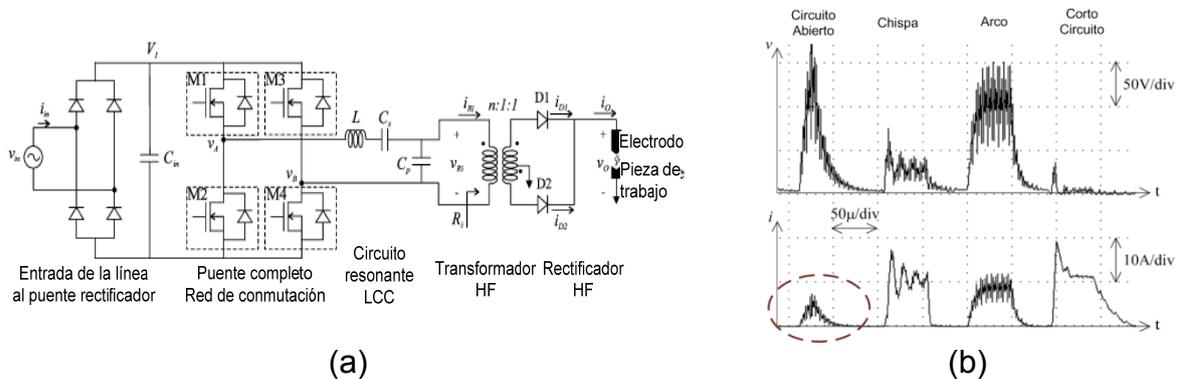
3.8. Investigación de Fuentes Eléctricas para Aplicaciones a EDM

Se eligieron cinco artículos para analizar [15,16,17,19 y 20], con el fin de tener mayores fundamentos para realizar una propuesta propia como parte principal de los alcances planteados por esta tesis. El orden en que irán presentando los resúmenes de los artículos será con base a las fechas de publicación de los

mismos, del más antiguo al más reciente. Estas cinco propuestas datan del año 2001 al 2007.

3.8.1. Inversor resonante con red LCC (Año: 2001)

El diagrama esquemático de esta propuesta se muestra en la figura 3.10(a), ésta se basa en un convertidor de puente completo resonante cuya carga es una red LCC (bobina-capacitor-capacitor). El puente completo constituido por los cuatro MOSFET M_1, \dots, M_4 oscila a la frecuencia de resonancia de la red LCC, de manera que el circuito se convierte en una fuente de corriente apta para EDM. Se tiene un acoplamiento por medio de un transformador 1:1 para evitar daños al circuito de control en caso de corto circuito o arco eléctrico [15]. En la condición de circuito abierto, cuando no se manifiesta descarga eléctrica alguna, este circuito parece consumir una cantidad considerable de corriente, cerca de 8 [A]. Esto se muestra en la figura 3.10(b). Esta característica la hace poco eficiente, además del gran número de componentes que la conforman, se debe considerar un dispositivo *driver* para cada MOSFET y los elementos activos responsables de mandarles pulsos de conmutación. Sin mencionar todos los elementos necesarios para el control de posición de la herramienta.



▲ **Figura 3.10. Fuente resonante LCC.** (a) Esquema del circuito eléctrico. (b) Pulsos EDM obtenidos experimentalmente.

En la figura 3.11 se muestra una fotografía de los resultados obtenidos por la propuesta hechas por R. Casanueva.

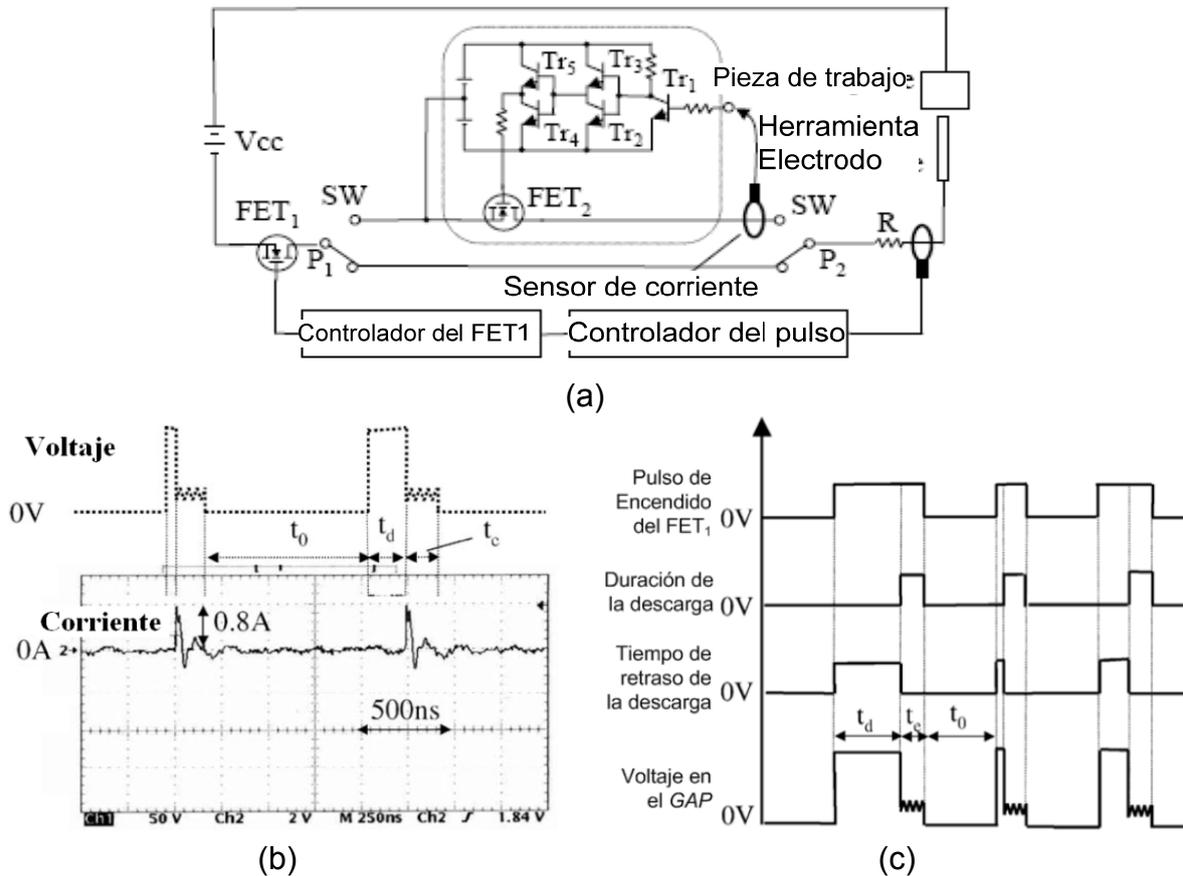


Resultados de cortes: (a) Esmeril (b) MDM (*Metal Desintegration Machining*) (c) EDM (Sistema propuesto)

▲ **Figura 3.11.** Fotografías comparativas de los cortes obtenidos con otros sistemas de corte y el sistema propuesto por R. Casanueva [15].

3.8.2. Generador de isopulsos con transistores (Año: 2003)

Es importante puntualizar que esta fuente está diseñada para procesos de μ EDM y es de gran interés para el desarrollo de la propuesta del presente trabajo de tesis. Esta fuente trabaja con pulsos de tipo isoenergético, generando cráteres de diámetro y volumen similar entre sí, dando un acabado fino y poco rugoso, requerido en maquinados por μ EDM [5]. El circuito de esta fuente se muestra en la figura 3.12 (a). Se pueden configurar dos modos, acabado semirrugoso y acabado fino. Para el primero, el dispositivo FET_1 (*Field Effect Transistor*, transistor de efecto de campo) activa y cesa el paso de corriente, trabajando en modo isofrecuencial. Para acabado fino, se utiliza el circuito dentro del cuadro de línea punteada, su función es detectar el inicio de una descarga para interrumpirla casi inmediatamente por medio del FET_2 , de esta forma las chispas tienen la misma duración y amplitud en todos los casos, logrando pulsos isoenergéticos. El valor de la corriente de los pulsos depende directamente del tiempo de reacción de los dispositivos sensores e interruptores que detienen el paso de corriente. Ver figura 3.12 (b) y (c) [16].



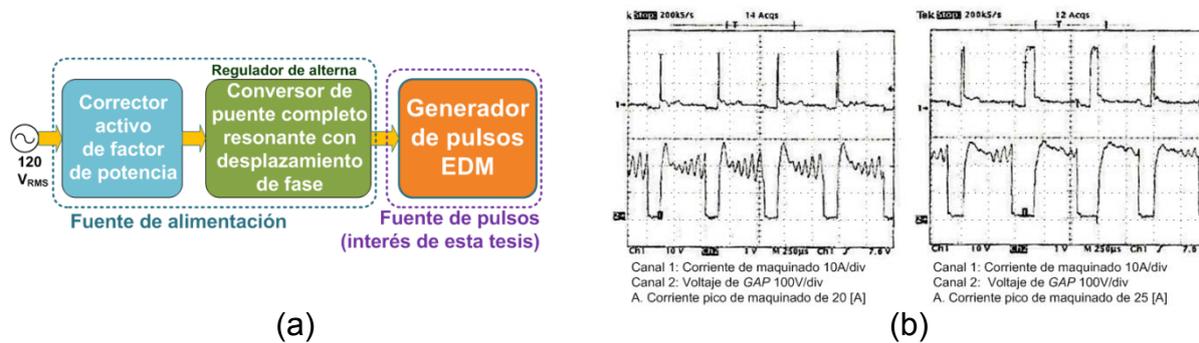
▲ **Figura 3.12.** Generador de isopulsos con transistores TBJ y FET.

Cabe señalar que la detección de inicio de chispa se logra mediante sensores de corriente ultrarrápidos, cuyo principio de funcionamiento es el Efecto Hall, su tiempo de reacción debe ser del orden de unos cuantos nanosegundos. Comercialmente este tipo de sensores no son de fácil acceso.

3.8.3. Fuente de alta eficiencia para EDM (Año: 2005)

Sus aplicaciones son a la escala convencional, y su concepto de alta eficiencia se refiere al proceso de acondicionamiento de la fuente de alimentación primaria hacia el generador de pulsos EDM. Consiste de un bloque corrector de potencia, que balancea la carga para mejorar la eficiencia. Se tiene también un circuito convertidor resonante con el fin de controlar la cantidad de corriente de maquinado, como el que se planteó en el punto 3.8.1, la diferencia es el bloque “Generador de pulsos EDM” de la figura 3.13(a), que consiste de un solo dispositivo MOSFET en configuración de interruptor, permite el paso de corriente en función a pulsos dirigidos por el

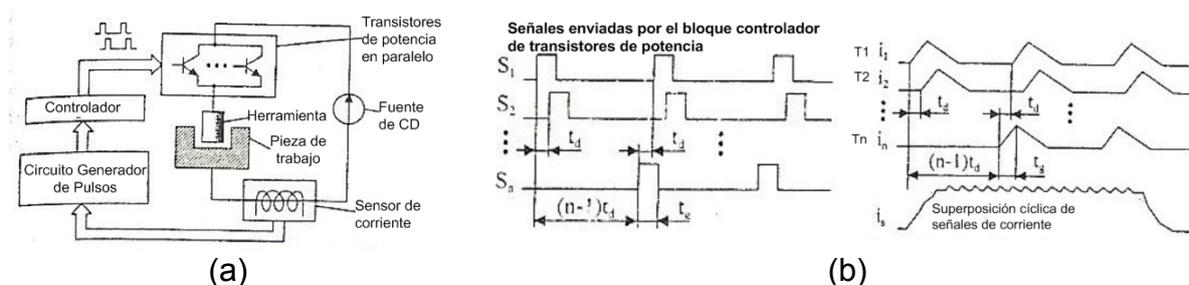
usuario [17]. En la figura 3.13(b) se muestran las formas de onda de las señales de voltaje y corriente de maquinado con corrientes de 20 y 25 [A].



▲ **Figura 3.13. Fuente de alta eficiencia para EDM.** (a) Diagrama a bloques de la fuente. (b) Señales de onda generadas en el GAP.

3.8.4. Chopper de superposición cíclica para EDM (Año: 2006)

El concepto en el que se basa el principio de funcionamiento de esta fuente, mostrada en la figura 3.14(a), es generar una señal de corriente creada por trozos, superponiendo las señales generadas por diferentes transistores que van activándose uno por uno consecutivamente, como muestran los pulsos de la figura 3.14(b) y sus respectivas señales de salida de corriente [18].

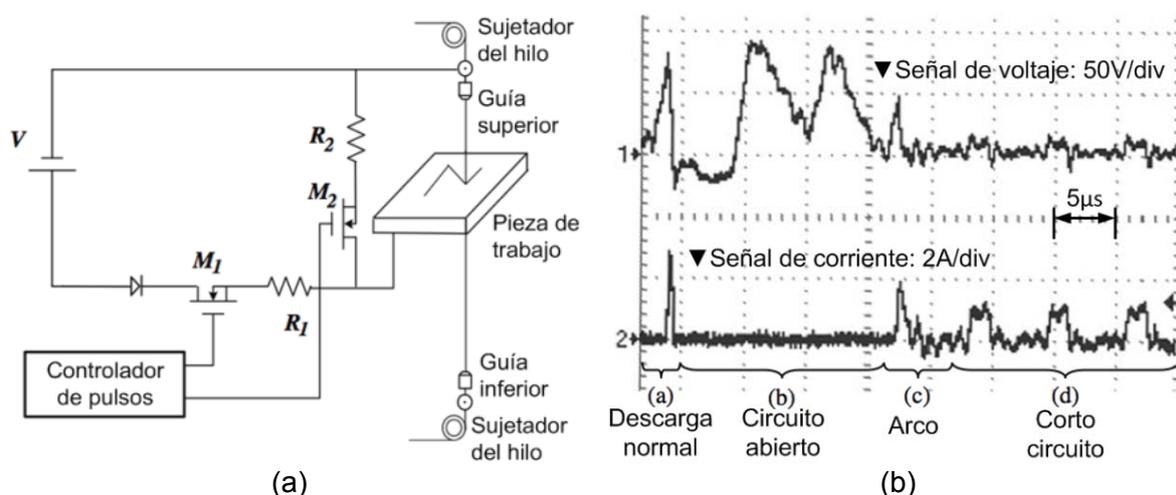


▲ **Figura 3.14. Fuente de superposición cíclica de señales de corriente.** (a) Diagrama a bloques de la fuente. (b) Señales de control y de corriente de salida del sistema.

El uso de esta fuente es aplicada a la escala meso; difícilmente, bajo el mismo esquema, podría ser utilizada en la escala de micromanufactura debido a que la energía brindada por el paso **transitorio** de corriente un solo transistor es suficiente para obtener micromaquinado.

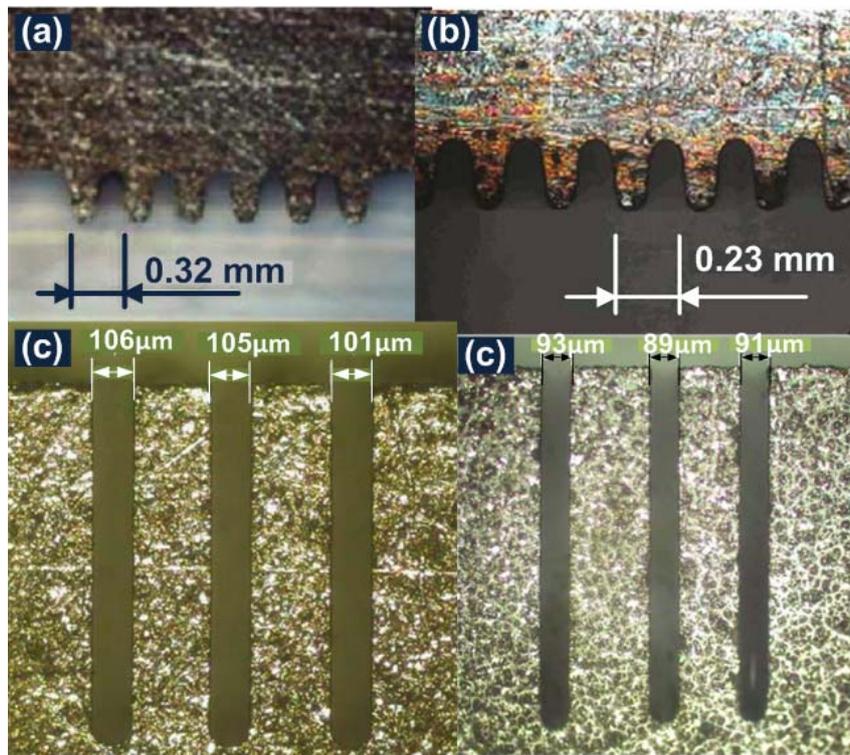
3.8.5. Fuente para μ WEDM (Microwire EDM, Año: 2007)

El diagrama de la figura 3.15(a) muestra dos dispositivos MOSFET, M_1 y M_2 , ambos funcionan como interruptores y sus señales de control son complementarias. Cuando M_1 es encendido se conecta la fuente de voltaje a una resistencia limitadora de corriente (R_1), a un diodo y con los electrodos (hilo y pieza de trabajo), de manera que eventualmente ocurrirá una descarga eléctrica entre éstos últimos. Cuando M_1 se apaga, M_2 se enciende para disipar la energía excesiva almacenada en el *GAP* a través de la resistencia R_2 con el fin de evitar inestabilidad de la descarga, así como, proteger al circuito controlador de pulsos de interferencia eléctrica y electromagnética [20]. El número bajo de elementos y dispositivos que, idealmente, componen este sistema podría representar una ventaja en su desarrollo. Sin embargo, el uso de resistencias limitadoras de corriente resulta en una solución poco eficiente para mantener baja la energía de maquinado. Además, dada la potencia disipada y el tiempo de maquinado, se debe considerar la caída del valor resistivo de estos elementos debido a calentamiento producido por efecto Joule, que puede llegar peligrosamente a ser un valor tan bajo que represente mayor consumo de potencia o incluso, en el peor de los casos, corto circuito en el sistema. La figura 3.15(b) muestra las señales del *GAP* [20].



▲ **Figura 3.15. Fuente de μ WEDM.**
 (a) Diagrama eléctrico. (b) Señales en el *GAP*.

En la figura 3.16 se muestran algunos de los maquinados obtenidos con esta propuesta de sistema de generación de chispa.



▲ **Figura 3.16.** Maquinados por μ WEDM. Microdientes y microrendijas maquinados con alambre de cobre de (a,c) $\varnothing 70\mu\text{m}$ y (b,d) $\varnothing 50\mu\text{m}$.

