

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO



DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MAQUINADO  
POR DESCARGA ELÉCTRICA EN AGUA

TESIS

Para obtener el grado de  
**Maestro en Ingeniería Mecánica**

Presenta:

**Ing. José Abraham Loredo Ramírez**

Asesor:

**Dr. Hugo Iván Medellín Castillo**







UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ

21 de julio de 2011

**ING. JOSÉ ABRAHAM LOREDO RAMÍREZ**  
**P R E S E N T E. –**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Hugo Iván Medellín Castillo** Asesor de la Tesis, que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestría en Ingeniería Mecánica**. Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 21 de julio del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MAQUINADO POR DESCARGA ELÉCTRICA EN AGUA”**

INTRODUCCIÓN.

- I. ESTADO DEL ARTE DEL MAQUINADO POR DESCARGA ELÉCTRICA.
- II. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA MÁQUINA.
- III. DESARROLLO DEL SISTEMA MECÁNICO.
- IV. DESARROLLO DEL SISTEMA DE POTENCIA.
- V. DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL.
- VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.


CONCLUSIONES.

APÉNDICE.

BIBLIOGRAFÍA.

**“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”**

**A T E N T A M E N T E**

  
**ING. ARMANDO VIRAMONTES ALDANA**  
**DIRECTOR**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCION



**FACULTAD  
DE INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria • CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336  
www.uaslp.mx



## Dedicatoria

*A mis padres Bertha y Abraham por sus consejos y apoyo incondicional para el logro de mis metas*

*A mi esposa Araceli por su comprensión y apoyo durante este proceso*

*Y por último al motor que me impulsa a alcanzar nuevas metas, mi hijo Iker*

## Agradecimientos

*A mi asesor, Dr. Hugo I. Medellín Castillo por su valiosa colaboración durante este importante proceso*

*A mi compañero y amigo Dr. Rodrigo Loera por compartir desinteresadamente su conocimiento*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México por la beca otorgada para la realización de los estudios de Posgrado*

*A todos los integrantes de este posgrado por la riqueza intelectual y humana ofrecida durante mi formación profesional*



# Índice

<b>Índice.....</b>	<b>i</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>v</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>x</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>xi</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
Antecedentes.....	1
Planteamiento del proyecto de tesis.....	2
Objetivos de la tesis.....	3
Organización de la tesis.....	3
<b>1. Estado del arte del maquinado por descarga eléctrica.....</b>	<b>4</b>
1.1. Maquinado por descarga eléctrica EDM.....	4
1.2. Parámetros del maquinado EDM.....	6
1.2.1. Electrodo de la herramienta.....	6
1.2.1.1. Materiales.....	6
1.2.1.2. Desgaste del electrodo.....	7
1.2.2. Dieléctrico.....	8
1.2.3. Frecuencia.....	10
1.2.4. Corriente.....	11
1.2.5. Polaridad.....	11
1.3. Factores de selección del proceso EDM.....	11
1.3.1. Velocidad de remoción de material (MRR).....	12
1.3.2. Diámetro de sobre corte.....	12

1.4. Factores de diseño para el producto.....	13
1.4.1. Precisión.....	13
1.4.2. Estreches.....	13
1.4.3. Acabado superficial.....	13
1.5. Sistemas EDM.....	14
1.5.1. Sistema básico EDM.....	14
1.5.2. Sistema EDM CNC de alambre continuo.....	16
1.6. Modelado EDM.....	17
1.6.1. Análisis dimensional.....	17
1.6.2. Modelos matemáticos.....	17
1.6.3. Redes neuronales artificiales.....	18
1.7. Maquinado por electro descarga EDM en Agua.....	19
1.8. Ejemplos de máquinas EDM industriales.....	21
1.8.1. Mini electroerosionadoras.....	21
1.8.2. Barrenadoras por electroerosión.....	22
1.8.3. Electroerosionadoras.....	23
1.8.4. Electroerosionadoras de penetración.....	24
<b>2. Diseño conceptual de la máquina.....</b>	<b>25</b>
2.1. Planteamiento del problema de diseño.....	25
2.1.1. Datos de funcionamiento.....	25
2.1.2. Especificaciones técnicas.....	25
2.1.3. Especificaciones deseables.....	25
2.1.4. Criterios de diseño.....	26
2.2. Diseño conceptual.....	26
2.2.1. Abstracción para el conocimiento de los problemas principales.....	27
2.2.2. Planteamiento de soluciones.....	29
2.2.3. Evaluación de las soluciones de las funciones.....	31
2.3. Concepto final.....	32
<b>3. Desarrollo del sistema mecánico.....</b>	<b>34</b>



3.1. Mecanismo de avance vertical “z”.....	34
3.1.1. Modelado del mecanismo de avance.....	35
3.1.1.1. Par de giro de la carga.....	35
3.1.1.2. Par de giro de las guías.....	37
3.1.1.3. Par de giro de los rodamientos.....	37
3.1.1.4. Par de giro total.....	37
3.1.1.5. Inercia de la carga.....	38
3.1.2. Modelado total del mecanismo de avance.....	39
3.1.3. Diseño del mecanismo de avance.....	39
3.2. Diseño del Bastidor.....	42
3.3. Tanque contenedor.....	43
3.4. Sistema de bombeo y filtrado.....	45
3.5. Sistema de sujeción de piezas.....	47
3.6. Ensamble del sistema.....	48
<b>4. Desarrollo del sistema de potencia.....</b>	<b>50</b>
4.1. Circuitos generadores de potencia.....	50
4.1.1. El circuito de relajación (RC).....	50
4.1.2. Circuito generador de pulsos.....	53
4.1.3. Inversor resonante de puente completo DC serie paralelo.....	54
4.1.4. Generador de transistor tipo isopulso y alimentación servo controlada.....	55
4.1.5. Sistema de potencia por fuente regulada de voltaje y circuito generador de pulsos de descarga.....	57
4.2. Diseño de la fuente de voltaje.....	59
4.2.1. El convertidor CC-CC.....	59
4.2.2. Diseño del regulador reductor en modo de conmutación.....	62
4.2.3. Aplicación al diseño de la fuente CC-CC.....	66
4.2.3.1. Selección del inductor.....	67