3.9. Resumen de las Característica de las Fuentes Analizadas

Hasta este punto, esta tesis se han resumido cinco casos de estudio de fuentes aplicadas al proceso EDM tanto en escala convencional y microescala. De éstas se ha hecho una tabla donde se resumen sus características eléctricas (tabla 5.1), se ha discutido sobre los elementos que las conforman y se han descrito brevemente sus principios de funcionamiento. Cuatro de las cinco propuestas analizadas se basan en el uso de transistores como interruptores directos del paso de corriente en el *GAP*. Lo que indica fuertemente que la tendencia tecnológica de las fuentes eléctricas aplicadas a la electroerosión es controlar el paso de corriente por medio de transistores que, a diferencia de las fuentes RC, permiten que el voltaje visto por el *GAP* sea constante. Restando al diseño, de la fuente propuesta por este trabajo de tesis, el problema de considerar un voltaje de ionización variable. La fuente de R. Casanueva utiliza transistores como parte del puente completo que requiere un

inversor resonante, sin embargo la función de éstos no es controlar el paso de corriente por el GAP. En la tabla 3.5 se resumen las características de interés de cada una de las fuentes tratadas en este capítulo.

Autor ▶	Casanueva, Rosario. España, 2001	Fuzhu Han. Shinya Wachi. China, Japón, 2003	Y.K. Wang. B.Y. Song. China, 2005	S.C. Di. Wei, G. X. China, 2006.	Mu-Tian Yan, Tsung-Liang Chiang. Taiwan, 2007.
Fuente▶	Inversor Resonante con Red LCC	Generador de isopulsos con transistores	Fuente de alta eficiencia para EDM	Chopper de superposición cíclica ahorrador para EDM	Diseño y estudio experimental de una fuente para μ WEDM
▼Características					
Voltaje de entrada	280 V	100-120 V	250 V AC	120 V	110 V
Voltaje de salida	34 V _{RMS}	----	250 V DC	120 V	25 V
Corriente pico	15 A	0.6 – 1.2 A	30 A	26 A	3-4 A
Corriente promedio	10.5 A _{RMS}	█	20 A	20 A	3A pico
Potencia	300 W	----	248 – 1090 W	█	█
Frecuencia de trabajo	10 KHz	800 kHz	2 kHz (100KHz en el puente)	█	90-185 kHz
Duración de descarga	----	30 ns	400 μ s ON - 100 μ s OFF	52 μ s ON - 409 μ s OFF	0.7 μ s ON – 6 μ s OFF
Número de Componentes	Fuente AC	Fuente DC	Circuito corrector de factor de potencia (APFC*)	Fuente de CD	Fuente CD
	Puente Diodos Capacitor	2 sensores corriente	Circuito Conversor resonante de puente completo basado en lazo cerrado de control de corriente	Arreglo paralelo de transistores TBJ	2 MOSFET Respectivos drivers
	Puente Inversor MOSFET	Circuito supresor de pico de corriente		Driver para el A-TBJ	2 Resistencias limitadoras de corriente
	Filtro LCC	2 MOSFET (y sus drivers)		Generador de pulsos para el driver	Circuito controlador de pulsos
	Transformador 1:1		Circuito de control de pulso	Circuito detector de corriente (de efecto Hall)	
	Diodos			Circuito generador de pulsos.	
Componentes inductivos	Filtro LCC Transformador	Ninguno	En el APFC* En el convertidor	Ninguno	Ninguno
¿Bobina en serie con GAP?	Sí	NO	NO	NO	NO
Protección contra corto circuito	Inherente al circuito	Inherente al circuito	Sí, incluso en condición de corto circuito.	No	Snubber
Eficiencia	Alta	Alta	70%	Alta	Pobre
Factor de potencia	No indicado	No indicado	0.95	█	█
Escala de Aplicación	EDM	μ EDM	EDM	EDM	μ EDM
Estimación cualitativa del tam. la máquina	Pequeña y ligera. Portable.	█	█	█	Muy grande debido a las resistencias de potencia
Dieléctrico utilizado	Agua corriente	█	█	Queroseno	█
Herramienta	█	█	█	Cobre Ø2mm	█
Pieza de trabajo	█	█	█	Acero	█
CARACTERÍSTICA DE INTERÉS PARA EL PRESENTE TRABAJO DE TESIS	Uso de diodos en serie con el GAP para mantener descargas unipolares.	Aplicaciones a μ EDM.	Generación de pulsos mediante transistor.	Uso de transistores para el paso directo de corriente en el GAP.	Uso de transistores para el paso directo de corriente en el GAP.
		Bajo número de componentes.			Implementación de un elemento amortiguador que disipe energía extra almacenada en el GAP.
		Uso de transistores para el paso directo de corriente en el GAP.		Detección de inicio de chispa.	
Generación de pulsos isofrecuenciales e isoenergéticos.					

*APFC: Active Power Factor Corrector. Corrector activo de factor de potencia.
 █: No especifica.

▲ Tabla 3.5. Características de fuentes recientes 2001 a 2007.

En el siguiente capítulo se establece el desarrollo del proyecto del presente trabajo de tesis.



Capítulo 4

Desarrollo del Sistema Propuesto

4.1. Requerimientos del sistema

Con el objetivo de implementar un sistema para la generación de chispas para procesos de micromanufactura por electroerosión (μ EDM); se consideran los requerimientos y las especificaciones siguientes:

1. Energía de maquinado a niveles adecuados para μ EDM: **Energía de la descarga menor a 100 [μ J] [21,22].**
2. Tiempo para detectar inicio de chispa en el GAP: **Tiempo para detectar y apagar la fuente de energía menor a 350 [ns].**
3. Sistema de posicionamiento de la herramienta: **Evitar que el sistema permanezca en una condición de corto circuito.**

4.2. Uso de transistores para el control de corriente en el GAP

Existen básicamente dos tipos de transistores:

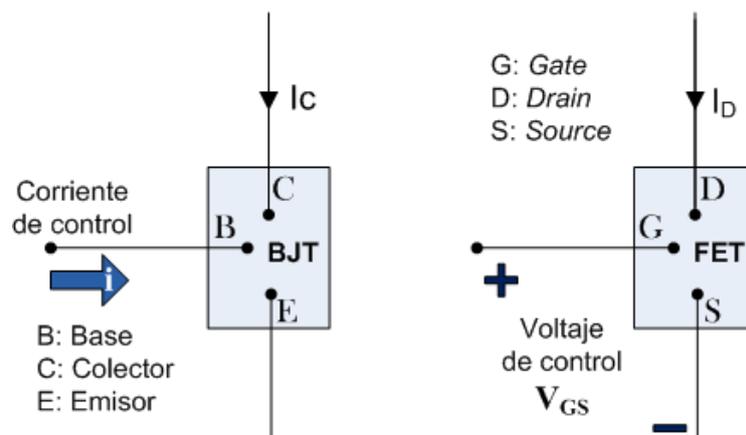
- 1) Transistor de juntura bipolar (BJT de *Bipolar Junction Transistor*), y sus variantes. Este dispositivo es conceptualmente una fuente de corriente controlada por corriente [23].

Algunas variantes: IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*, Transistor Bipolar de Compuerta Aislada), transistor Darlington.

2) Transistor de efecto de campo (FET de *Field Effect Transistor*), y sus variantes. Este dispositivo es conceptualmente una fuente de corriente controlada por voltaje [23].

Algunas variantes: MOSFET (Metal-Oxide Field Effect Transistor), VMOS (*V-Shaped MOS*), MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor).

En la figura 4.1 se muestra el diagrama conceptual de ambos.



▲ **Figura 4.1.** Diagrama conceptual de los transistores BJT y FET.

Algunas propiedades que marcan diferencia entre ellos [23]:

- El dispositivo FET tiene de 100 hasta varios cientos de MOhm como impedancia de entrada.
- El BJT es mucho más sensible a la señal de entrada (corriente de base).
- El BJT es más sensible a cambios de temperatura.
- El FET y MOSFET tienen gran estabilidad térmica.
- Una limitación del BJT se asocia con la conducción de electrones y huecos, la presencia de los últimos y su inherente baja movilidad se traduce en mayores tiempos de conmutación y, en consecuencia, menor ancho de banda así como mayores pérdidas de potencia por conmutación.

Por lo anterior, se propone usar un dispositivo FET, de variante MOSFET ya que representa un paso delante de su antecesor. La frecuencia mínima de conmutación que debe soportar es, como propuesta de este trabajo, 10 [kHz], la corriente mínima I_D deberá ser de 20 [A] y el voltaje mínimo de 100 [V]. Los valores propuestos están por encima de los requeridos para micromaquinado, sin embargo se consideran

ciertos factores de riesgo altos ya que, experimentalmente, se conoce que la magnitud de las espigas de corriente puede alcanzar hasta 20 ó 30 [A].

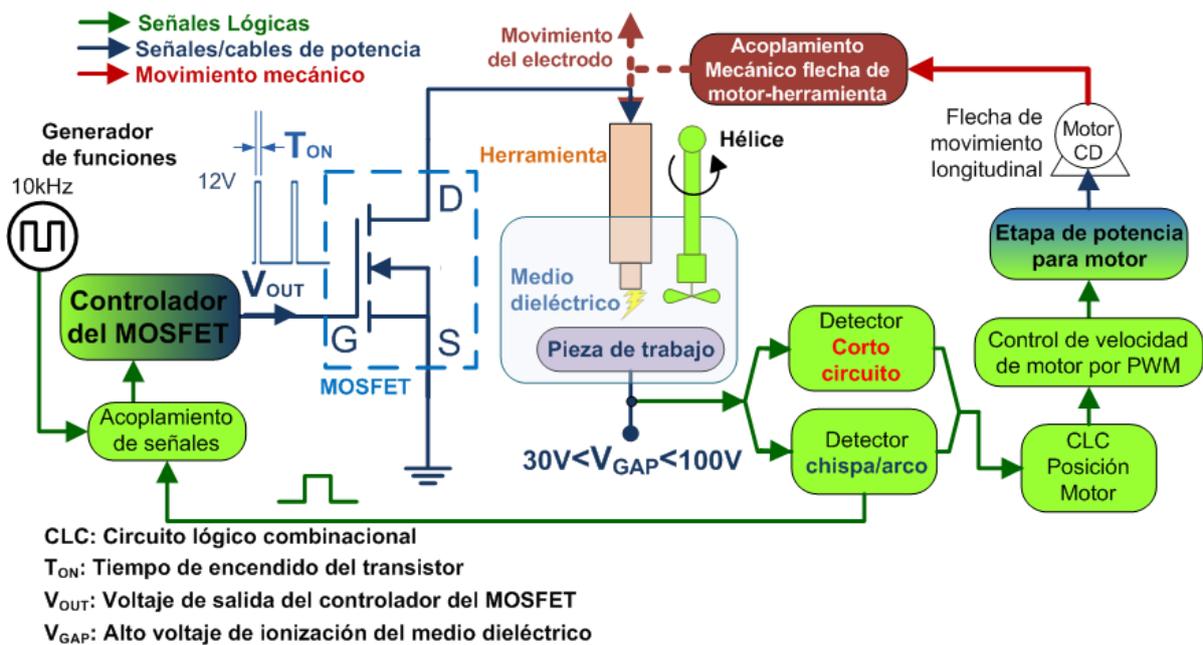
La posibilidad de generar pulsos isofrecuenciales e isoenergéticos es consecuencia directa del uso de transistores como interruptores del paso de corriente en el GAP. La amplitud de los pulsos isoenergéticos dependerá directamente de los tiempos de reacción y respuesta de los dispositivos empleados para detectar el inicio de chispa en el GAP.

4.3. Sistema de Generación de Pulsos para μ EDM Propuesto

El diagrama a bloques del sistema propuesto se muestra en la fig. 4.2. Las flechas y bloques indican según sus colores lo señalado en la tabla 4.1:

Color	Flecha	Bloque
Verde	Flujo de señales de niveles lógicos, de 0 a 5V	Circuitos integrados, o conjuntos de ellos, de para manejo de señales lógicas
Verde/Azul	Flujo de señales de niveles de 12[V] o mayor	Circuitos integrados encargados de dirigir señales de potencia a partir de señales lógicas
Marrón	Movimiento mecánico	Elementos mecánicos

▲ **Tabla 4.1.** Indicación de las flechas y bloques según su color.



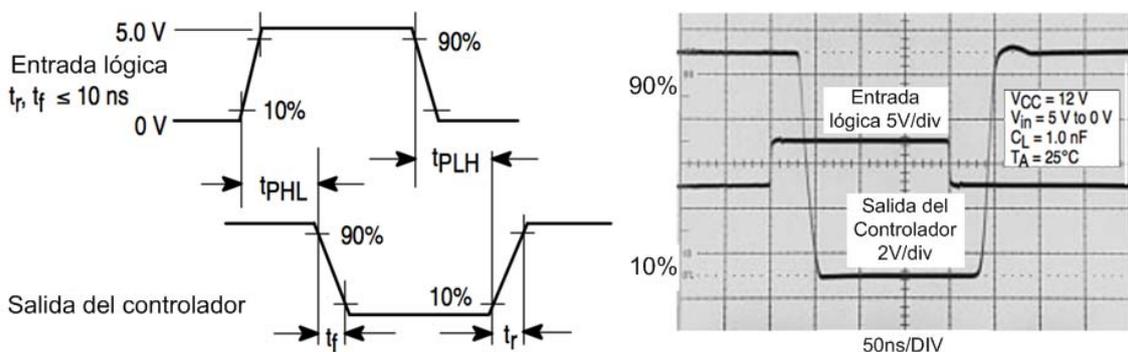
▲ **Figura 4.2.** Diagrama a bloques del sistema de μ EDM propuesto.

Para explicar el diagrama a bloques del sistema propuesto en este trabajo de tesis se hará una división por subsistemas, los que son:

- Controlador del MOSFET.
- Detector de corto circuito y detector de chispa/arco.
- Control de posición de la herramienta mediante un circuito lógico combinacional, circuito PWM (*Pulse-Width Modulation*, o bien, modulación por ancho de pulso) y su etapa de potencia correspondiente.
- Acoplamiento de señales.
- Flujo del medio dieléctrico.

4.3.1. Controlador del MOSFET

La elección del circuito integrado estuvo en función de los tiempos de respuesta y propagación que éste ofreciera. Se tuvo inmediato acceso a la compra del controlador de alta velocidad MC34151, cuyas señales lógicas de entrada y las señales de salida se muestran en la figura 4.3.



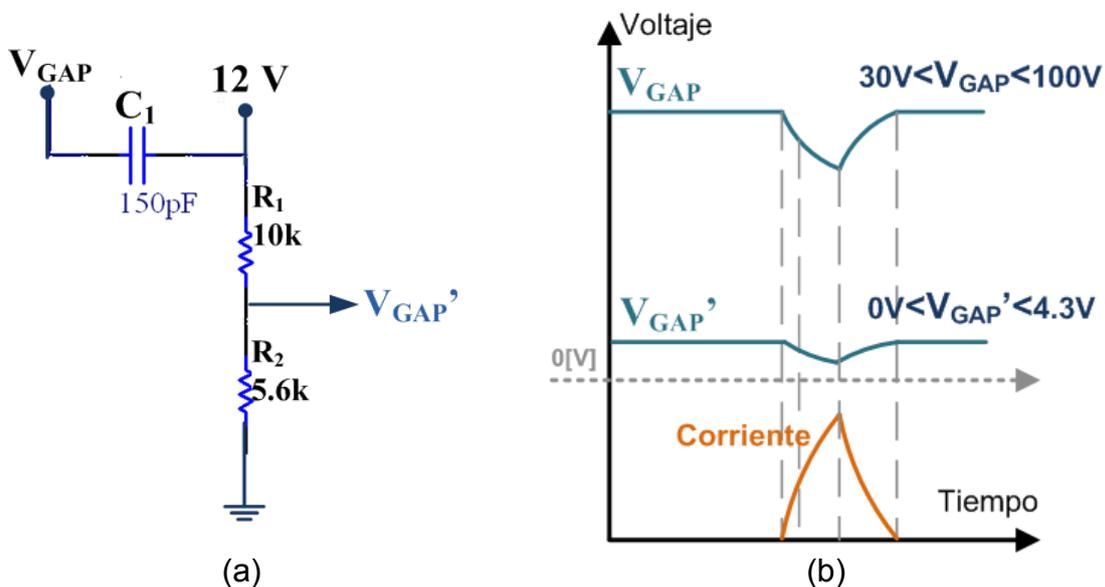
▲ **Figura 4.3.** Tiempos de respuesta y propagación del circuito MC34151 controlador de MOSFET propuesto.

El tiempo de propagación se refiere al tiempo que le toma a una señal lógica de entrada salir del dispositivo controlador a un nivel adecuado, en este caso 12 [V]. La lógica del MC34152 es negada, por lo tanto éste, al recibir un flanco de subida, ejecutará un flanco de bajada como respuesta. Es por ello que se define t_{PHL} como el tiempo de propagación de la señal de entrada para pasar de un estado alto a un estado bajo a la salida, y a t_{PLH} como el caso contrario. El tiempo de subida de la señal de salida, t_r (*rise time*), es el tiempo que le toma a la señal en valor bajo ir del 10% hasta el 90% del su valor alto. El tiempo t_f (*fall time*) es el caso contrario,

cuando la señal va de un valor alto a bajo. En el caso particular del dispositivo elegido, estos tiempos son $t_{PHL} \approx t_{PLH} = 35[\text{ns}]$, $t_r = 14[\text{ns}]$ y $t_f = 16[\text{ns}]$. Estos datos son importantes, se retomarán cuando se llegue al punto de acoplamiento de señales.

4.3.2. Detector de corto circuito y detector de chispa/arco

Tomando como base el circuito de monitoreo del estado del GAP presentado en el Capítulo 3 del presente trabajo de tesis, se diseñó un circuito utilizando comparadores de voltaje, que realiza la misma tarea pero con la característica de prescindir del nivel de V_{GAP} , pero no de sus perturbaciones cuando se genera chispa. Esto se logró mediante un acoplamiento de CD/CD que consiste de un filtro pasivo pasa altas al que se alimenta con una fuente independiente de CD de un valor mucho menor a V_{GAP} , 12[V] en este caso. Logrando que las alteraciones de V_{GAP} se reflejen en un nivel manejable por dispositivos lógicos. El esquema del circuito eléctrico diseñado se muestra en la figura 4.4.



▲ **Figura 4.4.** Acoplamiento de CD/CD. (a) Diagrama esquemático. (b) Niveles de voltaje resultantes.