4.2.3.2.	Selección del capacitor.....	70
4.2.3.3.	Selección del capacitor de entrada.....	72
4.2.3.4.	Selección del diodo.....	73
4.2.3.5.	Selección del IGBT.....	73
4.2.4.	Modulación de ancho de pulso para la fuente.....	75
4.2.5.	Conceptos básicos de control automático.....	77
4.2.6.	Función de transferencia de la fuente.....	79
4.2.7.	Descripción de elementos para la etapa de control.....	82
4.2.7.1.	Sensor.....	82
4.2.7.2.	Filtro.....	82
4.2.7.3.	Controlador proporcional integral.....	83
4.2.7.4.	Comparador.....	84
4.2.8.	Diseño del controlador basado en la respuesta en frecuencia.....	85
4.2.8.1.	Análisis de la respuesta en frecuencia.....	85
4.2.8.2.	Trazas de bode.....	85
4.2.8.3.	Márgenes de fase y de ganancia.....	86
<b>5.</b>	<b>Desarrollo del sistema de control.....</b>	<b>90</b>
5.1.	Sistema de control.....	90
5.2.	Adquisición de señales en LabView .....	91
5.2.1.	Adquisición de nivel de voltaje.....	91
5.2.2.	Adquisición de frecuencia.....	91
5.2.3.	Adquisición de nivel de corriente de las descargas.....	91
5.3.	Sistema de control de avance en LabView.....	92
5.3.1.	Efectos de los términos PID en el control de avance.....	95
<b>6.</b>	<b>Análisis y discusión de resultados.....</b>	<b>100</b>
	<b>Conclusiones.....</b>	<b>113</b>
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>115</b>
	<b>Apéndice.....</b>	<b>121</b>
	Diagramas mecánicos.....	A

# Lista de figuras

<i>Figura 1-1. Principio básico de maquinado por electro descarga.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 1-2. Características de las descargas con diferentes frecuencias para una misma corriente.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 1-3. Acabado superficial en función de la frecuencia y corriente.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 1-4. Características generales de una máquina de electro descarga.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 1-5. Categorías de máquinas EDM.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 1-6. Principio de máquina EDM CNC de alambre continuo.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 1-7. Mini electroerosionadora.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 1-8. Barrenadoras por electroerosión.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 1-9. Ejemplos de maquinados en barrenadora por electroerosión.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 1-10. Electroerosionadoras.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 1-11. Electroerosionadoras de penetración.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 1-12. Ejemplos de piezas fabricadas con electroerosión.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2-1. Diagrama de funciones para la máquina EDM.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2-2. Solución de funciones para máquina EDM.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3-1. Diagrama esquemático del sistema de avance.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3-2. Equilibrio de un segmento diferencial de la tuerca del porta herramientas.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3-3. Mecanismo de avance.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3-4. Curva par-velocidad motor DMX-UMD-23-3.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3-5. Dimensiones generales del mecanismo en mm.....</i>	<i>41</i>

<i>Figura 3-6. Bastidor de máquina EDM fabricado en IPS dimensiones en mm.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3-7. Deposito industrial EDM típico.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3-8. Esquema de tanque contenedor.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3-9. Comportamiento teórico del fluido en el tanque.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3-10. Ensamble de sistema de bombeo y filtrado.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3-11. Sistema de sujeción de piezas.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3-12. Esquema de ensamble de los subsistemas de la máquina EDM.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3-13. Máquina EDM construida.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4-1. Circuito básico de relajación (RC).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4-2. Relación entre voltaje de carga y tiempo.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4-3. a) Circuito básico generador de pulsos, b) característica de descarga.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4-4. Comparación de características de descargas de igual energía producidas por: a) generador RC, b) generador transistorizado.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4-5. Diagrama del circuito del suministro de poder EDM usando un convertidor resonante LCsCp de puente completo.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4-6. Generador transistor tipo isopulso para micro-EDM.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4-7. Servo control de alimentación para generador de pulso RC.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4-8. Servo control de alimentación para el generador transistor tipo isopulso</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4-9. Circuito simplificado de pulsos de descarga.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4-10. Circuito generador de pulsos.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4-11. Característica de la descarga.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4-12. Sistema convertidor CC-CC.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4-13. Conversión CC-CC en modo de conmutación.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4-14. PWM. Señales del comparador.....</i>	<i>61</i>

<b>Figura 4-15.</b> Convertidor reductor CC-CC con filtro pasa bajas.....	62
<b>Figura 4-16.</b> Circuito regulador reductor.....	62
<b>Figura 4-17.</b> Regulador reductor en modo de conmutación, a) Diagrama de circuito. b) circuitos equivalentes. c) formas de onda.....	63
<b>Figura 4-18.</b> Circuito del convertidor reductor.....	67
<b>Figura 4-19.</b> Grafica de inductancia $L$ para diferentes rangos de $V_{OUT}$ e $I_{OUT}$ .....	68
<b>Figura 4-20.</b> RCC mínima para todo el rango de operación en función del ciclo de trabajo $k$ .....	69
<b>Figura 4-21.</b> Comportamiento típico de Voltaje de salida contra el capacitor de salida y el ESR.....	71
<b>Figura 4-22.</b> Circuito de generación PWM.....	75
<b>Figura 4-23.</b> Implementación de Modulación de Ancho de Pulso.....	75
<b>Figura 4-24.</b> Efecto de cambiar la señal de referencia a) referencia alta b) referencia baja.....	76
<b>Figura 4-25.</b> Diagramas de bloques que muestran las relaciones entre las diferentes partes del sistema: a) Para un sistema en lazo abierto; b) Para un sistema en lazo cerrado.....	77
<b>Figura 4-26.</b> Circuito convertidor reductor.....	79
<b>Figura 4-27.</b> Circuito convertidor reductor en $S=1$ .....	79
<b>Figura 4-28.</b> Circuito convertidor reductor en $S=0$ .....	80
<b>Figura 4-29.</b> Filtro pasa bajas.....	82
<b>Figura 4-30.</b> Esquema de un controlador PI.....	83
<b>Figura 4-31.</b> Comparador.....	84
<b>Figura 4-32.</b> Diagrama de control de bloques.....	84
<b>Figura 4-33.</b> Margen de ganancia y margen de fase sobre las trazas de Bode.....	87

<i>Figura 4-34. Diagrama de control de bloques</i> .....	88
<i>Figura 4-35. Determinación del margen de fase y margen de ganancia para el controlador PI</i> .....	88
<i>Figura 4-36. Determinación del margen de fase y margen de ganancia para el sistema completo</i> .....	89
<i>Figura 5-1. Esquema de control para máquina EDM</i> .....	90
<i>Figura 5-2. Ejemplo de VI</i> .....	93
<i>Figura 5-3. Interface de usuario</i> .....	94
<i>Figura 5-4. Respuesta del servo con ganancia proporcional</i> .....	96
<i>Figura 5-5. Respuesta con incremento de ganancia proporcional</i> .....	97
<i>Figura 5-6. Sistema con fricción</i> .....	98
<i>Figura 6-1. Voltaje de capacitor para el CASO 1</i> .....	103
<i>Figura 6-2. Corriente del inductor CASO 1</i> .....	103
<i>Figura 6-3. Voltaje de capacitor para el CASO 2</i> .....	104
<i>Figura 6-4. Corriente en el inductor CASO 2</i> .....	104
<i>Figura 6-5. Voltaje de capacitor para el CASO 3</i> .....	105
<i>Figura 6-6. Corriente en el inductor CASO 3</i> .....	105
<i>Figura 6-7. Voltaje de capacitor para el CASO 4</i> .....	106
<i>Figura 6-8. Corriente en el inductor CASO 4</i> .....	106
<i>Figura 6-9. Voltaje de capacitor para el CASO 5</i> .....	107
<i>Figura 6-10. Corriente en el inductor CASO 5</i> .....	107
<i>Figura 6-11. Voltaje de capacitor para el CASO 6</i> .....	108
<i>Figura 6-12. Corriente en el inductor CASO 6</i> .....	108
<i>Figura 6-13. Voltaje de capacitor para el CASO 7</i> .....	109

---

<i>Figura 6-14. Corriente en el inductor CASO 7.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 6-15. Corriente del inductor en modo de conducción continua, sin carga.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 6-16. Perturbación en el voltaje originada por el inicio de las descargas.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 6-17. Corriente del inductor en modo de conducción continua, sin carga.....</i>	<i>111</i>

# Lista de tablas

<i>Tabla 1-1. Tipos de electrodos usados para diferentes tipos de materiales en las piezas de trabajo.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 1-2. Comparación de dieléctricos de hidrocarburos.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 2-1. Soluciones posibles de las funciones.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 2-2. Tabla de evaluación de la solución recepción de potencia.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3-1. Placa de datos de la bomba.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 5-1. Instrumentos virtuales VI's en LabView.....</i>	<i>92</i>



# Resumen

El maquinado por descarga eléctrica (EDM) es un proceso de maquinado no tradicional ampliamente usado en la producción de moldes y troqueles. Sin embargo, los residuos peligrosos (CO y CH<sub>4</sub>) generados al usar aceite como dieléctrico representan un gran inconveniente del proceso EDM. Una solución a este problema de contaminación es la sustitución de los aceites dieléctricos por agua, lo cual representa una serie de retos nuevos, muchos de los cuales ya han sido resueltos por otros trabajos en la literatura. Actualmente no existe reporte en la literatura de un prototipo de máquina EDM específicamente diseñada para usar agua como dieléctrico; los equipos usados para analizar el proceso EDM en agua son adaptaciones de laboratorio. Por lo tanto, resulta necesario diseñar un equipo EDM específicamente para utilizar agua como fluido dieléctrico, permitiendo realizar caracterizaciones de este proceso mediante el control preciso de las descargas y el avance del electrodo.

En este trabajo se presenta el desarrollo de una máquina EDM en agua tomando como referencia estudios previos sobre la factibilidad de este proceso en agua y las ventajas que esto implica. Dicho desarrollo representa un reto mecatrónico con un alto nivel de complejidad, e involucra el diseño conceptual y de diseño de detalle de los componentes de la máquina, así como del circuito de descarga y el sistema de control de avance. A partir de la propuesta de diseño de los principales sistemas de la máquina, se construye el sistema mecánico para demostrar su manufacturabilidad y funcionamiento mecánico. Sin embargo debido a la complejidad y alcance del trabajo, la construcción de la fuente de potencia y la implementación del sistema de control de avance quedan pendientes de realizar, pues requieren de mayores recursos y un nivel de conocimientos elevado de la electrónica y la programación. A pesar de esta complejidad, la viabilidad de la fuente de potencia y sistema de control propuesto se demuestra mediante el análisis y simulación de los esquemas desarrollados.



# Introducción

En esta sección se presentan los antecedentes generales del proceso de maquinado por descarga eléctrica EDM, haciendo una discusión sobre sus ventajas, desventajas y su aplicación en la industria. Como resultado de estos antecedentes de fabricación no convencional EDM se realiza el planteamiento del proyecto de tesis.

## Antecedentes

El proceso de maquinado por descarga eléctrica (sus siglas en inglés, EDM), también conocido como electroerosión, fue uno de los primeros procesos de fabricación no convencionales en desarrollarse, surgiendo como tal hace unos 50 años en la forma de una sencilla aplicación del proceso EDM por penetración (uno de los dos tipos más importantes del proceso EDM). En general, el proceso EDM puede compararse a lo que sucede cuando un rayo, en mitad de una tormenta, golpea el suelo con toda su fuerza.

La historia del proceso EDM se remonta al periodo de las dos guerras mundiales. Hasta entonces, prácticamente nadie había sido capaz de entrever el potencial de dicha tecnología, ya que se eliminaba igual cantidad de material del electrodo que de la pieza a maquinar y, además, el mecanismo manual que controlaba el avance daba lugar a más situaciones de cortocircuito que de maquinado estable. Durante este periodo inicial, la introducción de un sistema de vibración del electrodo, que mejoraba la tasa de eliminación del material, fue el primer intento de control del espacio entre electrodo y pieza de trabajo (en inglés gap). Pero hubo dos científicos de la antigua Unión Soviética que estaban convencidos de que se podían llevar a cabo muchas más mejoras en esta incipiente tecnología del proceso EDM. Los doctores B. R. y N. I. Lazarenko fueron los científicos rusos que inventaron el circuito de relajación (resistencia- capacitancia), además de un sencillo servo controlador que ayudaba a mantener constante la distancia del gap entre la herramienta y la pieza a maquinar. Lo anterior constituyó un hito crucial en la historia del proceso EDM, ya que hizo que se redujeran las situaciones de cortocircuito y que el proceso se volviera más rentable económicamente.