Los cálculos para determinar V_{GAP}' se hacen a continuación:

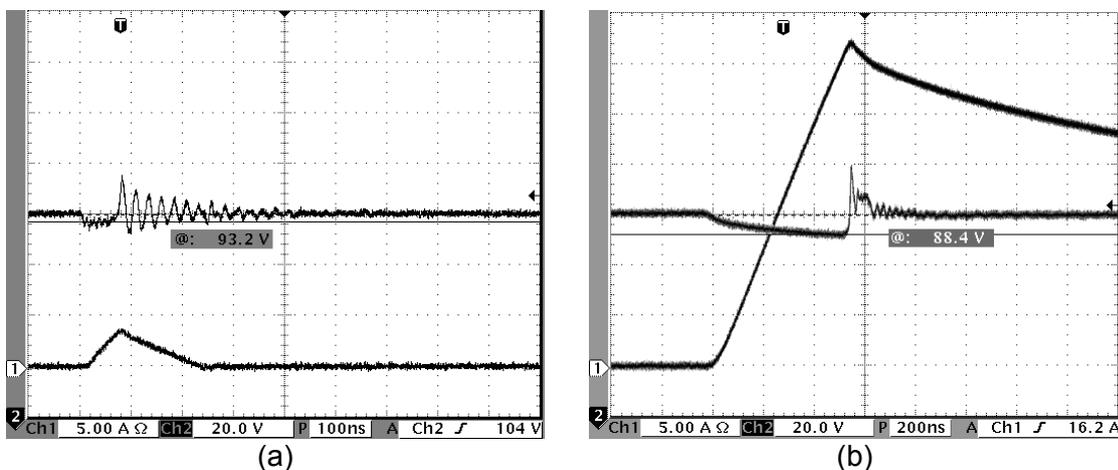
$$V_{GAP}' = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot 12 \text{ [V]} \quad \dots \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Sustituyendo valores:

$$V_{GAP}^f = \frac{6.8 \times 10^3}{10 \times 10^3 + 5.6 \times 10^3} \cdot 12$$

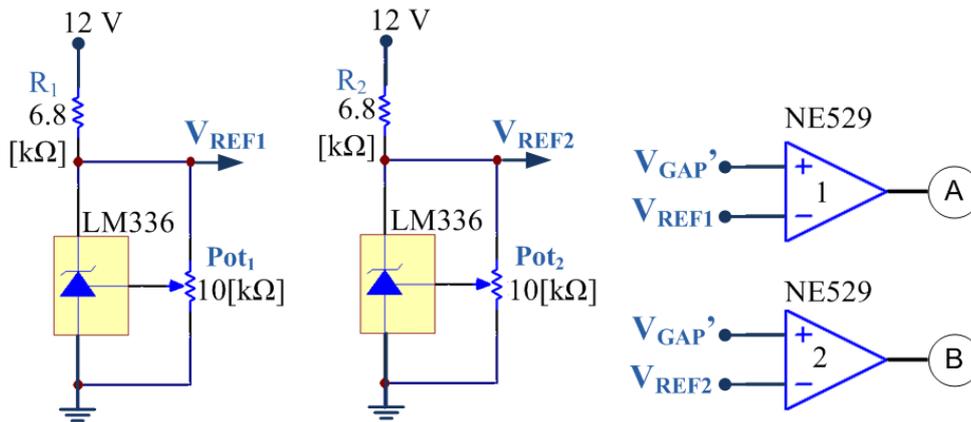
$$V_{GAP}^f = 4.3 \text{ [V]}$$

De este modo se tiene una componente de corriente directa con un valor fijo, 4.3[V], en el que se reflejan las alteraciones de V_{GAP} independientemente del valor de éste mismo. Las formas de onda de voltaje y corriente en el *GAP* dada una condición de chispa es como la que se muestra en la figura 4.5(a), y la condición de corto circuito es la mostrada en 4.5(b).



▲ Figura 4.5. Formas de onda de voltaje y corriente en el *GAP*. (a) Dada una condición de chispa. (b) Dada una condición de cortocircuito.

La diferencia entre las condiciones de chispa y arco no son muy representativas a nivel voltaje, por lo tanto el detector de chispa “es ciego” ante una descarga de arco, por ello es un detector de chispa/arco. La caída de V_{GAP} es mayor en condición de corto circuito que en condición de chispa, ello permite distinguir entre una y otra. Se emplean dos comparadores de voltaje independientes para cada caso, éstos tienen un tiempo de respuesta de 13[ns], su matrícula es NE529. Cada comparador requiere un nivel de voltaje de referencia independiente, V_{REF1} y V_{REF2} , los que se obtienen mediante diodos LM336-5.0 cuya función, específicamente, es dar voltaje de referencia entre 0.7 y 5[V]. El diagrama esquemático de su implementación se muestra en la figura 4.6.



▲ **Figura 4.6.** Diagrama esquemático de la implementación de los comparadores de voltaje que detectan (1) Chispa/arco (2) Corto circuito en el GAP.

Las señales obtenidas a la salida de los comparadores son de niveles lógicos (A y B de la figura). Experimentalmente el NE529 ofreció mejor respuesta dando un flaco de bajada cada vez que cualquiera de ellos detectaba su condición correspondiente en el GAP. El ancho de pulso de respuesta de los comparadores es corto así que, para fijar un estado después de la detección de chispa/arco o corto por un tiempo mayor, las salidas de los comparadores en forma de flancos de bajada, señales A y B, se mandan a un circuito multivibrador monoestable, cuyo ancho de pulso está en función de un arreglo RC colocado a algunos de sus pines. Este tiempo se determina con la ecuación 4.2. Sus características de conexión y funcionamiento se muestran en la imagen 4.7. En el recuadro discontinuo de color rojo se muestra la configuración utilizada, Q1 dispara cuando ocurre chispa/arco en el GAP y Q2 dispara cuando ocurre corto circuito.

$$t_w = k \cdot R_{EXT} \cdot C_{EXT} \left(1 + \frac{0.7}{R_{EXT}} \right) [s] \quad \dots \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Sustituyendo valores:

$$V_{GAP}^l = \frac{6.8 \times 10^3}{10 \times 10^3 + 5.6 \times 10^3} \cdot 12$$

$$V_{GAP}^l = 4.3 [V]$$

Diagrama de Conexión

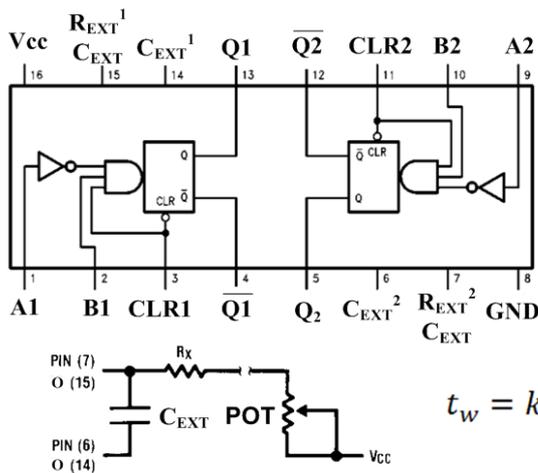


Tabla de verdad de disparo

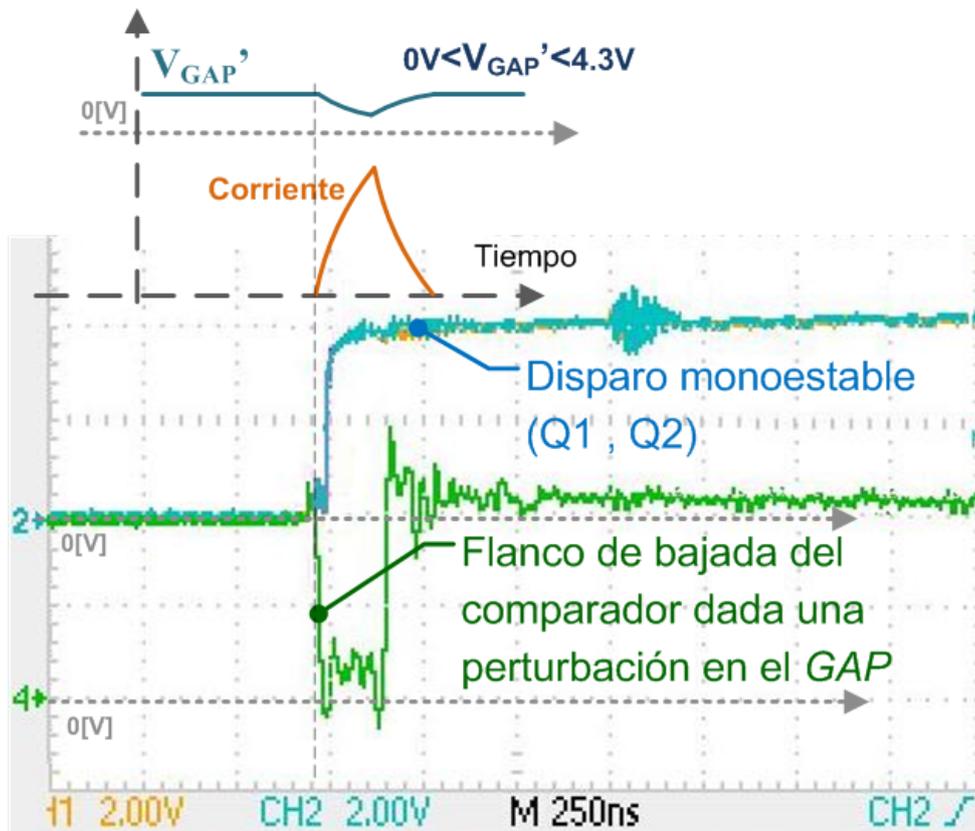
Entradas			Respuesta
A	B	CLR	
X	X	L	No dispara
~	L	X	No dispara
~	H	H	Dispara
H	~	X	No dispara
L	~	H	Dispara
L	H	~	Dispara

H=Nivel de voltaje ALTO
L=Nivel de voltaje BAJO
X=Inmaterial

$$t_w = k \cdot R_{EXT} \cdot C_{EXT} \left(1 + \frac{0.7}{R_{EXT}} \right) [s]$$

▲ **Figura 4.7.** Circuito multivibrador monoestable 74LS123.

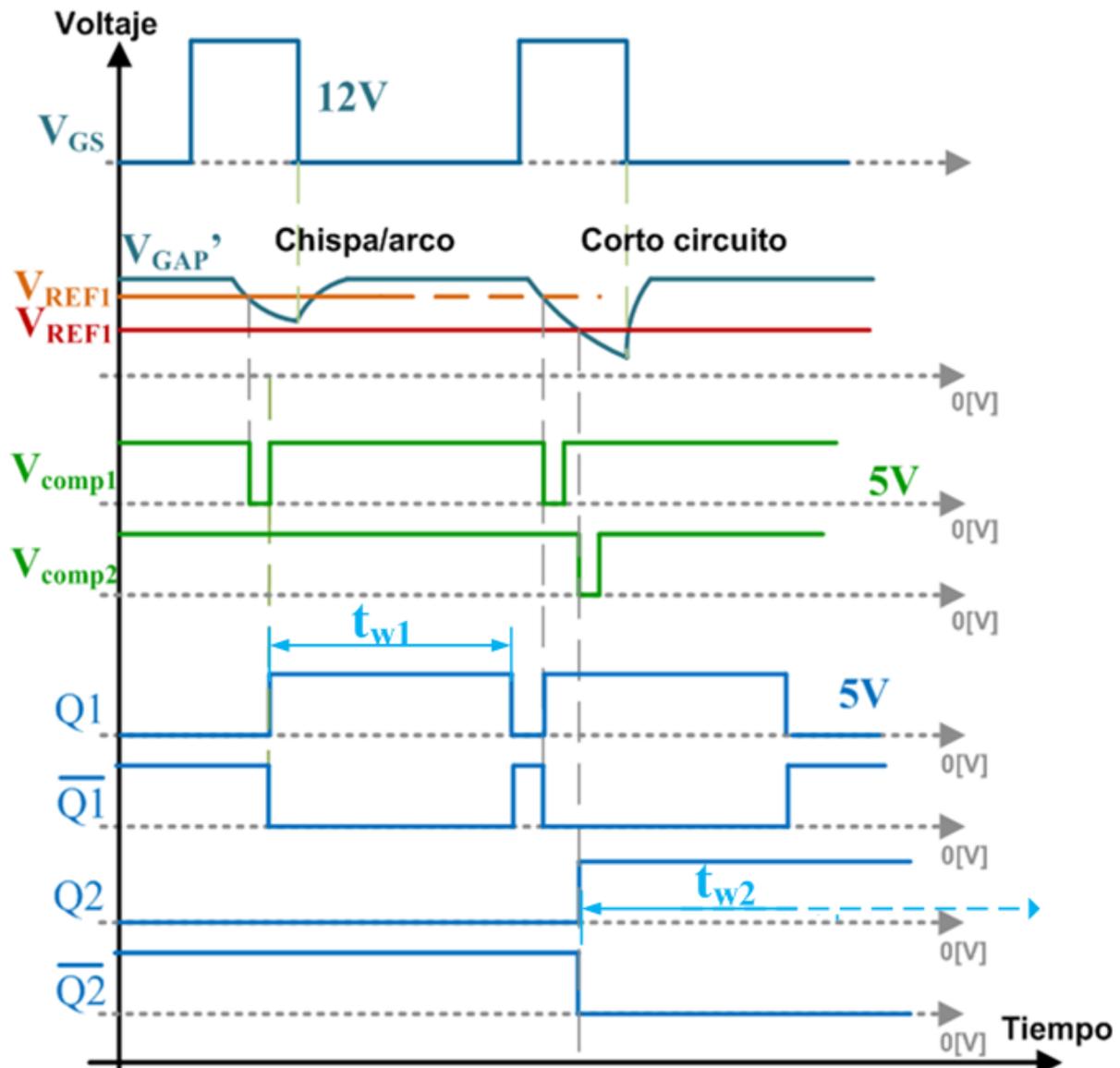
Las formas de onda obtenidas como resultado de la implementación de este circuito son las que se muestran en la figura 4.8.



▲ **Figura 4.8.** Pulso del circuito multivibrador monoestable dado el flanco de bajada del comparador al ocurrir chispa..

4.3.3. Control de posición de la herramienta

Dados los circuitos detectores de chispa/arco y corto circuito, las señales de salida del multivibrador monoestable son las de la figura 4.9. Donde las señales $Q1, \overline{Q1}$ y V_{Comp1} corresponden a la respuesta dada chispa/arco y $Q2, \overline{Q2}$ y V_{Comp2} corresponden a la respuesta dado corto circuito.



▲ **Figura 4.9.** Respuesta de los comparadores de voltaje NE529 y los multivibradores monoestables 74LS123 dada una condición de chispa/arco y corto circuito en el GAP.

La propuesta del control de posición de herramienta de esta tesis consiste en utilizar las señales de los circuitos detectores de chispa/arco y corto circuito a fin de obtener

las señales adecuadas para el controlador del motor de CD como se muestra en la tabla 4.2.

Condición del GAP	Detector de Chispa/Arco		Detector de Corto Circuito		Acción Sobre la Herramienta	Controlador del Motor de CD		
	Q1	Q1	Q2	Q2		A	B	Enable
Circuito abierto	0	1	0	1	Bajarla	0	1	1
Chispa/arco	1	0	0	1	Detenerla	X	X	0
Corto Circuito	1	0	1	0	Subirla	1	0	1

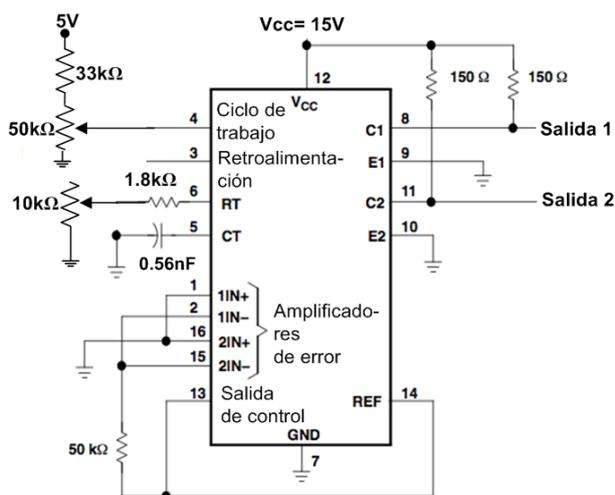
X: Inmaterial. No importa.

▲ **Tabla 4.2.** Acciones a tomar sobre la herramienta dada la condición del voltaje de GAP.

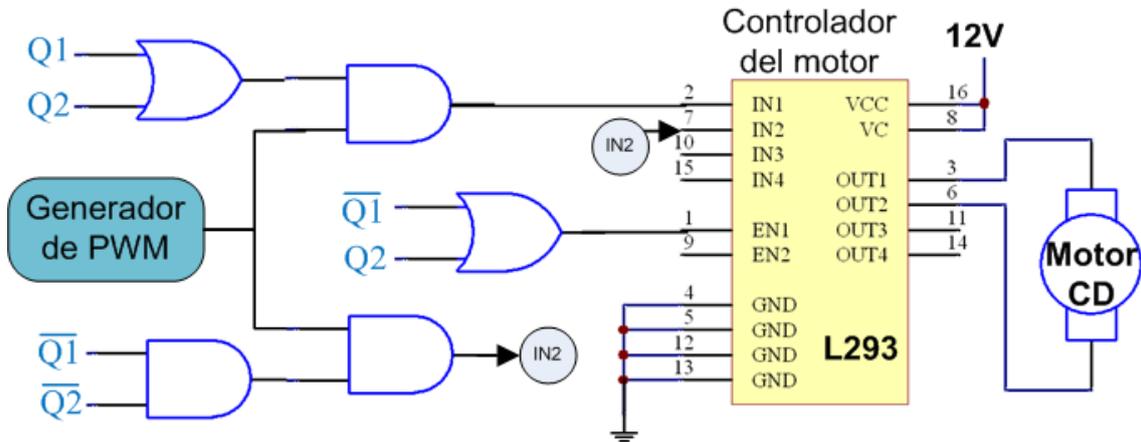
A diferencia del control de posición presentado en el Capítulo 3 del presente trabajo de tesis, la propuesta resumida en la tabla 4.2 añade una función más al control: Detener la herramienta en la posición en la que se genera chispa con el fin de obtener un maquinado más estable y evitar movimientos innecesarios de la herramienta. Así mismo, se propone disminuir la inercia del movimiento de la herramienta evitando movimientos bruscos que provoquen choque entre ambos electrodos. Esto se logró al disminuir su velocidad mediante un circuito PWM (*Pulse-Width Modulation*, modulación por ancho de pulso) que, interviniendo en las señales de entrada del control del motor, reduce la corriente promedio en el devanado del motor y en consecuencia su velocidad.

Su frecuencia máxima de oscilación es 300[kHz] y el ciclo de trabajo de los pulsos puede ir de 45% al 100%. En la figura 4.10 se muestra su diagrama esquemático.

El diagrama esquemático del circuito de control de posición propuesto se muestra en la figura 4.11.