Los dos tipos de procesos más importantes dentro del proceso EDM son el proceso EDM por penetración y el proceso EDM de corte con hilo. El proceso EDM por penetración fue mejorado hacia el año 1940 con la aparición de los generadores de pulso, las técnicas de movimiento orbital y planetario, el control numérico y el

mecanismo de control. Desde las lámparas de vacío, pasando por los transistores hasta los actuales circuitos de estado sólido, no sólo fue posible controlar el tiempo de pulso, sino que también pudo controlarse el tiempo de pausa. Esto hizo que el circuito empleado en el proceso EDM fuera más preciso y fiable y, por consiguiente, favoreció el crecimiento y la mayor implantación de esta tecnología no convencional.

Había diversos problemas que afrontar a la hora de realizar modelos matemáticos del proceso EDM, tales como la contaminación del gap así como el comportamiento hidrodinámico y termodinámico del fluido de trabajo empleado. Por lo tanto, obtener un modelo matemático que tomara en cuenta todos los resultados obtenidos a partir de la experimentación práctica era bastante difícil. Las investigaciones en el campo del proceso EDM tendieron hacia una vertiente de aplicación más pragmática del proceso. La evolución importante que experimentó el proceso EDM mediante corte por hilo en los años 70 fue debida a la aparición de generadores con mejores prestaciones de potencia, nuevos electrodos de hilo, la mejora de las prestaciones mecánicas y de automatización de las máquinas, así como una mejora también de los procedimientos de limpieza del gap. Así, a lo largo de los años, la velocidad de trabajo del proceso de corte por hilo se ha incrementado hasta 20 veces el valor de la primera aplicación, mientras que los costos de maquinado han disminuido por lo menos, en un 30%. Por otro lado, el acabado superficial se ha mejorado del orden de unas 15 veces mientras que los valores de la corriente de descarga se han multiplicado por 10 veces.

Hoy en día, la investigación del proceso EDM también está encaminada a campos que tienen que ver más con la aplicación de dicha tecnología que con la búsqueda de un modelo unificado. Además, actualmente, el mercado del proceso EDM está en plena etapa de crecimiento, debido a la creciente popularidad del proceso en el sector de los procesos de fabricación no tradicional y la influencia indirecta de las líneas de investigación y desarrollo, llevadas a cabo por diversos laboratorios [1].

## **Planteamiento del proyecto de tesis**

El maquinado EDM es un proceso de maquinado no tradicional ampliamente usado en la producción de moldes y troqueles. Debido a que en el EDM comúnmente se utiliza aceite como fluido dieléctrico, los residuos que se generan (vapores de CO y CH<sub>4</sub>) pueden afectar al ambiente y al ser humano. Para eliminar dicho efecto negativo se ha propuesto en los últimos años el uso de agua como dieléctrico en el EDM, lo cual representa una serie de retos nuevos, muchos de los cuales ya han sido resueltos por otros trabajos de investigación. Los avances en el diseño de fuentes han permitido que

sea posible desarrollar prototipos de máquinas EDM considerablemente pequeñas, económicas y de una mejor calidad en el acabado superficial. Aplicando estas tecnologías y añadiendo el control automático del GAP es posible obtener resultados bastante favorables que contribuyan al desarrollo de estos equipos y por consecuencia a una mayor explotación sin las desventajas de contaminación y tamaño que actualmente presentan estos sistemas.

### **Objetivos de la tesis**

El objetivo general del proyecto de tesis es diseñar un sistema mecatrónico de maquinado por descarga eléctrica con el propósito de ser utilizada en trabajos futuros de investigación del proceso EDM en agua. Para lograr este objetivo, se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Diseñar una fuente de potencia que permita maximizar la velocidad y calidad del maquinado EDM con la posibilidad de modificar las características de la corriente de descarga.
- Realizar una revisión bibliográfica del estado del arte sobre el proceso EDM, las máquinas electroerosionadoras, las fuentes de potencia y sus aplicaciones, así como el control automático de posición.
- Diseñar una máquina EDM práctica y sencilla para su uso en agua como dieléctrico.
- Diseñar un sistema de control automático del GAP (distancia electrodo-pieza).

### **Organización de la tesis**

El presente trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera. En el capítulo 1 se presenta la revisión bibliográfica del estado actual de maquinado EDM, haciendo una síntesis de los principales avances tecnológicos que se tienen al respecto. El diseño conceptual de la máquina EDM se presenta en el capítulo 2. El diseño mecánico, el diseño del sistema de potencia y el diseño del sistema de control de avance se presentan en los capítulos 3, 4, y 5, respectivamente. En el capítulo 6 se muestra el análisis de los resultados, y finalmente se presentan las conclusiones obtenidas con el desarrollo del presente trabajo de tesis.

# Capítulo 1

## Estado del arte del maquinado por descarga eléctrica

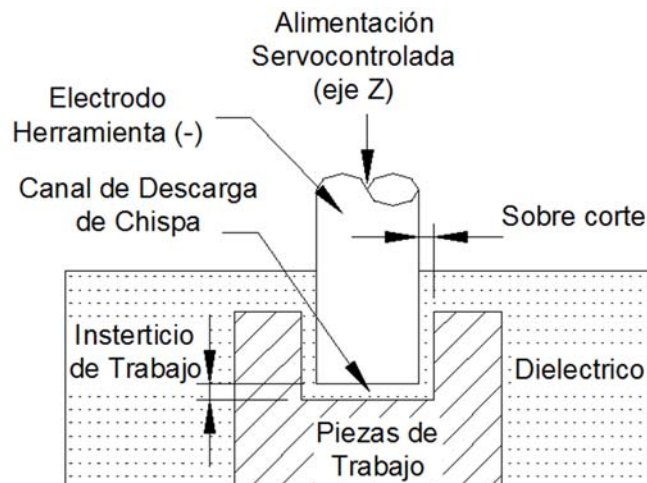
En este capítulo se detalla la descripción del proceso EDM, los elementos que lo componen, los parámetros del proceso, la descripción básica de estos equipos, así como algunos ejemplos de máquinas industriales. También se presentan los trabajos de investigación y avances tecnológicos que se tienen respecto al proceso EDM.

### 1.1 Maquinado por descarga eléctrica EDM

El EDM es un proceso termoeléctrico de remoción de material (figura 1-1), en donde la forma del electrodo es reproducida como espejo dentro del material de trabajo [2]. El proceso EDM se logra con un sistema que consta de dos componentes importantes: la máquina herramienta y el suministro de potencia. La máquina herramienta sostiene el electrodo, el cual avanza hacia el material de trabajo y produce una serie de descargas eléctricas a alta frecuencia. Las descargas son generadas por un sistema eléctrico generador de pulsos, el cual aplica una diferencia de potencial entre el electrodo (herramienta) y el material (pieza) de trabajo que se encuentra sumergido en un fluido dieléctrico.

El voltaje aplicado debe ser suficiente para crear un campo eléctrico de mayor valor que la rigidez dieléctrica del fluido utilizado en el proceso, permitiendo la remoción de material por erosión térmica o vaporización, producto del calor generado por las descargas eléctricas [3]. El fenómeno EDM puede ser dividido en tres etapas principales (figura 1-1): la aplicación de energía eléctrica, ruptura del dieléctrico, generación de chispas, y expulsión (erosión) del material de trabajo [4]. La chispa hace uso de energía eléctrica para erosionar el material de trabajo, convirtiéndola en energía térmica a través de una serie de descargas eléctricas repetitivas entre el electrodo y pieza

de trabajo [5]. La energía térmica genera un canal de plasma entre los dos electrodos, en un rango de temperatura de 8,000 a 12,000 °C, y tan alta como 20,000 °C [6]-[8]. Como el suministro de energía eléctrica se realiza con pulsaciones en el rango de 20,000 a 30,000 Hz, ocurre la ruptura del canal de plasma, resultando en una reducción brusca de temperatura y permitiendo la circulación del fluido dieléctrico el cual desaloja de esta manera el material de trabajo fundido en forma de escombros microscópicos [9]. La fundición y vaporización del material de trabajo se denomina proceso de remoción de material en EDM, y se caracteriza por dejar minúsculos cráteres en la superficie del material de trabajo. El EDM no tiene fuerza de corte y el electrodo herramienta no hace contacto directo con el material de trabajo. Esto elimina la posibilidad de tener tensión mecánica y problemas de vibración, como es prominente en el maquinado tradicional.



**Figura 1-1.** Principio básico de maquinado por electrodescarga.

Las máquinas EDM son altamente especializados y se utilizan principalmente para la producción de perfiles complejos en herramientas de corte de diamante y para dar forma a herramientas de carburo, como herramientas de formado, dados y rodillos de trituración

El circuito eléctrico que produce la chispa entre el electrodo y la pieza es controlado electrónicamente, la longitud de los periodos de encendido y apagado son extremadamente cortos y los operadores lo programan en relación al material del electrodo y la pieza, el dieléctrico, la tasa desalojo, la velocidad de eliminación de metales, y la calidad del acabado superficial requerido. El promedio de corriente que fluye entre el electrodo y la pieza se muestra en un amperímetro de la fuente de alimentación, y es el factor determinante en el tiempo de mecanizado para una operación específica. El voltaje de chispa promedio se muestra en un voltímetro.

## 1.2 Parámetros del maquinado EDM

### 1.2.1 Electrodo de la herramienta

#### 1.2.1.1 Materiales

La selección del material para el electrodo-herramienta depende primeramente de la aplicación específica de corte y el material que está siendo maquinado. Se ha encontrado que el grafito y el cobre son los mejores materiales para uso general. Las aleaciones de zinc y estaño son también comúnmente usadas. El cobre-tungsteno y plata-tungsteno son frecuentemente seleccionados para cortar pequeños orificios o ranuras. Otros factores importantes que deben ser considerados al seleccionar un material del electrodo son la disponibilidad, el costo y las limitaciones prácticas inherentes en procesar los electrodos herramienta en la forma deseada [10].

El cobre con el 5 por ciento de telurio, tiene las mejores propiedades de mecanizado, ésta es la aleación de metal más utilizado. Tungsteno resiste mejor el desgaste que las de latón o el cobre y es más rígido cuando se utiliza en electrodos delgados, pero es caro y difícil de mecanizar. Los electrodos de metal, permiten una superficie más uniforme y un ritmo más lento desgaste, a menudo se prefieren para las operaciones de acabado cuando se requiere un buen acabado. En fin, en las operaciones de acabado, el espacio entre el la superficie del electrodo y la pieza es muy pequeña y existe el peligro de genera arcos continuos de cd, causando picaduras en la superficie. Estas picaduras se producen cuando las partículas desprendidas del electrodo de grafito fino en los cortes no son expulsadas del gap. Si es alcanzado por una chispa, una partícula puede proporcionar un camino para una descarga continua de la corriente que dañara la superficie de trabajo [10].

Algunas combinaciones de materiales para el electrodo y la pieza, la polaridad del electrodo, y la cantidad probable de desgaste en las esquina se muestran en la Tabla 1-1. Las tasas de desgaste de las esquinas indican la capacidad de los electrodos para mantener su forma y se reproducir los detalles finos. La columna capacidad se refiere al uso de condensadores en los circuitos de control para aumentar el impacto de la chispa, sin aumentar la intensidad de corriente. Tales circuitos pueden realizar más trabajo en un momento dado, a expensas de la calidad del acabado superficial y mayor desgaste de los electrodos.



**Tabla 1-1.** Tipos de electrodos usados para diferentes tipos de materiales en las piezas de trabajo.

Electrodo	Polaridad	Material de trabajo	Desgaste en las esquinas (%)
Cobre	+	Acero	2-10
Cobre	+	Inconel	2-10
Cobre	+	Aluminio	<3
Cobre	-	Titanio	20-40
Cobre	-	Carburo	35-60
Cobre	-	Cobre	34-45
Cobre	-	Cobre-tungsteno	40-60
Cobre-tungsteno	+	Acero	1-10
Cobre-tungsteno	-	Cobre	20-40
Cobre-tungsteno	-	Cobre-tungsteno	30-50
Cobre-tungsteno	-	Titanio	15-25
Cobre-tungsteno	-	Carburo	35-50
Carburo	+	Acero3	<1
Carburo	-	Acero	30-40
Carburo	+	Inconel	<1
Carburo	-	Inconel	30-40
Carburo	+	Aluminio	<1
Carburo	-	Aluminio	10-20
Carburo	-	Titanio	70-70
Carburo	-	Cobre	N/A