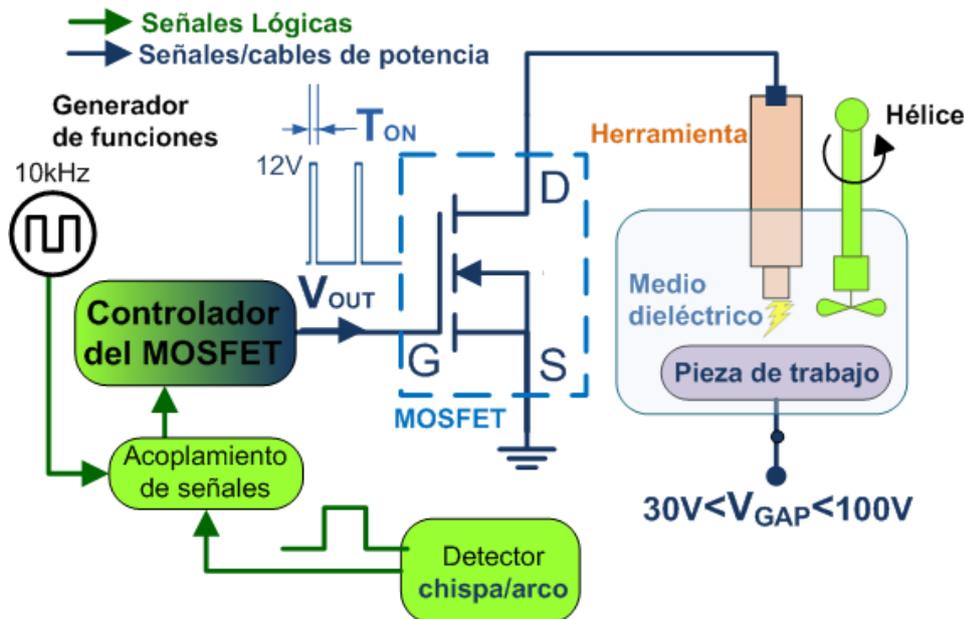
▲ **Figura 4.10.** Diagrama esquemático de la implementación del circuito TL494.



▲ **Figura 4.11.** Circuito de control de posición de la herramienta.

4.3.4. Acoplamiento de señales

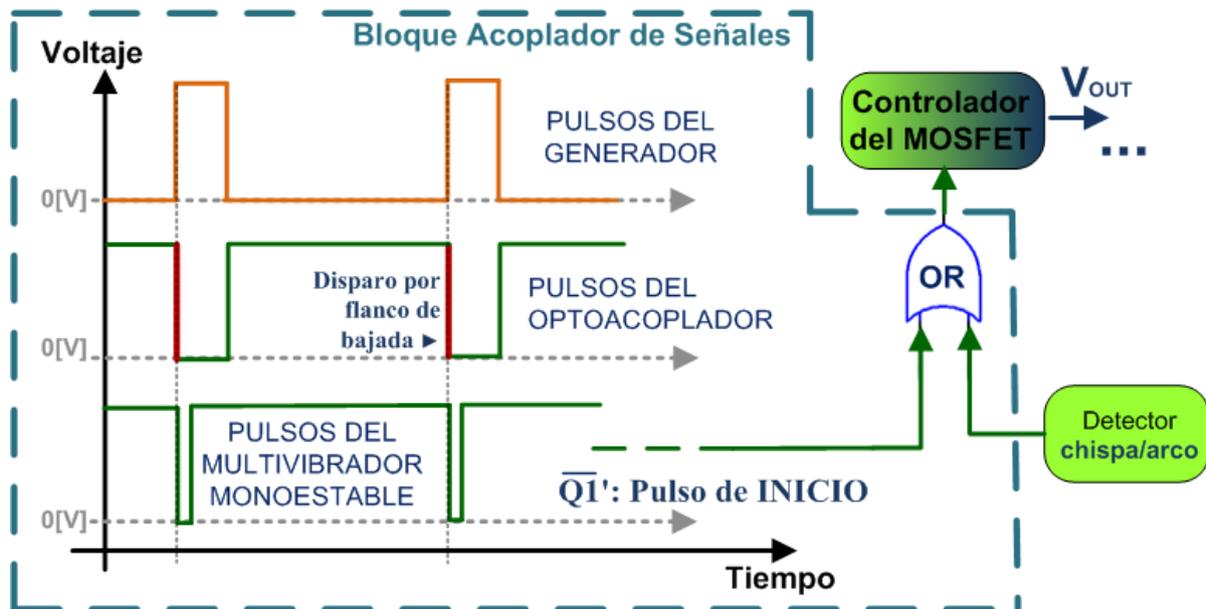
En la figura 4.12 se observa que dos flechas llegan al bloque de “Acoplamiento de señales”. Una corresponde a la entrada de las señales del generador de funciones, la segunda flecha proviene del detector de chispa/arco. La interacción entre estas dos señales da como resultado la señal lógica de control de encendido y apagado del MOSFET.



◀ **Figura 4.12.** Interacción de señales lógicas que dictan al controlador del MOSFET.

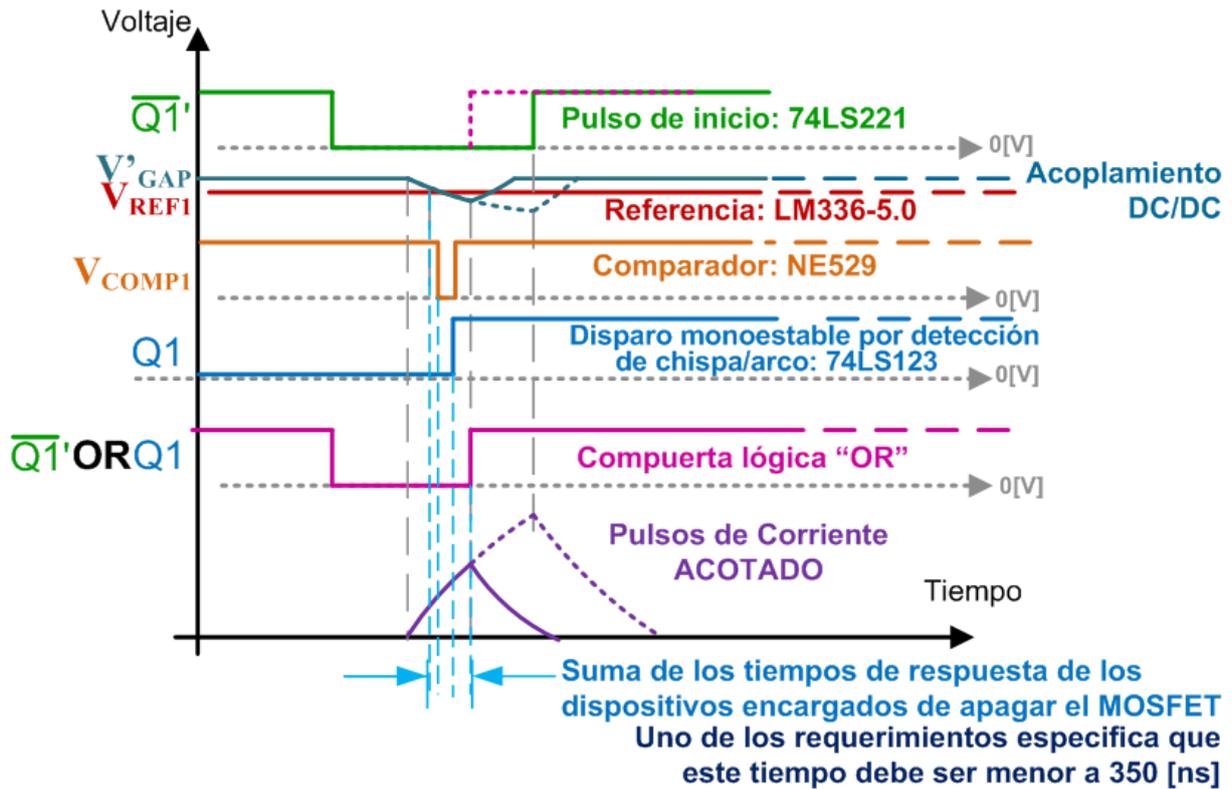
La señal de salida del generador de funciones, por seguridad, no debe interactuar directamente con el sistema de generación de pulsos de corriente para μ EDM; por lo que sus señales de salida son optoacopladas mediante el dispositivo 6N137. Al

mismo tiempo, los aparatos generadores de funciones son dispositivos de aplicación y uso general, motivo por el cual sus señales de salida no son diseñadas para lograr anchos de pulso del orden de unos cuantos nanosegundos. Es por esto que las señales de salida del optoacoplador se ajustan a tiempos de nanosegundos por medio de un dispositivo multivibrador monoestable 74LS221 que, en función de una red RC, logra dar pulsos tan cortos como 40[ns]; teniendo como entrada flancos de bajada o subida. Esta es la primera tarea del bloque “Acoplador de funciones”. En la figura 4.13 se muestra el paso de las señales del generador de funciones hasta su última interacción con la señal de salida del detector de chispa/arco, que es por medio de una compuerta lógica “OR”.



▲ **Figura 4.13.** Desacoplamiento de la señal del generador de funciones.

La interacción entre la señal $\overline{Q1'}$, de la figura 4.13, y la señal proveniente del detector de chispa/arco tiene como objetivo adelantar el flanco de subida, que apaga al transistor, en función de la generación de chispa en el GAP. En consecuencia se generan pulsos de corriente isoenergéticos, cuya amplitud está en función de los tiempos de reacción y respuesta de los dispositivos encargados de detectar chispa/arco y apagar al MOSFET. Esto se muestra en la figura 4.14.



▲ **Figura 4.14.** Comportamiento ideal de la fuente propuesta.

De las hojas de datos de los dispositivos se obtiene el tiempo de respuesta ideal del circuito para detener el paso de corriente por el GAP. Estos tiempos se resume en la tabla 6.2:

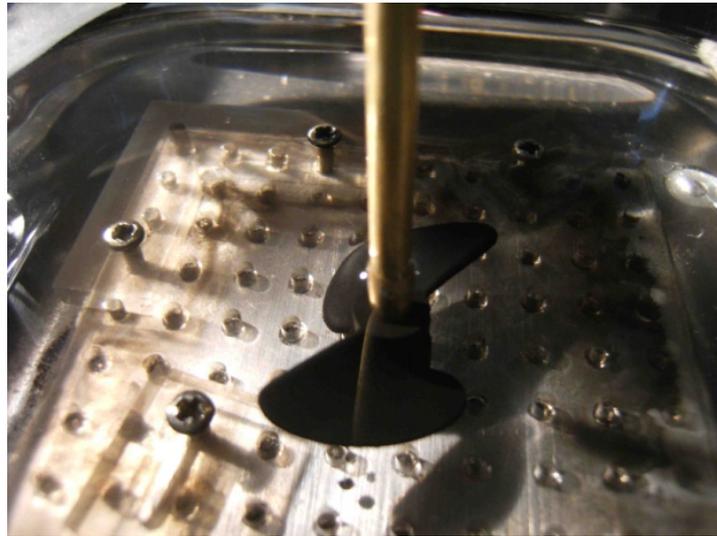
Evento	Dispositivo	Tiempo de Respuesta
Inicio de chispa. Detección de caída de voltaje de GAP	Comparador de voltaje	10 ns
Disparo de señal de detección de chispa	Multivibrador monoestable	33 ns
Unión de las señales $\overline{Q1'}$ y Q1	Compuerta OR	10 ns
Salida de señal de potencia hacia el GATE del MOSFET para apagarlo	Controlador del MOSFET	36 ns
Apagado de la fuente de corriente	MOSFET	70 ns
TOTAL:		159 ns

▲ **Tabla 4.3.** Tiempo de respuesta del conjunto de circuitos encargados de apagar la fuente de corriente una vez que se detecta chispa.

4.3.5. Flujo del medio dieléctrico

Con el fin de retirar el material recién removido de la pieza de trabajo cuando ésta se maquina, el flujo del medio dieléctrico debe ser continuo. Con esto se evitar la

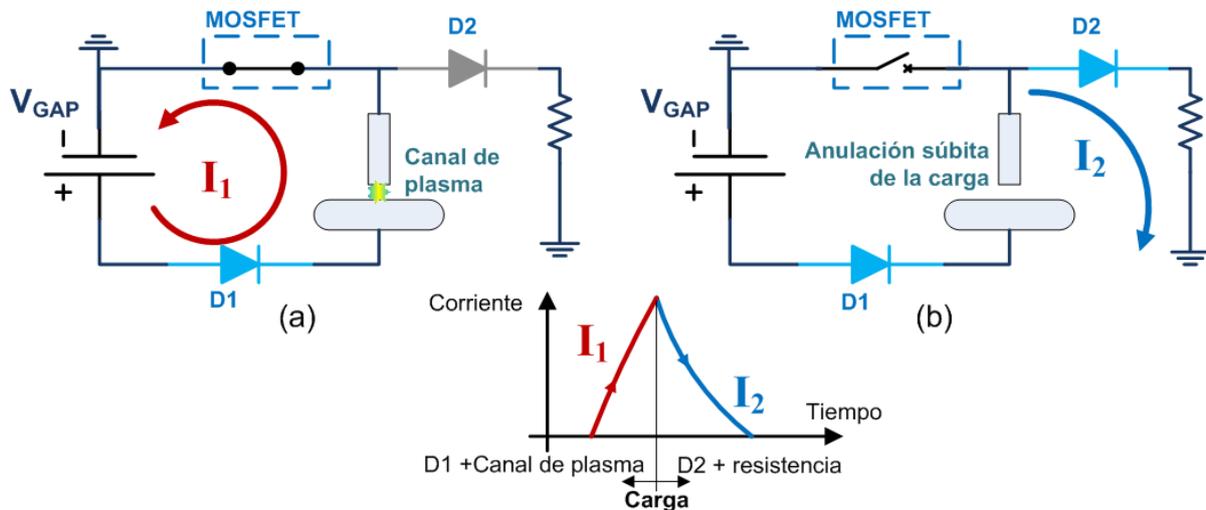
condición de arco, además de enfriar la pieza de trabajo y a la herramienta, lo que en conjunto promueve una condición del *GAP* más estable. Para lograr un flujo cuasiconstante del medio dieléctrico se planteó sumergir una hélice en el tanque que, mediante su movimiento giratorio, genere esta condición constante de flujo. Esto se observa en la figura 4.15.



▲ **Figura 4.15.** Hélice inmersa en el medio dieléctrico para proveer flujo cuasiconstante.

4.4. Implementación de un Elemento Amortiguador que Disipa Energía Extra Almacenada en el GAP

Mu-Tian, Yan et al. en [20] propusieron, como parte de su sistema eléctrico para μ WEDM, la implementación de un amortiguador de energía remanente en el *GAP* con el fin de no causar inestabilidad en las descargas. De ahí que, para obtener el mismo fin, en el presente trabajo de tesis se propone implementar diodos ultra rápidos en serie con el *GAP*. De manera que éstos direccionen la corriente almacenada en el *GAP* a tierra aún después de la anulación súbita de la carga eléctrica que representaba el canal de plasma. El diagrama esquemático de esta propuesta está en la figura 6.16.



▲ **Figura 4.16.** Elementos propuestos para drenar la energía después de anulado al canal de plasma.

Con esto último culmina la propuesta del sistema de generación de chispa para aplicaciones a μ EDM de este trabajo de tesis. El siguiente capítulo muestra las pruebas y resultados del sistema implementado.

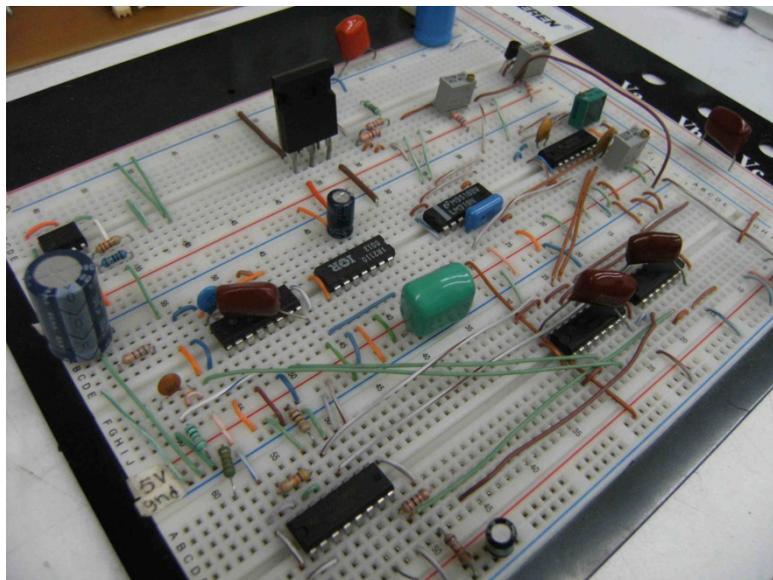


Capítulo 5

Pruebas y Resultados

5.1. Sistema Implementado en Tarjeta de Prototipos

Una primera versión del sistema eléctrico para aplicaciones a micromanufactura por electroerosión (μ EDM) propuesto por el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) se observa en la figura 5.1, en éste se incluye el control de posición de la herramienta:

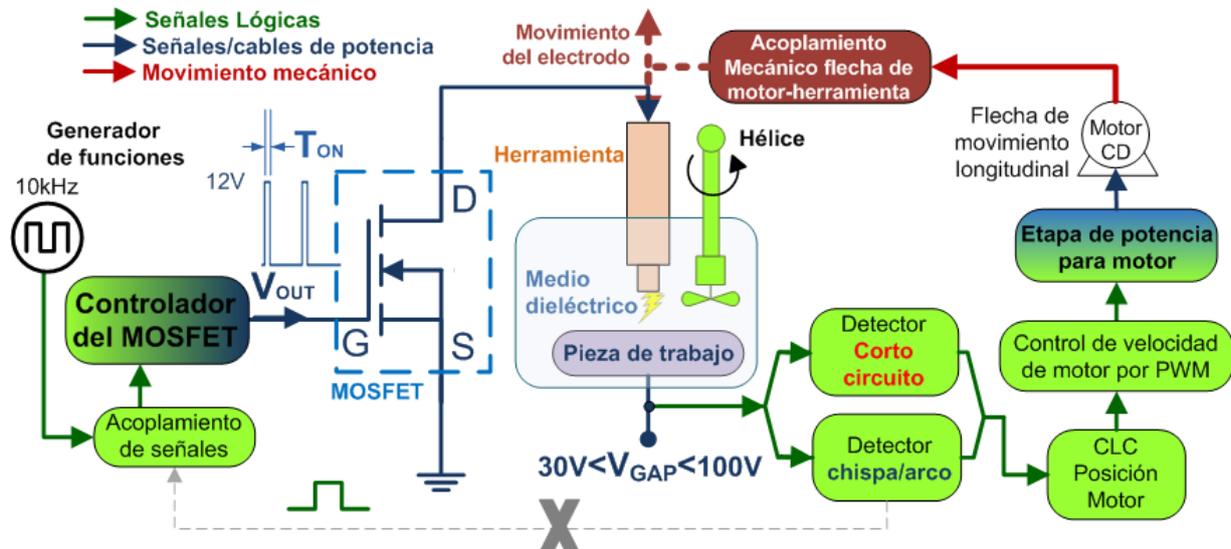


▲ **Figura 5.1.** Primera versión del sistema para μ EDM propuesto por el GMM.