### 1.2.1.2 Desgaste del electrodo

El desgaste del electrodo (herramienta) toma lugar durante la operación del EDM cuando el electrodo se erosiona debido a la acción de la chispa. La velocidad con la que el electrodo se desgasta debiera ser considerablemente menor que el material de trabajo. En el EDM cada descarga eléctrica de la chispa produce un minúsculo cráter esférico en el material de trabajo por la fundición y vaporización local [11]. El desgaste del electrodo es el problema más difícil cuando se deben mantener contornos complejos en el electrodo para crear complicadas cavidades en las piezas de trabajo sin ángulo de visión. El desgaste del electrodo de latón es de 1:1, esto es, el volumen de material removido de la pieza de trabajo es igual al volumen del electrodo consumido. Como regla general, el desgaste aceptable para los otros electrodos metálicos es cerca de 3:1 o 4:1. El grafito, con el más alto punto de fusión que cualquier material conocido 6300 °F (aproximadamente 3500 °C), podría producir rangos de 5:1 hasta 50:1 [10].

Adicionalmente, la erosión sobre los electrodos es asimétrica, dependiendo principalmente de la polaridad, de la conductividad térmica, de la temperatura de fusión, de la duración e intensidad de las cargas.

Una técnica alternativa del EDM es el modo de operación “sin desgaste”. La técnica emplea un modo de polaridad inversa en que el electrodo de grafito o cobre recibe una carga positiva y la pieza de trabajo la negativa. El EDM sin desgaste resulta en un “gap” (separación) más pequeño electrodo/pieza de trabajo y más elevada temperatura en la superficie de la herramienta. En este caso el desgaste de la herramienta es cero, y es en esta fase que el modo de no-desgaste alcanza el punto más óptimo [10].

Un estudio del maquinado EDM en acero para herramienta En-31 endurecido y templado a 55 HRc se presenta en [12]. El material de trabajo fue maquinado con electrodos de cobre, cobre-tungsteno, latón y aluminio variando la corriente de pulso con polaridad inversa. Para los experimentos fue utilizada una máquina comercial de descarga eléctrica con servo-control (gap constante) y polaridad positiva para el electrodo (polaridad inversa). El diámetro de todos los electrodos fue de 16.0 mm. Se utilizaron dos electrodos de cobre, cobre- tungsteno, latón y aluminio. Se utilizó una profundidad de corte de 10 mm para el maquinado de todos los materiales de trabajo. En los resultados obtenidos se observó que el cobre es comparativamente el mejor material para electrodo, ya que da el mejor acabado superficial, diámetro pequeño de sobre corte, alto MRR y menor desgaste del electrodo. El aluminio es el que sigue al cobre en importancia, y puede ser preferido donde el acabado superficial no es el principal requerimiento.

### 1.2.2 Dieléctrico

El fluido dieléctrico generalmente es un hidrocarburo basado en aceite, aunque pudiera utilizarse agua destilada, queroseno, o aceites de siliconas. Los hidrocarburos son el grupo principal y pueden considerarse según su viscosidad, ver Tabla 1-2.

El dieléctrico tiene tres funciones básicas. La primera y más importante es formar una barrera aislante entre el electrodo y la pieza de trabajo. Esta barrera es la que hace que la fuente de potencia produzca una diferencia de potencial para romper dicha barrera e iniciar el corte. La segunda función del fluido dieléctrico es de refrigeración. Aunque aparentemente no hay calentamiento en la pieza de trabajo, durante el EDM se desarrollan temperaturas muy altas dentro del proceso.

**Tabla 1-2.** Comparación de dieléctricos de hidrocarburos.

Líquido dieléctrico	Temperatura de inflamabilidad °C	Aplicación típica	Observaciones
Alcohol blanco	40	Trabajo pequeño, tolerancias estrechas, definición aguda, por ejemplo cortadores con detalles finos.	Baja viscosidad, útil en aberturas de trabajos pequeños o trabajo fino que no requiera altos valores de MRR.
Parafina	50	Trabajo mediano, por ejemplo moldes de plástico, troqueles, dados de extrusión.	Buen dieléctrico de uso general; barato.
Aceite ligero	130	Trabajos grandes, maquinado de desbaste pesado, como dados.	Se emplea en máquinas EDM de alta potencia; y no se filtra con facilidad.

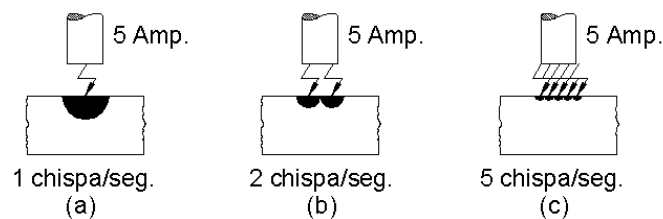
Cada chispa produce un calentamiento capaz de vaporizar una partícula de metal, tomando esta la mayor parte del calor producido, lo cual evita que la pieza de trabajo se caliente. Cuando la chispa ocurre en presencia del refrigerante el metal vaporizado se enfría rápidamente, tomando la forma de una esfera porosa. Sin la presencia del refrigerante en el proceso, las partículas pueden adherirse al electrodo o a la pieza de trabajo transfiriéndole su valor y elevando su temperatura que en ocasiones llega a destruir a ambos. La tercera función del fluido dieléctrico es de limpieza. El fluido limpia la zona del arco, sacando las partículas de metal por medio de presión o de succión. La eficiencia del EDM depende en gran parte de la capacidad de desalojar las partículas de metal de la pieza de trabajo. Si se permite que haya demasiadas partículas, se forma un “puente” y se produce un arco eléctrico que atraviesa la abertura y daña la herramienta y la pieza de trabajo. Por esta razón, es necesario aplicar el fluido de tal forma que haya una circulación continua entre el electrodo y la pieza de trabajo [13]. El fluido se puede aplicar en cuatro formas diferentes, dependiendo del trabajo en particular: presión estándar, presión inversa, succión y vibración.