5.2. Experimentos con una fuente de pulsos isofrecuenciales

Se planteó hacer un experimento donde la fuente de pulsos no fuese retroalimentada, con las señales de detección de chispa/arco, a modo de no acotar

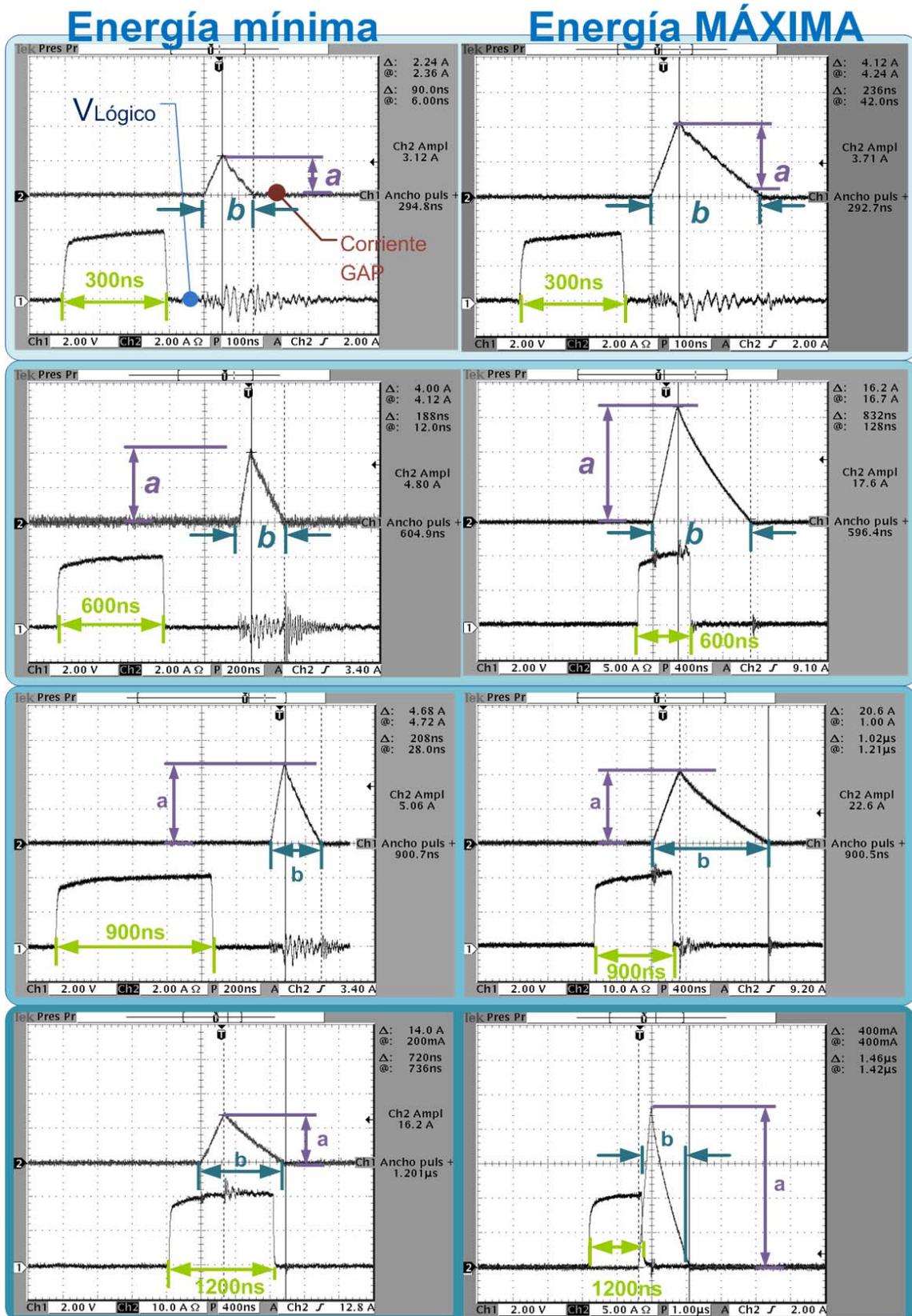
el tiempo de duración de la descarga y su amplitud en corriente. De esta manera la energía promedio de la descarga eléctrica está en función del tiempo de apertura de la fuente de corriente, configurándose así una fuente de pulsos isofrecuenciales. La configuración del sistema es como la que se muestra en la figura 5.2.



▲ **Figura 5.2.** Sistema propuesto sin retroalimentación. Configuración de pulsos isofrecuenciales.

Los tiempos de apertura o encendido del MOSFET propuestos para este experimento son: de 300, 600, 900 y 1200 [ns]. El fin es caracterizar el tipo de acabado que se obtiene en función de la energía suministrada. El material a manufacturar, en esta prueba, es acero inoxidable 304; mientras que el electrodo está hecho de cobre con 99% de pureza con forma redonda de 0.9 [mm] de diámetro. El fluido dieléctrico utilizado es de tipo comercial para máquinas EDM, la diferencia de potencial propuesto para realizar el maquinado es de 100 [V] como voltaje en el *GAP* (V_{GAP}).

En este experimento se utilizó un circuito controlador de MOSFET de lógica positiva. Las formas de onda de las chispas eléctricas con amplitudes máximas y mínimas de cada experimento se muestran en la figura 5.3.



▲ **Figura 5.3.** Espigas mínimas y máximas de corriente obtenidas por diferentes tiempos de encendido del MOSFET. $V_{Lógico}$ son los pulsos lógicos de control que entran al controlador del MOSFET.

La energía entregada en cada uno de los eventos se calcula con las ecuaciones Ec. 5.1 y Ec.5.2, considerando que la forma de onda de la corriente es triangular:

$$E = \int P(t)dt [J] \quad \dots \quad (\text{Ec. 5.1})$$

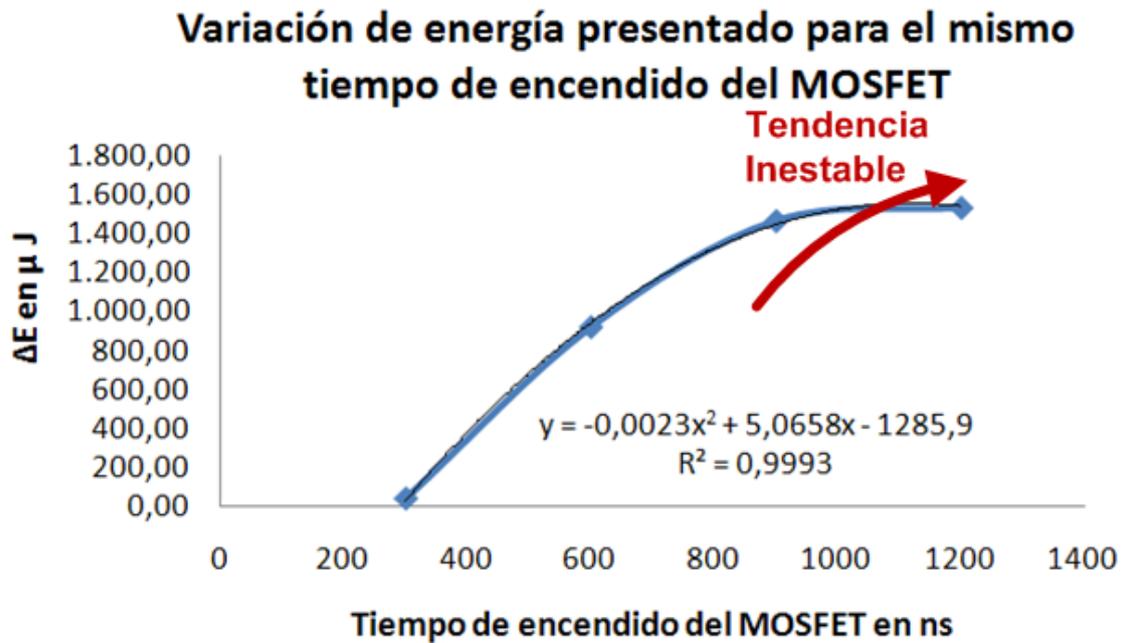
$$E = V \cdot \frac{b \cdot a}{2} [J] \quad \dots \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Los cálculos de energía para cada uno de los experimentos planteados, considerando los casos máximo y mínimo de espiga de corriente, se muestran en la tabla 5.1.

Tiempo encendido MOSFET (T_{ON} de V_{OUT})	Datos				Área bajo la curva por tiempo		Energía de la Espiga		ΔE ($E_{m\acute{a}x} - E_{m\acute{i}n}$)
	Caso Máximo		Caso Mínimo		Caso Mx	Caso Mín	MÁX	MÍN	
	b	a	b	a	A	A			
ns	ns	A	ns	A	$\mu A \cdot s$	$\mu A \cdot s$	μJ	μJ	μJ
300	320	3.71	140	3.12	0.64	0.218	59.36	21.84	37.52
600	1110	17.6	240	4.80	9.768	0.576	976.8	57.6	919.2
900	1360	22.6	360	5.06	15.368	0.728	1537	72.86	1464.1
1200	1400	23	960	16.2	16.1	7.776	1610	777.6	1532.4

▲ **Tabla 5.1.** Cálculos de energía de maquinado obtenidos a partir de diferentes tiempos de encendido del MOSFET.

Haciendo una gráfica con los datos de la primera y última columna de la tabla 5.1, se puede observar una tendencia hacia la inestabilidad de la cantidad de energía de maquinado suministrada por el sistema conforme se incrementa el tiempo de encendido del transistor, lo que indica que las espigas de corriente se hacen menos uniformes entre sí y el acabado se hace más irregular. Incluso, la diferencia de energía entre la espiga de máxima y mínima amplitud del primer experimento ($T_{ON} = 300$ ns), es considerablemente alta en términos de μEDM . En la figura 5.4 se muestra una gráfica de la diferencia de energía suministrada en cada experimento contra el tiempo de encendido del MOSFET.



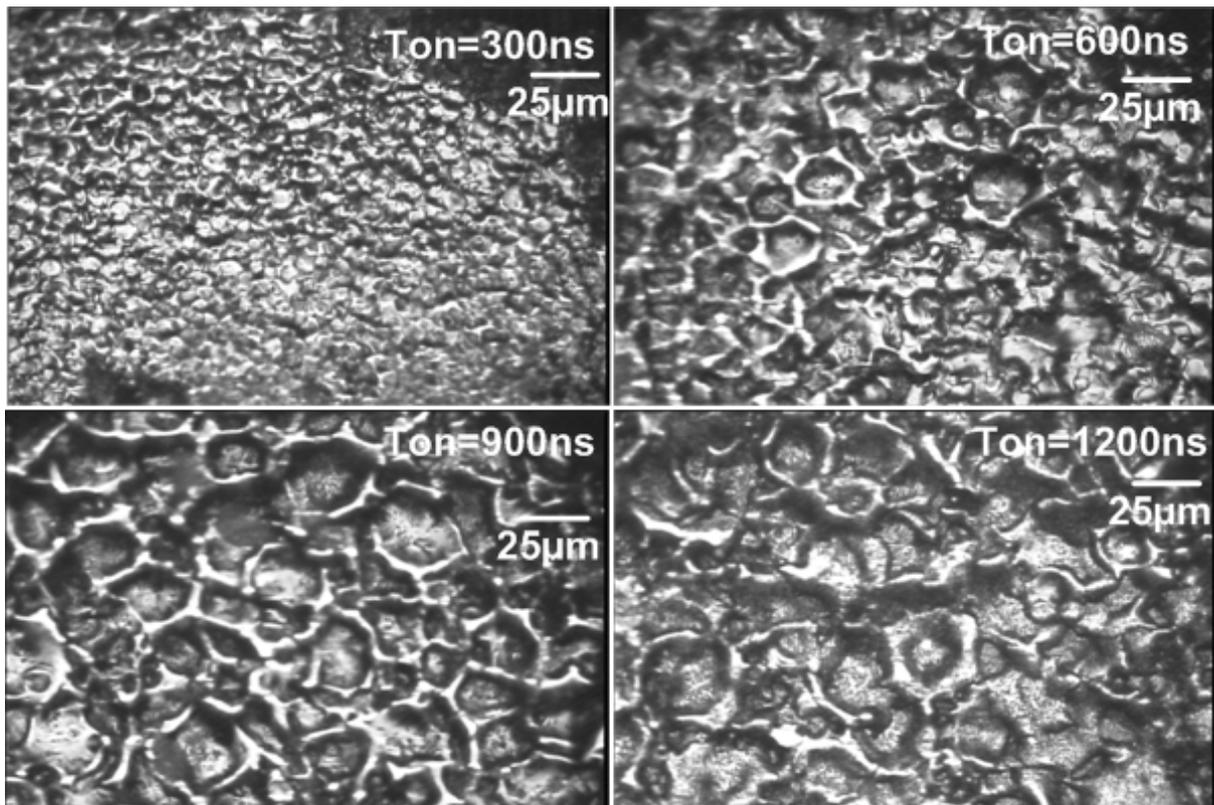
▲ **Figura 5.4.** Gráfica de ΔE contra el tiempo de encendido del MOSFET (T_{ON}). Inestabilidad del sistema a mayor tiempo de encendido.

Las rugosidades obtenidas en cada experimento son las mostradas en la tabla 5.2. En la figura 5.5 se muestran las fotografías aumentadas en un factor de 1000X de cada experimento, éstas fueron obtenidas mediante un microscopio de fuerza atómica (*AFM* del inglés *Atomic Force Microscopy*).

Tiempo de encendido del MOSFET	Rugosidad Ra	Rugosidad Rms
ns	μm	μm
300	0.275	0.350
600	0.516	0.626
900	0.623	0.773
1200	No medible	No medible

▲ **Tabla 5.2.** Rugosidades obtenidas en cada experimento

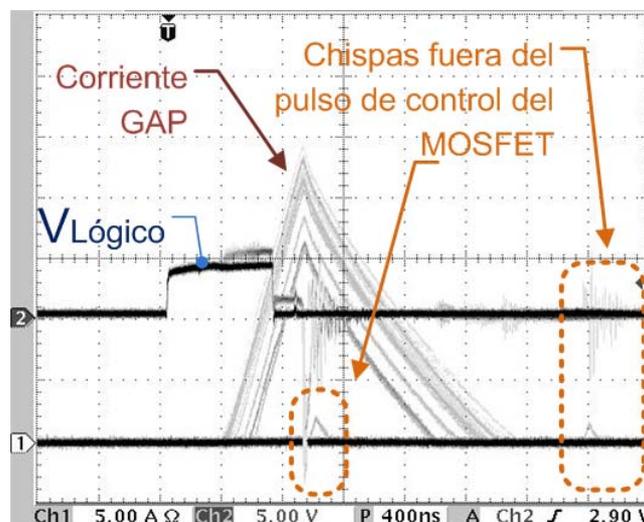
El dato “No medible” de la tabla 5.2, se debe a que el tamaño del cráter, formado con energías entre $777\mu\text{J}$ y 1.5 mJ , del cuarto experimento resulta demasiado grande para el rango de medición del microscopio de fuerza atómica empleado para este análisis.



▲ Ampliación de 1000X

▲ **Figura 5.5.** Maquinado de cráteres por μ EDM con diferentes tiempos de encendido del MOSFET.

Cabe mencionar que a lo largo del maquinado se presentó inestabilidad del sistema, ello se evidenció por la observación en el osciloscopio mostrada en la figura 5.6, donde se pueden apreciar chispas muy pequeñas que se generan por perturbaciones en la señal lógica de control del MOSFET.

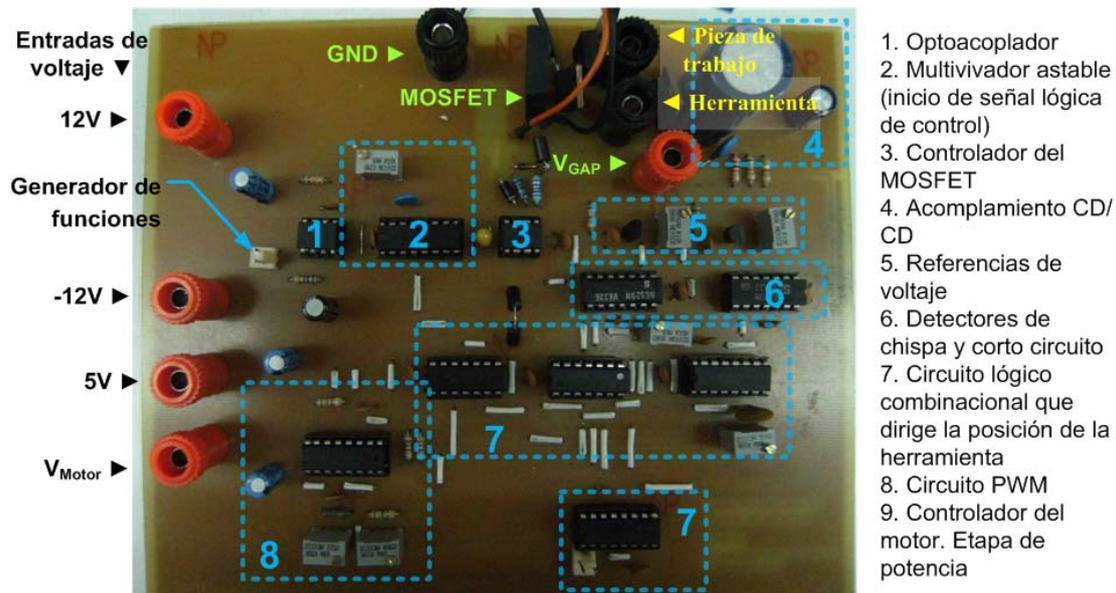


▲ **Figura 5.6.** Inestabilidad del sistema. Chispas que se generan fuera del pulso del control del MOSFET.

Estas chispas, aunque incontrolables y aleatorias, pueden ser responsables también de cráteres mucho más pequeños. Se observó que conforme el tiempo del pulso de encendido del MOSFET es menor, las chispas generadas dentro y fuera del pulso de control son de magnitudes similares entre sí. Lo que podría unirse a la explicación del porqué la baja rugosidad obtenida en el maquinado del experimento donde el tiempo del pulso de encendido fue de 300[ns].

5.3. Sistema Implementado en Tarjeta de Circuito Impreso

Una característica inherente a cualquier sistema eléctrico implementado en una tarjeta de prototipos es que presenta capacitancias parásitas indeseables que, en algunos casos, desestabiliza el funcionamiento adecuado del sistema. Con el fin de hacer el sistema propuesto más robusto, se diseñó una tarjeta impresa para el circuito (PCB del inglés *Printed Circuit Board*). La fotografía de la tarjeta se muestra en a figura 5.7.

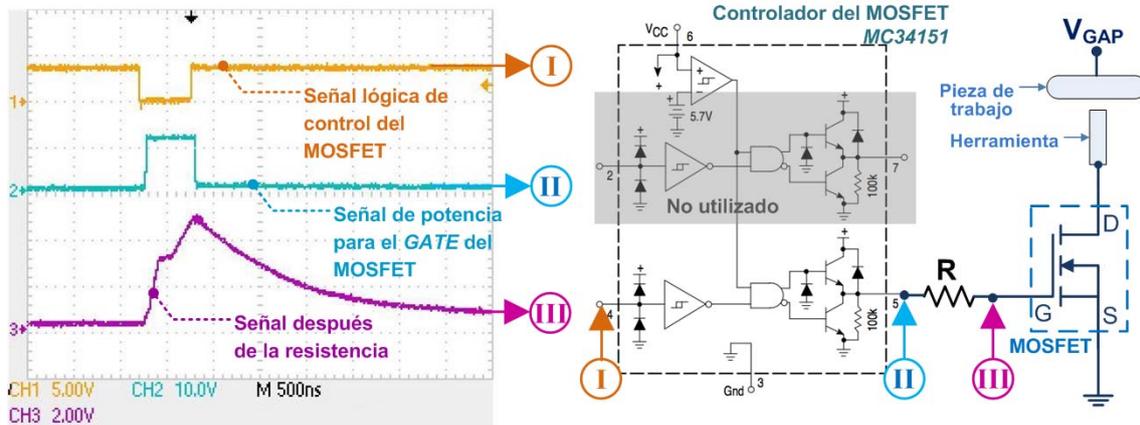


▲ Figura 5.7. Sistema para μ EDM propuesto por el GMM.

5.4. Pruebas del Sistema Implementado

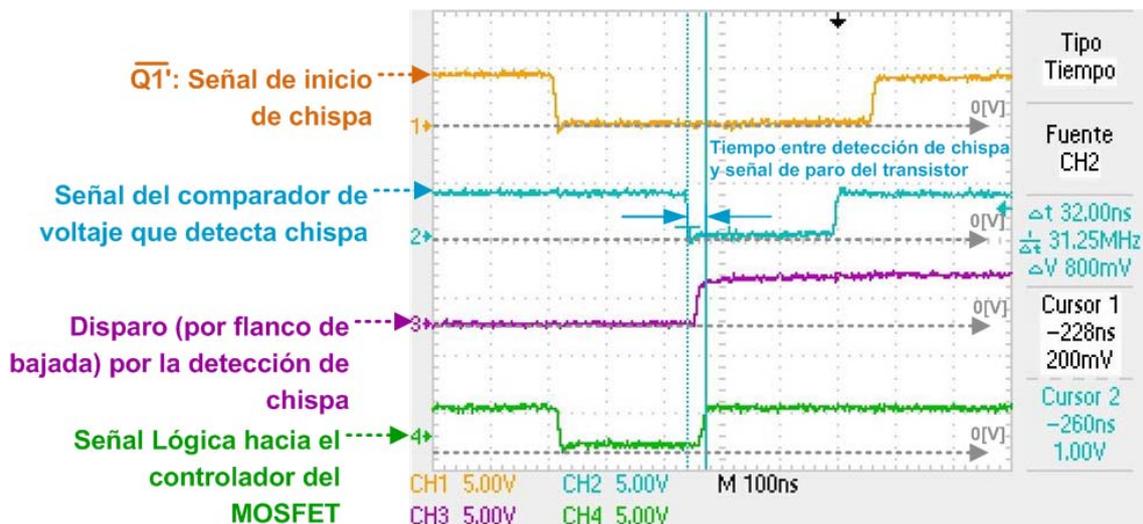
Las señales de entrada lógica y salida de potencia del controlador del MOSFET durante el maquinado se muestran en la figura 5.8, en ésta se observa la forma de

onda de voltaje no ideal que llega a la compuerta del transistor (*GATE*) a través de la resistencia que transmite el mínimo de corriente para que el transistor funcione adecuadamente.



▲ **Figura 5.8.** Señales de entrada y salida del controlador del MOSFET.

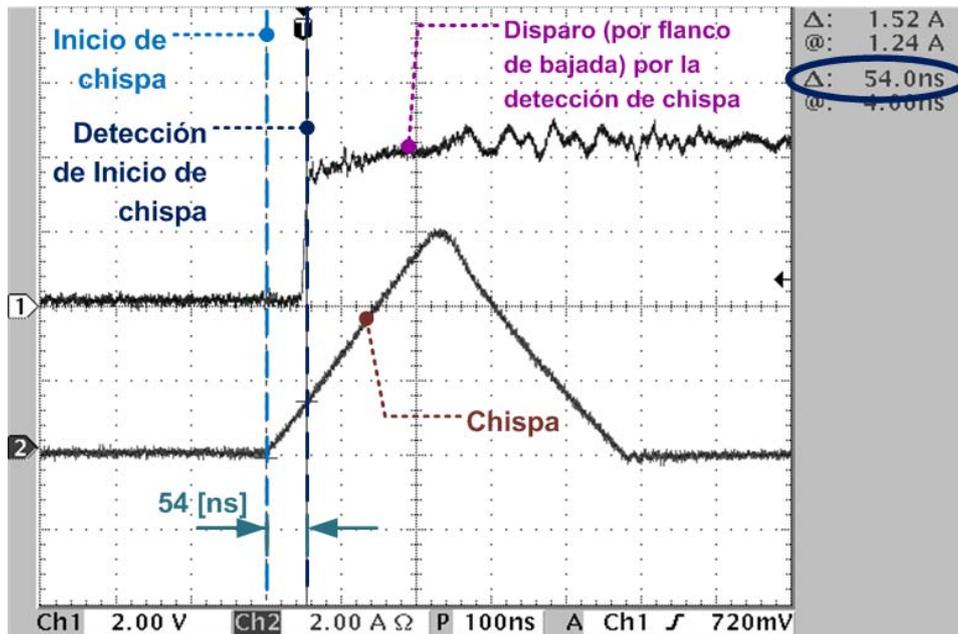
Las señales experimentales obtenidas por el circuito detector de chispa, así como el resultado de la retroalimentación del sistema implementado son las que se muestran en la figura 5.9:



▲ **Figura 5.9.** Señales experimentales del detector de chispa.

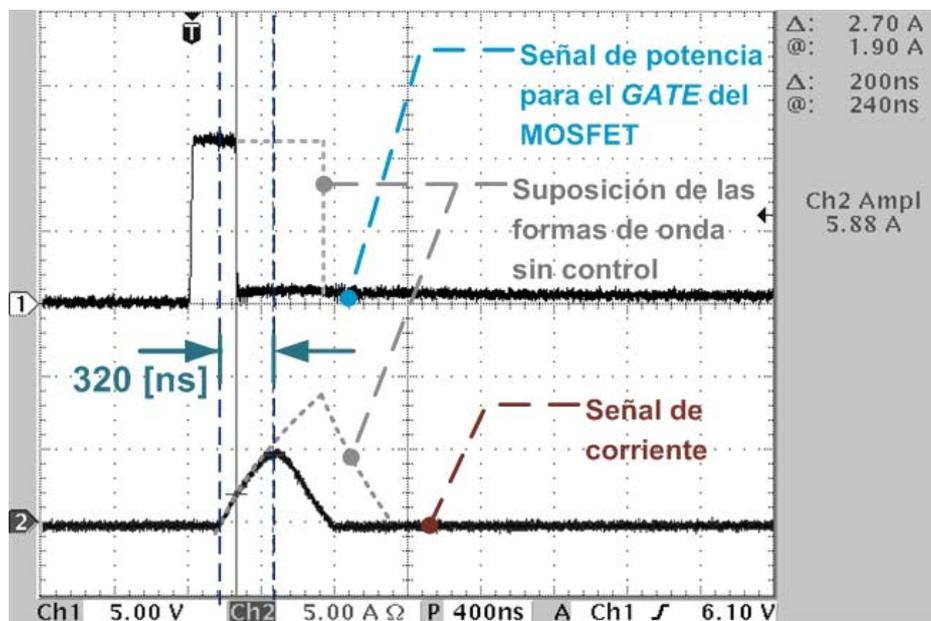
Se puede observar de la figura 5.8 cómo el sistema propuesto, en principio, sí detecta alguna condición de paso de energía en el *GAP* cuando la señal del comparador de voltaje cae y da un flanco de bajada, el que provoca el disparo del multivibrador monoestable que acota el tiempo de la señal lógica de control del dispositivo MOSFET adelantando el flanco de subida que apaga al transistor, como

se muestra en la figura 5.10, donde se observan la señal de disparo del multivibrador dada una chispa.



▲ **Figura 5.10.** Tiempo de retraso entre el inicio del paso de energía por el GAP en forma de chispa y la respuesta del circuito detector de chispa propuesto.

Cuando la señal de salida de potencia del controlador del MOSFET es acotada, ésta misma y la forma de onda de la corriente se ven como lo muestra la figura 5.11.



▲ **Figura 5.11.** Señal de corriente acotada dada.

Las condiciones de trabajo bajo las que se tomó la imagen 5.11 son las que se resumen en la tabla 5.3.

Herramienta	Pieza de Trabajo	Medio Dieléctrico	V _{GAP}
Cobre Electrolítico (99% pureza)	Acero inoxidable 304	Comercial	50[V]

▲ **Tabla 5.3.** Parámetros operacionales para el maquinado de la figura 5.11.

Como se observa en la figura 5.11 la tasa de incremento de la corriente en el GAP con respecto al tiempo es de aproximadamente:

$$\frac{5}{320} \left[\frac{A}{ns} \right] = 15.625 \left[\frac{mA}{ns} \right] = 15.625 \times 10^6 [A/s]$$

También, de la figura 5.11 se observa que **las acciones de detección y paro del paso de corriente por el GAP toman aproximadamente 320 [ns]**, y en consecuencia, la energía esperada en cada de la descarga detectada y acotada es, recordado la ecuación 5.2:

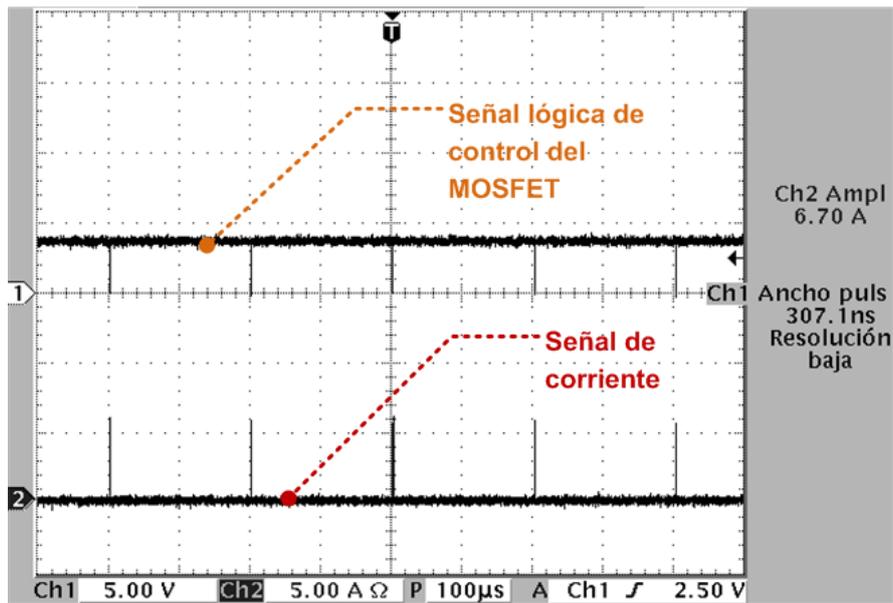
$$E = V \cdot \frac{b \cdot a}{2} [J] \quad \dots \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Sustituyendo:

$$E = 50[V] \cdot \frac{640 \times 10^{-9}[s] \cdot 5[A]}{2}$$

$$E = 80[\mu J]$$

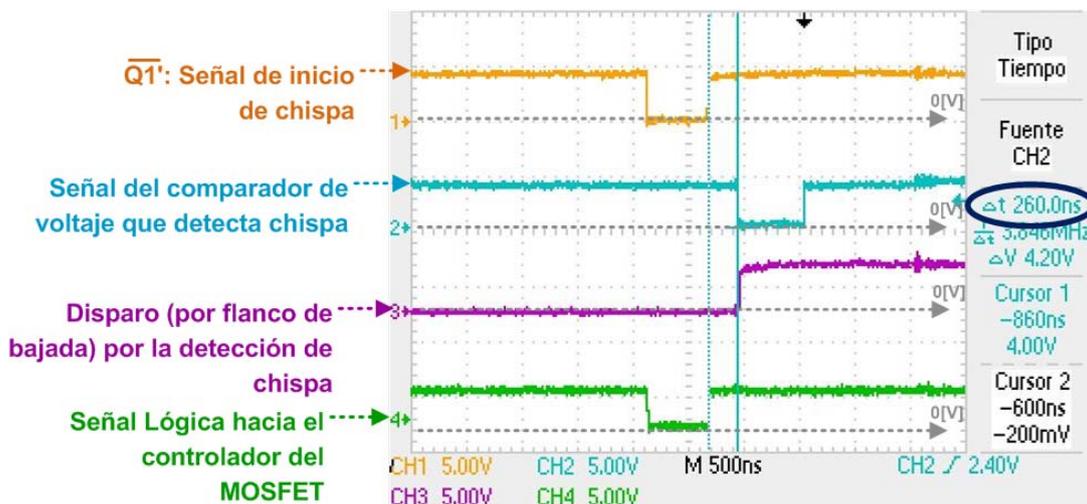
Esta cantidad de energía está dentro del rango conveniente para μ EDM. Las formas de onda en una escala de tiempo mayor se muestran en la figura 5.12.



▲ **Figura 5.12.** Pulsos experimentales de tipo isoenergético obtenidos por el sistema propuesto.

5.5. Inestabilidades Presentadas en el Sistema Propuesto

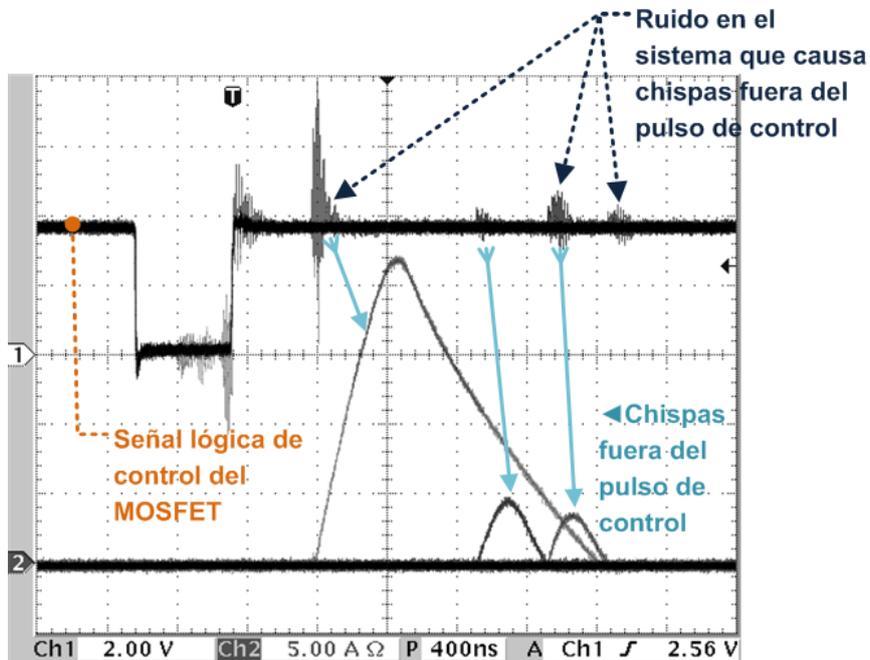
Ocurren casos en los que la inestabilidad del sistema provoca descargas fuera del área de control del sistema planteado, es decir, fuera del tiempo del pulso de la señal lógica de control del transistor, como se muestra en la figura 5.13.



▲ **Figura 5.13.** Señales detectadas por chispa fuera de la señal de encendido del MOSFET.

La señal del comprador del voltaje detecta chispa, en este caso particular, 260[ns] aun después de haber ocurrido el flanco de subida que apaga al MOSFET. Esto se explica observado las formas de onda de la figura 5.14, donde las descargas de μ EDM provocan ruido en la señal de control del transistor, reflejándose directamente en la inestabilidad de las descargas que ni siquiera se generan dentro del marco de

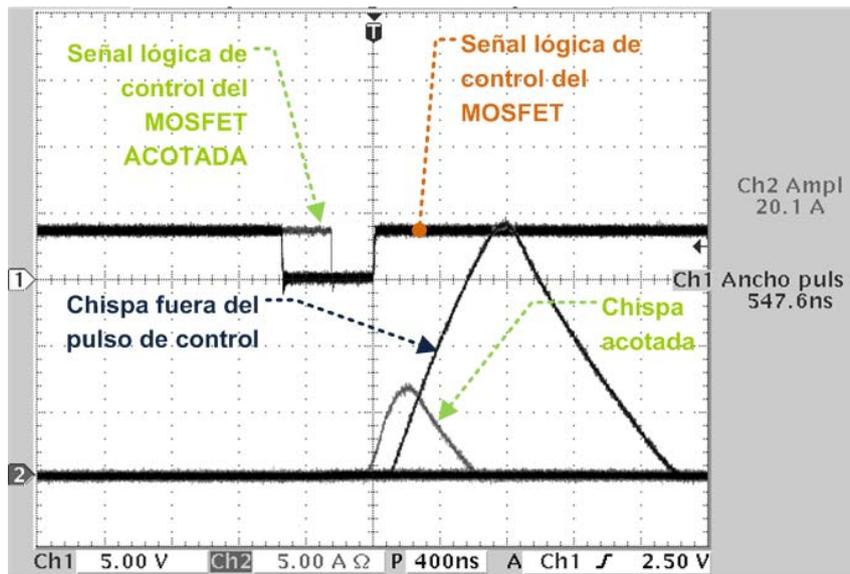
las señales de control enviadas por el sistema, lo que las vuelve incontrolables por el sistema propuesto.



▲ **Figura 5.14.** Comportamiento inestable del sistema propuesto.