La influencia de las características de maquinado EDM en metales de titanio puro usando urea en agua destilada como dieléctrico se presenta en [14-17]. En este trabajo se variaron los parámetros de maquinado como es el tipo de dieléctrico, picos de corriente y duración de pulso, con el objeto de explorar sus efectos en el desarrollo del maquinado, incluyendo el MRR, velocidad de desgaste del electrodo (EWR) y rugosidad superficial. Además, la distribución elemental de nitrógeno en la superficie maquinada fue determinada cualitativamente por un micro analizador de rayos X con sonda de electrones (en inglés EPMA) para calcular los efectos en la modificación de la

superficie. Se realizaron exámenes de micro dureza y de resistencia al desgaste para evaluar los efectos de la superficie reforzada. Los resultados experimentales indican que el elemento de nitrógeno descompuesto del dieléctrico que contiene urea se trasladó a la pieza de trabajo, formando una capa dura de TiN, resultando en una buena resistencia al desgaste de la superficie maquinada después del EDM. Los resultados mostraron que los valores de MRR y EWR de dos dieléctricos (solución urea y agua convencional) no mostraron diferencia significativa, en cuanto a rugosidad. El MRR incrementa cuando incrementa la corriente pico, así también, el incremento de la duración del pulso reduce la densidad de energía del punto de descarga expandiendo el canal de plasma. Por lo tanto, el MRR disminuye cuando la duración del pulso aumenta. El mismo fenómeno ocurre con el EWR. Los resultados del análisis por difracción de rayos X mostraron que el TiN fue creado a través de reacción química entre el material de trabajo y el elemento de nitrógeno descompuesto de la solución urea. Así, el EDM con agregado de solución urea al dieléctrico es un proceso factible para la modificación de la superficie.

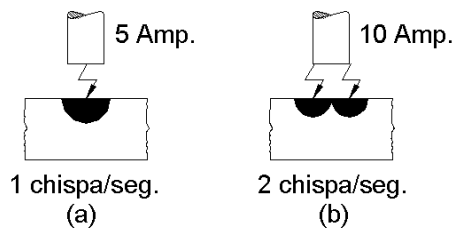
### 1.2.3 Frecuencia

En el EDM un factor determinante del acabado superficial es la frecuencia de las descargas, o sea el número de chispas por segundo entre el electrodo y la pieza de trabajo. En cada fuente de poder se tiene un selector de frecuencia llamado selector de acabados superficiales. Para visualizar la forma en que la frecuencia afecta el acabado, consideremos tres condiciones similares de maquinado en las que la corriente permanece constante, figura 1-2. En la figura 1-2(a), unas chispas/segundo de 5 A remueve un volumen determinado de material. La figura 1-2(b) muestra dos chispas/segundo con la mitad de energía que la del caso de la figura 1-2(a), los cráteres que forman son más pequeños. En la figura 1-2(c) se muestra una corriente de 5 A, pero la frecuencia ha sido aumentada a cuatro chipas/segundo. El volumen total del material removido es igual al del caso de la figura 1-2(a), sin embargo el acabado de la superficie es mucho más fino debido a que la energía por chispas es una cuarta parte del total. También es posible variar el acabado superficial manteniendo la frecuencia constante y variando la corriente.



**Figura 1-2.** Características de las descargas con diferentes frecuencias para una misma corriente.

En algunas fuentes de poder es posible variar la corriente y la frecuencia de descarga, las ventajas que se tienen se pueden deducir de la figura 1-3. Se puede observar en la figura 1-3 que la energía de cada chispa en ambos casos es la misma, por lo que el acabado de la superficie será igual, pero la velocidad de remoción de material para el caso de la figura 1-3(b), es el doble que en el caso de la figura 1-3(a) [18].



**Figura 1-3.** Acabado superficial en función de la frecuencia y corriente.

#### 1.2.4 Corriente

Cuanto mayor es la corriente, mayor es el cráter formado en la pieza de trabajo, con lo cual se forma una superficie más rugosa. Sin embargo, la rugosidad de la superficie no siempre es directamente proporcional a la corriente ya que en la práctica se ha encontrado, en ciertas ocasiones, que doblando la corriente, el acabado no es dos veces más rugoso, sino que más fino [18]. Un alto amperaje deja un cráter de gran diámetro y profundidad [11].

#### 1.2.5 Polaridad

Mediante el intercambio de partículas negativas y positivas, se forma un flujo de corriente en el canal de descarga. Como consecuencia las partículas producen calor cuando se mueven. Además, las partículas cargadas positivamente, por ser una masa mayor, producen más calor a la velocidad máxima de choque. Con el fin de mantener bajo el desgaste del electrodo, se elige la polaridad de tal forma que pueda liberarse la mayor cantidad posible de energía de calor durante el tiempo de descarga sobre la pieza a maquinar. Los electrodos son usados con polaridad negativa para la mayoría de las operaciones de EDM. En impulsos cortos se conecta el electrodo en posición negativa o estándar, lo que equivale a la polaridad negativa. Cuando se trata de impulsos largos se conecta el electrodo en positivo, lo que equivale a polaridad positiva [18].

### 1.3 Factores de desempeño del proceso EDM

Dentro del maquinado por descarga eléctrica existen dos factores de desempeño, uno que determina la velocidad con el material es removido y la otra el sobre corte

durante el proceso. Estos valores dependen de múltiples factores de la pieza, el electrodo y las variables eléctricas durante el maquinado, y sirven como referencia para evaluar el maquinado. A continuación se explica a detalle cada uno de estos factores.

### 1.3.1 Velocidad de remoción de material (MRR)

La velocidad de remoción de material es el volumen de metal removido de una pieza de trabajo durante una hora por ampere de corriente cortado. Dado que la velocidad de remoción es independiente de la densidad de corriente, la velocidad de remoción es directamente proporcional al incremento en el amperaje. La velocidad de remoción de material depende de los siguientes factores: cantidad de corriente del pulso en cada descarga, material del electrodo, material de trabajo y condición de circulación del dieléctrico [9]. Con frecuencia alta de la chispa, la erosión de chispa brinda grandes velocidades de remoción de material. La profundidad del cráter define el acabado superficial que depende de la corriente, frecuencia, y acabado del electrodo. Las velocidades de remoción de material y acabado superficial son controladas por la frecuencia y para menores valores de amperaje se obtiene un mejor acabado superficial [14]. Un estudio realizado [19] reveló que al agregar cerca de 4g/l de polvo de grafito fino en queroseno incrementa el MRR un 60% y el desgaste del electrodo en un 15%. En [20] se presentaron los efectos que tiene el mezclar polvo conductivo con el dieléctrico, como el polvo de Al, en la distancia del gap, rugosidad superficial, rango de remoción de material, desgaste relativo del radio del electrodo, y forma de onda del voltaje. La eficiencia de maquinado y rugosidad superficial del EDM en el maquinado áspero fue estudiada por Zhao [21] usando Al con 40 g/l y 10mm de granularidad. Descubrieron que la eficiencia de maquinado fue mejorada de 2.06 a 3.4 mm<sup>3</sup>/min con un rango de incremento del 70%. En [22] se encontró que el MRR más alto es producido por cromo y 70-80nm de tamaño de grano. Por otro lado, en [23] se encontró que la cantidad apropiada de polvo de grafito en el fluido dieléctrico causa una notable mejoría en el MRR y desgaste del electrodo, así como en la rugosidad superficial.