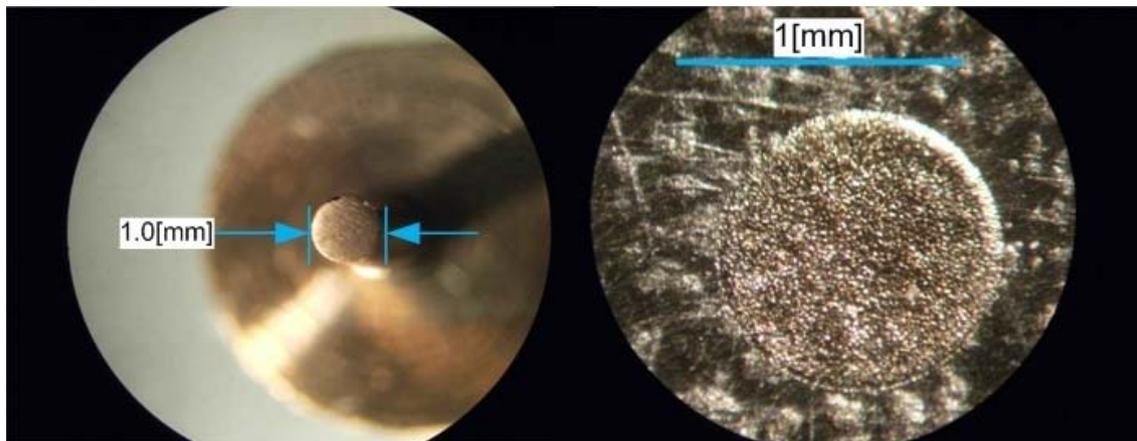
La amplitud y el tiempo de duración de las descargas generadas fuera del pulso de control dirigido al transistor, son condiciones completamente fuera del alcance del control del sistema propuesto dado el principio de funcionamiento en el que se basa, ya que para estas chispas no existe pulso alguno que acotar en tiempo de duración.

El sistema propuesto realiza, por un lado, el acotamiento de los pulsos de control requerido para lograr pulsos isoenergéticos. Pero, por otro, presenta también pulsos incontrolables debido a la inestabilidad provocada en el sistema por las descargas de μ EDM. Ver figura 5.15.



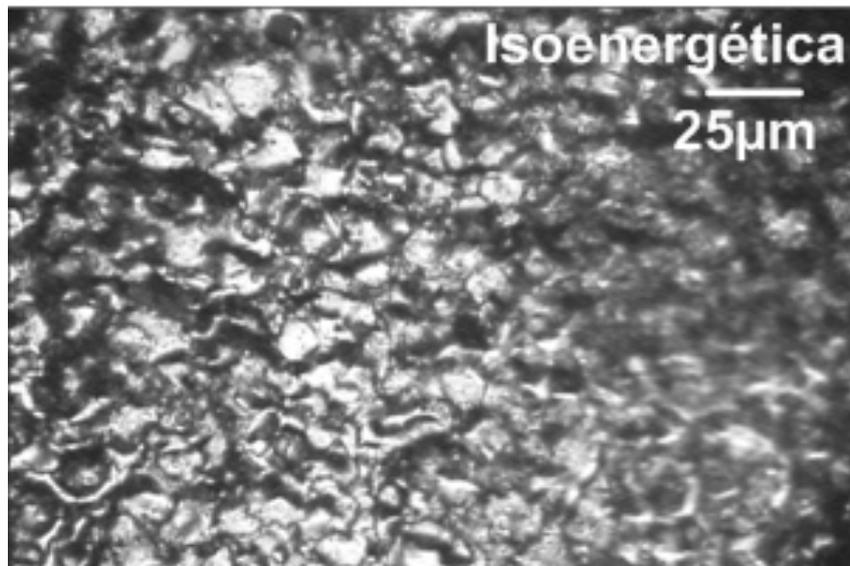
▲ **Figura 5.15.** Formas de onda presentadas en el maquinado, unas acotadas otras sin control.

Un maquinado obtenido con este sistema se observa en la figura 5.16, donde también está la herramienta con la que se maquinó. Los parámetros operativos de maquinado son los mismos de la tabla 5.3.



▲ **Figura 5.16.** Maquinados obtenidos con el sistema propuesto implementado en PCB.

La fotografía de una región del maquinado de la figura 5.16, ampliada en un factor de 1000X, se muestra en la figura 5.17. Las mediciones de rugosidad, obtenidas mediante AFM son 0.475 [μm] Ra y 0.583 [μm] Rms.



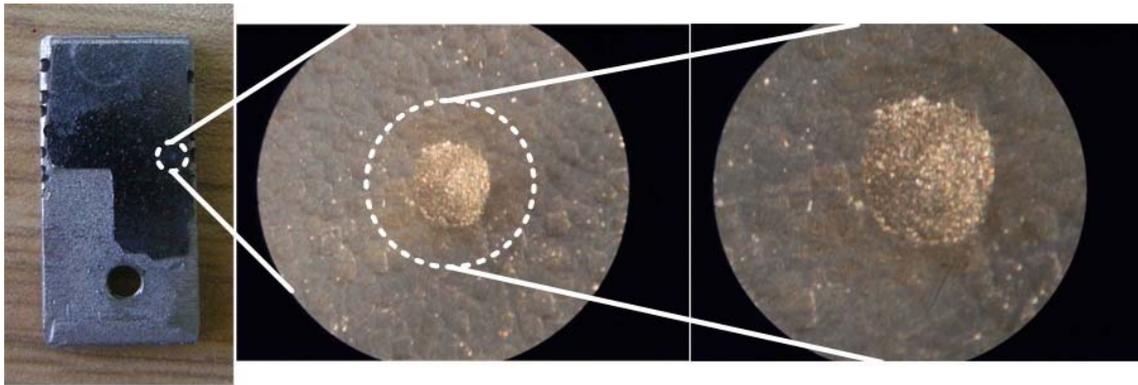
▲ Ampliación de 1000X

▲ **Figura 5.17.** Mediciones por microscopía por fuerza atómica.

El diámetro máximo de la herramienta probado para realizar maquinado con este sistema de control de pulsos fue de 2.0[mm]. El uso de herramientas de diámetros mayores a 2.5[mm] provocó, al cabo de unos minutos de prueba, calentamiento peligrosamente dañino para el MOSFET debido al excesivo paso de corriente que un mayor área de maquinado implica.

5.6. Aplicaciones para Maquinado de Silicio

Como planteamiento de diferentes aplicaciones para el sistema propuesto por este trabajo de tesis, se presenta el maquinado de un material semiconductor, una oblea de silicio. Para ello el voltaje de polarización del medio dieléctrico necesita ser de niveles superiores a los manejados hasta ahora. Se utilizó una fuente de 170 [V] de CD para lograrlo. Dada la fragilidad de las obleas de silicio, la posición de la herramienta fue hecha mediante el mando manual de la máquina CNC donde el centro de μ EDM está instalado. La resolución teórica de esta máquina es de 5 [μ m]. Las fotografías obtenidas del maquinado se observan en la figura 5.18.



▲ **Figura 5.18.** Maquinado en una oblea de silicio.



Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo a Futuro

6.1. Conclusiones

Como conclusiones del presente trabajo de tesis, se tienen las siguientes:

El Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) ha incursionado en la investigación sobre métodos no convencionales de manufactura en escala micro, por primera vez, en la micromanufactura por electroerosión (μ EDM) con el proyecto que presenta este trabajo de tesis. En este primer intento, se ha implementado un centro de μ EDM por penetración dentro de un centro de maquinado vertical comercial. Así mismo, se desarrollaron los elementos necesarios para sujetar las piezas de trabajo y las herramientas, adecuando sus diseños a la aplicación de fuerzas casi nulas entre éstas. La implementación de este centro de μ EDM dentro de las instalaciones del GMM es altamente funcional para sujetar piezas en un área efectiva de trabajo de hasta 49x49[mm]. La forma de las herramientas probadas fueron normalmente redondas, el diámetro máximo con el que se lograron hacer maquinados sin que el sistema presentara problemas de calentamiento por el paso excesivo de corriente fue de 2.0[mm].

Se implementó una fuente de relajación RC aplicada al EDM con el fin de conocer experimentalmente la influencia de algunos parámetros sobre la tasa de remoción de material (TRM). Se plantearon una serie de experimentos en los que se combinaron los parámetros de material de la pieza de trabajo, el material de la herramienta y el fluido del medio dieléctrico para el maquinado. De esta serie de

experimentos se concluyó que una combinación óptima para obtener una alta TRM, dentro del marco de los alcances de este experimento, fue bajo las siguientes condiciones: utilizar latón como pieza de trabajo, cobre como material de la herramienta y queroseno como medio dieléctrico. Analizando las formas de onda que se generaron en los maquinados de esta serie de experimentos, se obtuvo la conclusión de que al utilizar un circuito de relajación RC, el capacitor puede descargarse por el *GAP* a diferentes niveles de energía. Característica que propicia un acabado irregular. Este sistema contaba a su vez con un circuito de control de posición de la herramienta cuyo principio de funcionamiento fue útil para proponer un sistema de control de posición de herramienta mejorado como parte de los requerimientos de este trabajo de tesis.

Se obtuvo un conjunto de fuentes bibliográficas de interés para este trabajo de tesis, de éstas se resumieron las características eléctricas y funcionales, con lo que se sustentó el marco teórico y el diseño de la propuesta de esta tesis. Del análisis de literatura y trabajo experimental se obtuvieron los requerimientos y especificaciones del proyecto. Se plantearon dos requerimientos cuantitativos: Energía de maquinado menor a 100 [μJ] y, Tiempo para detectar chispa y apagar la fuente de corriente menor a 350 [ns]. Así mismo se planteó un requerimiento cualitativo: Evitar autónomamente que el sistema permaneciera en una condición de corto circuito. Los tres requerimientos se cumplieron satisfactoriamente de la siguiente manera:

Para el primero de ellos se desarrolló un sistema de control de chispa con aplicaciones a la μEDM mediante tecnología MOSFET. Este sistema puede trabajar bajo la configuración de pulsos isoenergéticos o isofrecuenciales dependiendo de si existe o no retroalimentación al sistema con señales referentes al inicio de chispa. Bajo una configuración de pulsos isofrecuenciales la energía mínima de maquinado llega a ser de 21.84 [μJ], obteniendo como mejor resultado una rugosidad de 0.275 [μm] R_a que es similar a los resultados presentados por algunos autores a nivel mundial. Retroalimentando el sistema para conocer cuánto tiempo le toma detectar la chispa y apagar la fuente de corriente, se determinó que este tiempo es de 320 [ns], tiempo que encaja con la especificación requerida. Como consecuencia de lo anterior, la energía de maquinado esperada por espiga de corriente es de 80 [μJ],

nivel de energía que también se ajusta a la especificación. La rugosidad de los maquinados obtenidos bajo esta configuración es de 0.475 [μm] Ra.

El sistema de control de posición de la herramienta del sistema desarrollado en el presente trabajo de tesis fue capaz de resolver, entre otros problemas, la dependencia del uso de la máquina de CNC como actuador de la herramienta de trabajo. Con ello se ha mejorado significativamente la TRM. Y se cumplió con el requerimiento de que el sistema de posición evitara condiciones dañinas en el sistema.

6.2. Trabajo a Futuro

La implementación del presente trabajo de tesis ha establecido los elementos de trabajo del GMM en el método de manufactura no convencional de μEDM . Ello da lugar a muchas mejoras que se sugieren como trabajo a futuro. Se propone hacer mejoras en todos los sistemas planteados. Por ejemplo, respecto al sistema de posición de la herramienta, se propone como mejora la implementación un motor cuya flecha tenga un avance más fino, y con mayor linealidad en el desplazamiento a lo largo de su carrera, con el fin de homogeneizar el comportamiento del sistema en cualquier punto en que se encuentre la herramienta.

Otra propuesta, para el sistema de flujo continuo del medio dieléctrico puede implementarse un sistema de filtrado de partículas desprendidas de la pieza de trabajo para evitar condiciones de arco eléctrico en el *GAP*; además se puede desarrollar una base fija robusta donde éste pueda funcionar óptimamente.

Respecto a la fuente de control de pulsos, o generación de chispa, se propone el desarrollo de un amortiguador que drene adecuadamente la energía que se almacena en el *GAP*. La función de este elemento debe enfocarse al manejo de la energía que atraviesa el canal de plasma cuando éste desaparece súbitamente y deja de existir un lugar físico en el espacio por el que el nivel de energía alcanzado, hasta antes de la desaparición de dicho canal, descienda sin desestabilizar todo el sistema. Una vez logrado esto, con base a las pruebas mostradas en el capítulo anterior, las descargas podrían ser de la misma energía todo el tiempo.

Otra propuesta con la que podría incrementarse la TRM puede lograrse al aumentar el número de transistores en el sistema. Estos se conectarían en paralelo y funcionarían alternadamente en secuencia. A modo de que el primero generaría una chispa, el segundo generaría la segunda chispa y así consecutivamente hasta volver al primero nuevamente. Con esta implementación podría incrementarse considerablemente la frecuencia de maquinado sin que el calentamiento debido a las pérdidas por conmutación se reflejen en un solo transistor.

El sistema propuesto utiliza muchos potenciómetros, o resistencias variables. Estos elementos cambian su valor óhmico al girar mecánicamente un tornillo. Otra propuesta es la implementación de potenciómetros digitales controlados por un microcontrolador o dispositivos programables similares que den salida a *displays* que digan al usuario los valores resultantes del cambio del valor resistivo. Esta implementación agilizaría el uso del sistema para un usuario final.

Referencias

- [1] Gowri, S., Ranjith Kumar, P., Vijayaraj, R. and Balan, A.S.S. (2007) 'Micromachining: technology for the future', *Int. J. Materials and Structural Integrity*, Vol. 1, Nos. 1/2/3, pp.161–179.
- [2] Camprubí Graell, Albert. **Electro-erosión. Fundamentos de su Física y su Técnica**. Ed. Marcombo, Ediciones Técnicas 2007, España. Alfaomega Grupo Editor, México.
- [3] D.T. Pham, S.S. Dimov. **Micro-EDM—recent developments and research issues**. *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) 50–57.
- [4] L. Ruiz-Huerta, A. Caballero-Ruiz. **Diseño de una Micromáquina Herramienta de EDM**. Memorias del 8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica.
- [5] Y.S. Wong, M. Rahmana. **Investigation of micro-EDM material removal characteristics using single RC-pulse discharges**. *Journal of Materials Processing Technology* 140 (2003) 303–307. Mechanical Engineering Department, 10 Kent Ridge Crescent, National University of Singapore.
- [6] Z. Katz, C.J. Tibbles. **Análisis of micro-scale EDM process**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 25. Números 9-10. Páginas. 923-928. Mayo del 2005. ISSN: 0268-3768 (Versión impresa), 1433-3015 (Versión en línea)
- [7] R. Casanueva, M. Ochoa, F. J. Azcondo and S. Bracho, **Current Mode Controlled LCC Resonant Converter for Electrical Discharge Machining Applications**, in *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vol. 2, pp. 505-510, 2000.
- [8] B. Sen, N. Kiyawat. **Developments in Electric Power Supply Configurations for Electrical-Discharge -Machining (EDM)**. Mechanical Engineering Department, Haldia Institute of Technology, Haldia, India.
- [9] Kussul, E., T. Baidyk, A. Caballero, y G. Velasco. **Development of Low-Cost Microequipment**. *International Symposium on Micromechatronics and Human Science*. IEEE, Páginas 125-134 ISBN: 0-7803-7611-0, 2002.
- [10] Oberg, Erick. Jones, Franklin D. Horton, Holbrook L. y Ryffel, Henry H. **Machinery's Handbook. 28th Edición**. Industrial Press. Nueva York. 2008. Páginas 1304 y 1305.
- [11] Okada, J.A. McGeough., D. MacMillan., B. Flynn. **Machining Characteristics of EDM by Radio-frequency Plasma**. *Anales del CIRP* Vol. 55/1/2006.
- [12] Schwartz, Mel. **Encyclopedia of Materials, Parts, and Finishes**. CRC Press, 2da edición. 202. Sección E. ISBN 1566766

- [13] Arantes, Luciano José. **Evaluación de Superficies Maquinadas por Descargas eléctricas Utilizando Diferentes Fluidos Dieléctricos.** Ingenierías, Julio-Septiembre 2003, Vol. VI, No. 20. Universidad Federal de Uberlândia, Brasil.
- [14] Fleming, Ben. **The EDM How-To Book.** Fleming Publications. Estados Unidos 2005.
- [15] Casanueva, Rosario. **Analisis, Desing and Experimental Resulsts of a High-Frequency Power Supply for Spark Erosion.** IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, No. 2. Marzo 2005. Páginas. 361-369.
- [16] Fuzhu, Han. Shinya, Wachi. **“Improvement of machining characteristics of micro-EDM using transistor type isopulse generator and servo feed control”.** Precision Engineering Vol. 28 (2004) Páginas 378–385.
- [17] Y.K. Wang., B. Y. Song. **Research on Highly Efficient EDM Pulse Power Supply and its Experiments.** Key Engineering Materials Vols. 291-292. Agosto de 2005. Páginas 567-572.
- [18] S. C. Di., D. B. Wei. **Research on Energy Saving EDM Pulsed Power Supply ith Cyclically Superimposed Chopper Circuit.** Key Engineering Materials Vols. 315-316. Julio de 2006. Páginas 516-520.
- [19] Malhotra, Navdeep., Singh, Hari. **Improvements in Performance of EDM-A Review.** Southeastcon, 2008. IEEE. ISBN: 978-1-4244-1883-1.
- [20] Mu-Tian, Yan., Tsung-Liang Chiang. **Design and experimental study of a power supply for micro-wire EDM.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 40, Números 11-12. Páginas 1111-1117. Febrero de 2009. ISSN: 0268-3768 (Versión impreso) 1433-3015 (Versión en línea).
- [21] Odulio, C.M.F., Sison, L.G., Escoto, M.T. **Energy-saving Flyback Converter for EDM Applications.** TENCON 2005 IEEE Region 10. Noviembre de 2005. ISBN: 0-7803-9311-2.
- [22] S. P. Moylan, S. Chandrasekar, G. L. Benavides. **High-Speed Micro-Electro-Discharge Machining.** (2005) Sandia National Laboratories.
- [23] Boylestad, R., Nashelsky, L. **Electronic Devices and Circuit Theory.** Séptima edición. Ed. Prentice Hall. Páginas: 211.
- [24] Alberto Caballero-Ruiz, Leopoldo Ruiz-Huerta, Tatiana Baidyk, Ernst Kussul. **Geometrical error analysis of a CNC micro-machine tool.** Mechatronics Vol. 17. 2007. Páginas 231–243.
- [25] <http://www.cinstrum.unam.mx/secciones/depar/sub1/micme/micm.html>
- [26] <http://www.smaltec.com/applications.cfm>

Anexo I. Materiales Comunes para Herramienta y Pieza de Trabajo en EDM.

Herramienta	Polaridad del Electrodo	Material de la pieza de trabajo	Desgaste de las orillas (%)	Capacitancia
Cobre	+	Acero	2-10	No
Cobre	+	Inconel	2-10	No
Cobre	+	Aluminio	<3	No
Cobre	-	Titanio	20-40	Sí
Cobre	-	Carburo	35-60	Sí
Cobre	-	Cobre	34-45	Sí
Cobre	-	Cobre-tungsteno	40-60	Sí
Cobre-tungsteno	+	Acero	1-10	No
Cobre-tungsteno	-	Cobre	20-40	Sí
Cobre-tungsteno	-	Cobre-tungsteno	30-50	Sí
Cobre-tungsteno	-	Titanio	15-25	Sí
Cobre-tungsteno	-	Carburo	35-50	Sí
Grafito	+	Acero	<1	No
Grafito	-	Acero	30-40	No
Grafito	+	Inconel	<1	No
Grafito	-	Inconel	30-40	No
Grafito	+	Aluminio	<1	No
Grafito	-	Aluminio	10-20	No
Grafito	-	Titanio	40-70	No
Grafito	-	Cobre	N/A	Sí

▲ **Tabla A.1.** Tipos de Electrodos Usados para Varios Materiales de Piezas de Trabajo [10].

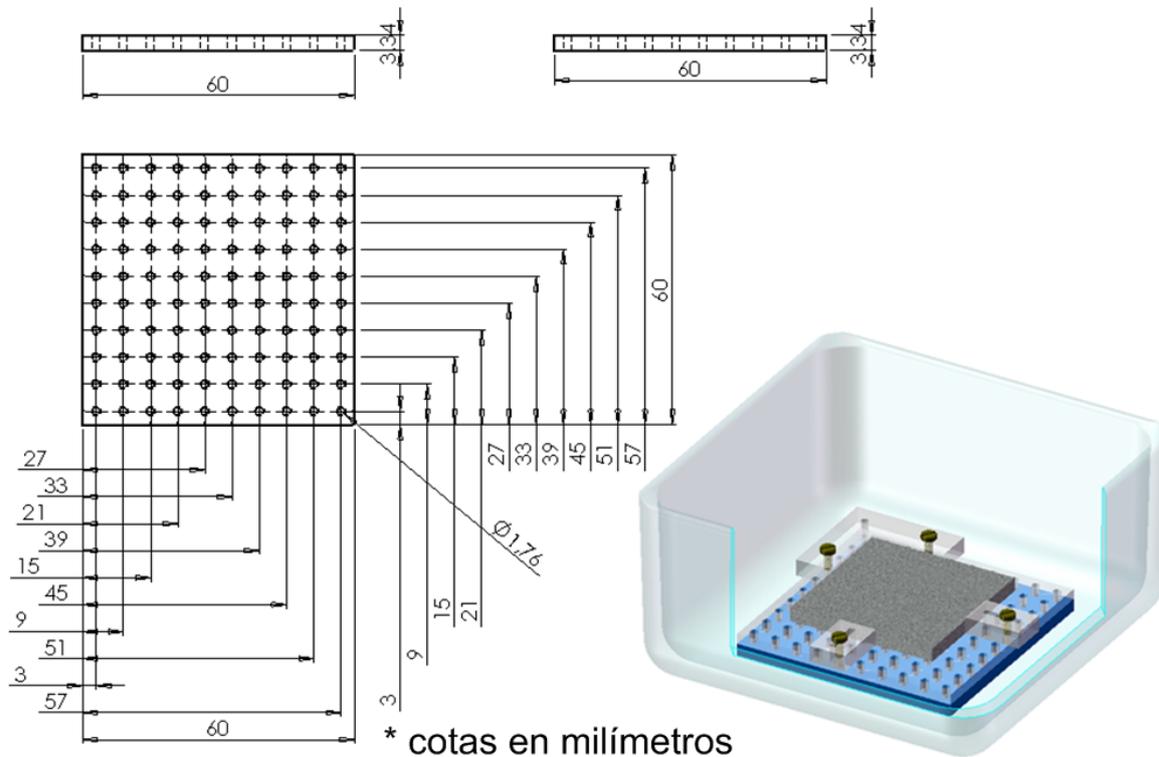
Material	Gravedad Especifica	Punto de Fusión		Temperatura de Vaporización		Conductividad (Plata = 100)
		°F	°C	°F	°C	
Aluminio	2.70	1220	660	4442	2450	63.00
Bronce	8.40	1710	930	...	...	...
Cobalto	8.71	2696	1480	5520	2900	16.93
Cobre	8.89	1980	1082	4710	2595	97.61
Grafito	2.07	N/A		6330	3500	70.00
Inconel (austenitos níquel-cromo)	...	2350	1285	...		...
Magnesio	1.83	1202	650	2025	1110	39.40
Manganeso	7.30	2300	1260	3870	2150	15.75
Molibdeno	10.20	4748	2620	10,040	5560	17.60
Níquel	8.80	2651	1455	4900	2730	12.89
Acero fenicada	7.80	2500	1371	...		12.00
Acero de carbono	...	2730	1500	...		...
Acero para herramientas	...	2730	1500	...		...
Acero inoxidable	...	2750	1510	...		...
Titanio	4.50	3200	1700	5900	3260	13.73
Tungsteno	18.85	6098	3370	10,670	5930	14.00
Zinc	6.40	790	420	1663	906	26.00

▲ **Tabla A.2.** Características de los Materiales comunes como pieza de trabajo en EDM [10].

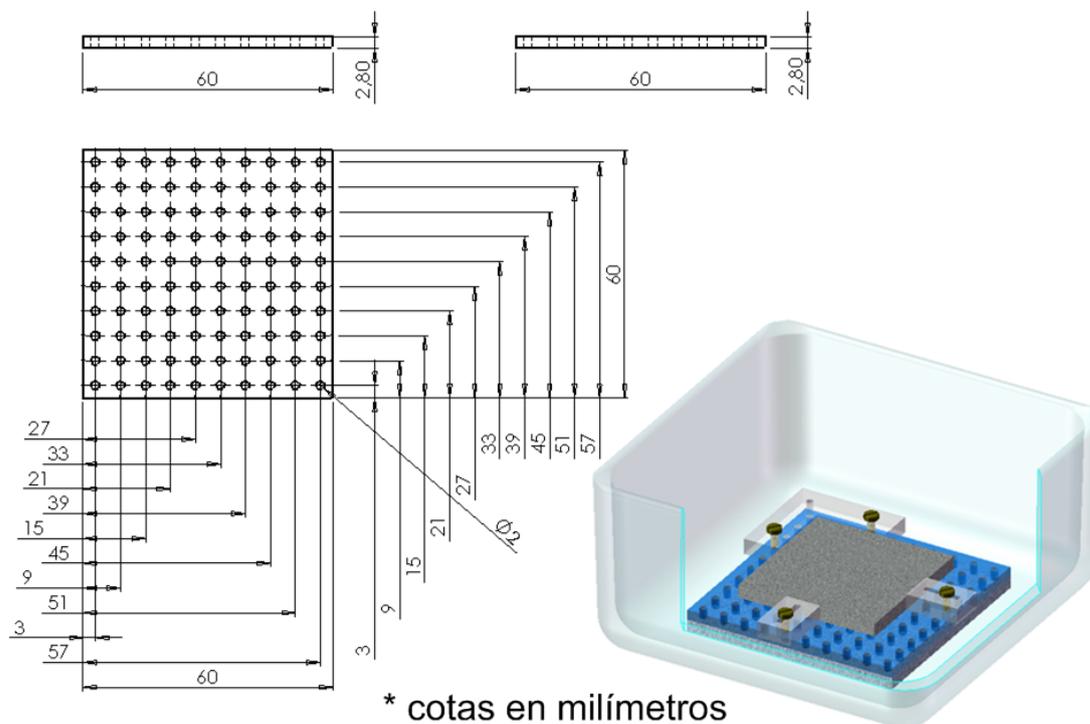
N/A: No aplica.

Anexo II. Planos del Sistema de Sujeción de Piezas de Trabajo para el Centro de μ EDM Desarrollado por el GMM.

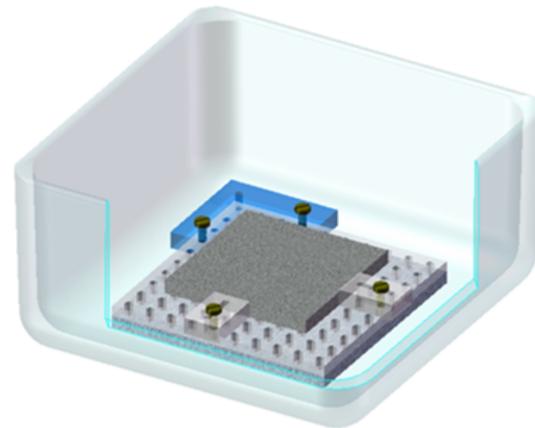
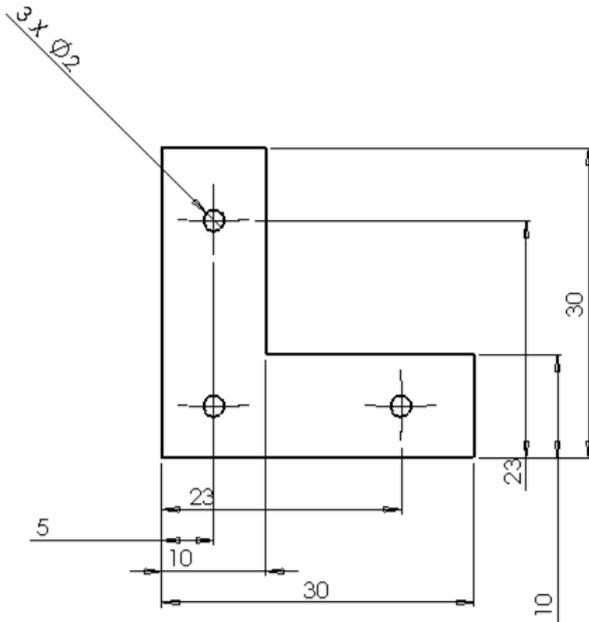
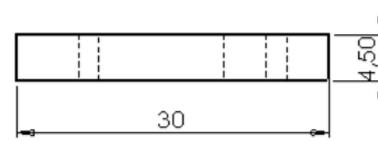
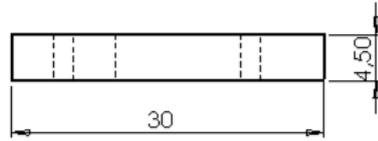
Placa de aluminio



Placa de acrílico

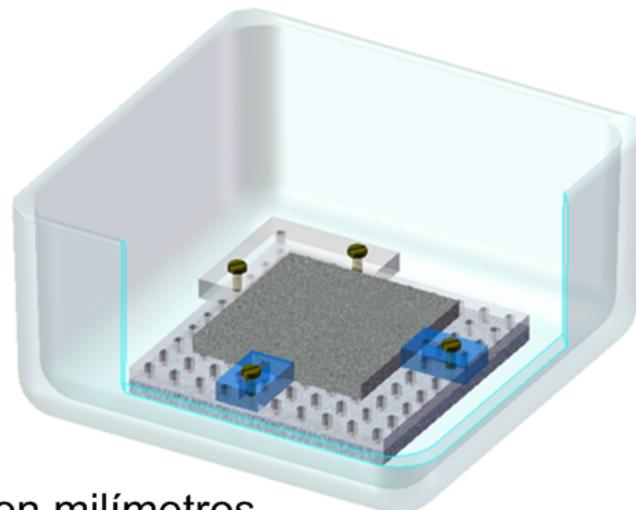
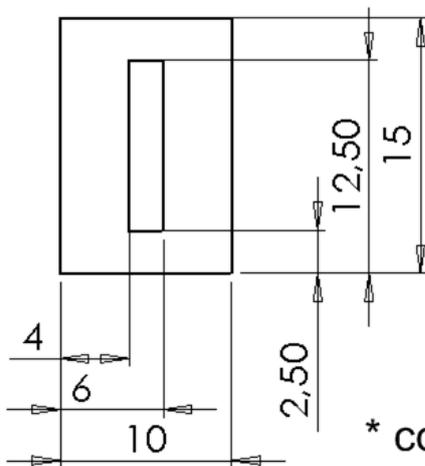
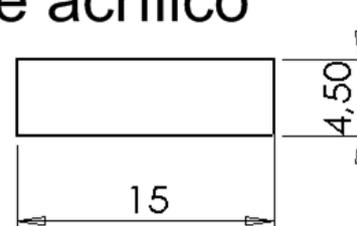
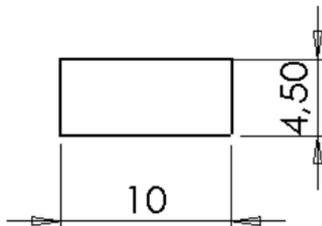


Escuadra de acrílico (sujetador)



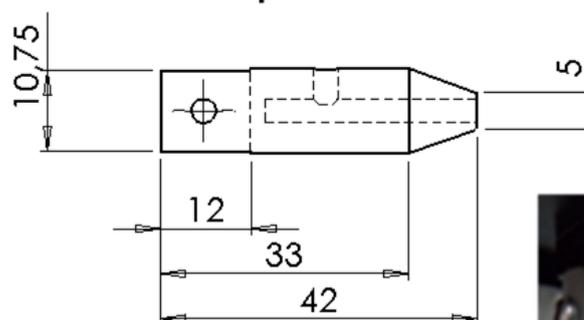
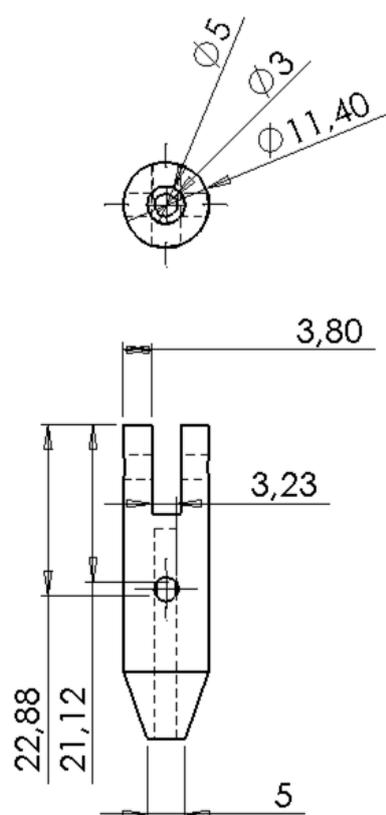
* cotas en milímetros

Sujetador de acrílico



* cotas en milímetros

Acoplamiento servomotor-portaelectroco



* cotas en milímetros

Glosario

- μ EDM: Micromaquinado por electroerosión.
- μ M-H: Micromáquina herramienta.
- μ WEDM: Micromaquinado por electroerosión con hilo. Del inglés Microwire electro discharge machining.
- Ω : Ohm. Unidad de resistencia eléctrica.
- A: Ampere. Unidad para medir corriente eléctrica.
- AFM: Del inglés Atomic Force Microscopy. Microscopio o microscopía de fuerza atómica.
- APFC: Del inglés Active Factor Corrector. Corrector de Factor de Potencia Activo.
- BJT: Del inglés Bipolar Junction Transistor. Transistor de Juntura Bipolar.
- CCADET: Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico.
- CD: Corriente Directa
- Circuito RC: Circuito de relajación con elementos resistivo y capacitivo conectados en serie.
- Circuito RC: Circuito de relajación con un elemento resistivo conectado en serie a un elemento capacitivo.
- CLC: Circuito Lógico Combinacional
- CNC: Máquina de control numérico. Del inglés Computer Numerical Control.
- D (en el transistor): DRAIN o drenaje de los transistores de tipo FET. Análogo al colector del BJT.
- EDM: Maquinado por electroerosión. Del inglés Electro discharge machining.
- FES: Facultad de Estudios Superiores.
- FET: Del inglés Fiel Effect Transistor. Transistor de efecto de campo.
- Fm: Frecuencia de maquinado.
- G (en el transistor): GATE o compuerta de los transistores de tipo FET. Análogo a la base del BJT.
- GAP: Espacio entre la herramienta y la pieza de trabajo más cercano cuando una descarga eléctrica se produce [10].
- GMM: Grupo de Micromecánica y Mecatrónica.
- GND: Del inglés Groud. Tierra del circuito, o bien, su referencia de potencial.
- IGBT: Del inglés Insulated Gate Bipolar Transistor, Transistor Bipolar de Compuerta Aislada.
- LCC: Bobina-Capacitor-Capacitor
- MEMS: Del inglés Microelectromechanical System. Sistema microelectromecánico.
- MOSFET: Del inglés Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor. Transistor de efecto de campo de semiconductor de metal-óxido.
- PCB: Del inglés Printed Circuit Board. Tarjeta de circuito impreso.
- PWM: Del inglés Pulse-Width Modulation, modulación por ancho de pulso.

- S (en el transistor): SOURCE o fuente de los transistores de tipo FET. Análogo al emisor del BJT.
- t_f : Del inglés time fall. Tiempo de transición de una señal para pasar de un nivel alto a bajo.
- t_{PHL} : Del inglés Time of Logic Input to Drive Output Rise. El tiempo de propagación de la señal de entrada para pasar de un estado alto a un estado bajo a la salida.
- t_{PLH} : Del inglés Time of Logic Input to Drive Output Fall. El tiempo de propagación de la señal de entrada para pasar de un estado bajo a un estado alto a la salida.
- t_r : Del inglés time rise. Tiempo de transición de una señal para pasar de un nivel bajo a un alto.
- TRM: Tasa de remoción de material.
- V: Volt. Unidad para medir diferencia de potencial eléctrico.
- V_{CAP} : Voltaje del capacitor de la fuente RC realizada en esta tesis.
- V_{CC} : Voltaje de polarización de corriente directa.
- V_{comp1} : Salida del comparador de voltaje NE529 dedicado a detectar una condición de chispa o arco en el GAP.
- V_{comp2} : Salida del comparador de voltaje NE529 dedicado a detectar una condición de cortocircuito en el GAP.
- V_{DC} : Voltaje de polarización de corriente directa.
- V_{GAP} : Voltaje de CD para maquinar. Voltaje de ionización del medio dieléctrico.
- V_{GS} : Voltaje entre las terminales Gate y Source del MOSFET. Voltaje de encendido del dispositivo.
- VMOS: Del inglés V-Shaped MOS.
- V_{REF1} : Voltaje de referencia fijo proporcionado por el circuito integrado LM336. Voltaje para detectar una condición de chispa o arco en el GAP.
- V_{REF2} : Voltaje de referencia fijo proporcionado por el circuito integrado LM336. Voltaje para detectar una condición de cortocircuito en el GAP.
- V_{Umbral} : Voltaje de comparación. Cercano al mismo voltaje de ionización del medio dieléctrico dividido.
- τ : Tiempo de carga al 63.23% de la carga total del capacitor.