### 1.3.2 Diámetro de sobre corte

El diámetro de sobre corte (precisión dimensional) es la diferencia de tamaño o hueco entre la pieza de trabajo y el electrodo. Esto constituye un factor que debería ser considerado en el diseño del electrodo. La cantidad de sobre corte es predecible y puede ser controlado dentro de 0.002 a 0.005 pulgadas. (0.05 a 0.13mm) por lado. La cantidad de sobre corte es uniforme en alguna posición a lo largo de la cara del electrodo sin consecuencia de su configuración o tamaño [10]. El diámetro de sobre corte se torna importante cuando se requieren componentes con tolerancias cerradas para producir

componentes en aplicaciones espaciales y también en herramientas, dados y moldes para trabajo a presión, moldes de plástico y dados de forja. El EDM no induce ninguna tensión mecánica durante el proceso de maquinado por lo que provee una ventaja adicional en la manufactura de productos de formas elaboradas y complejas [24].

#### **1.4 Factores de diseño para el producto**

Debe reconocerse que los valores siguientes pueden no ser aplicables en ejemplos específicos pero se incluyen para dar una idea de los valores que es posible experimentar en la práctica. Estos factores toman su peso al momento de diseñar una pieza que será obtenida mediante este proceso para garantizar las dimensiones y tolerancias requeridas.

##### **1.4.1 Precisión**

En EDM la precisión se refiere a las tolerancias geométricas que pueden ser alcanzadas mediante este proceso. Por lo general, se pueden obtener tolerancias en el orden de  $\pm 0.002$  a  $0.005$  pulgadas. ( $\pm 0.05$  a  $0.13$  mm), y mediante un control estrecho se puede obtener tolerancias de  $\pm 0.005$  a  $0.01$  mm.

##### **1.4.2 Estrechez**

El corte abierto en la pieza de trabajo es siempre más grande que la herramienta de corte. A menos que se lleven a cabo las precauciones adecuadas, un espacio pequeño o estrecho está siempre presente en los lados de agujeros y cavidades. En muchos casos, la estrechez puede ser mantenida a menos de  $0.002$  pulgadas ( $0.05$  mm) por pulgadas de profundidad por lado.

##### **1.4.3 Acabado superficial**

Los factores que afectan el acabado de la pieza de trabajo son: (1) la constante dieléctrica de la chispa en el gap, (2) la magnitud de la carga almacenada en el capacitor, y (3) la naturaleza del material de la pieza de trabajo que está siendo erosionada. La rugosidad superficial es el resultado de una multitud de cráteres individuales u hoyos superpuestos unos con otros, causados por las chispas individuales de maquinado. Bajo condiciones normales de corte, el acabado superficial del EDM es parecido a una superficie no direccional y su rango es de  $50$  a  $150$  milésimas de pulgada. [10]. La rugosidad superficial y precisión dimensional del material de trabajo por la chispa erosionada depende de la corriente de descarga, materiales del electrodo y polaridad del

electrodo [25]. El acabado superficial es importante en el caso de herramientas y dados para operaciones de moldeo como dibujo.

## 1.5 Sistemas EDM

En el libro publicado en 1994, Rajurkar [11] ha señalado algunas de las tendencias futuras en el EDM: el mecanizado de materiales avanzados de mayor dureza, el acabado superficial espejo, el uso de aditivos en polvo, EDM asistida por ultrasonidos y el control, y la automatización.

Sin embargo, la revisión presentada se centra en las tendencias actuales de la investigación EDM realizada por investigadores en el mecanizado. Vibración ultrasónica, EDM en seco, EDM con aditivos en polvo y técnicas de modelización en la predicción del rendimiento EDM. En cada tema se presentan las actividades realizadas por los investigadores y el desarrollo que aporta a las tendencias actuales. Dejando fuera el maquinado por electro descarga por hilo.

### 1.5.1 Sistema básico EDM

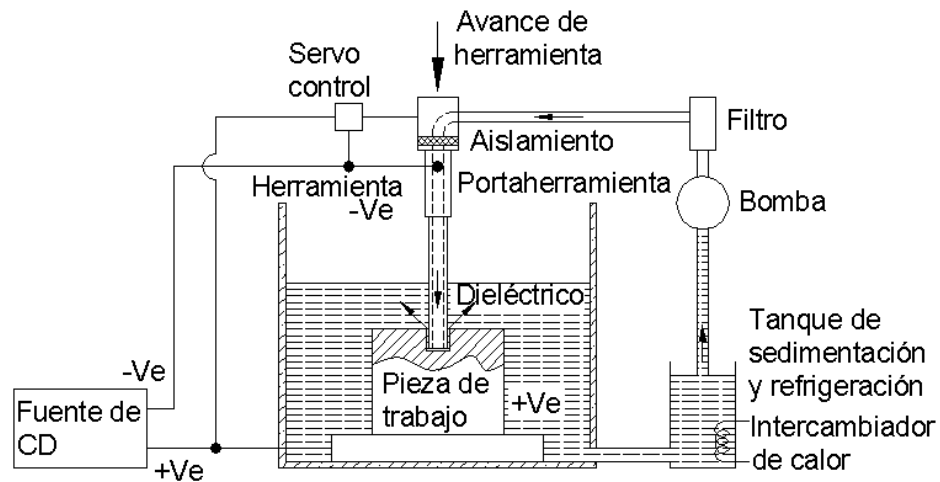
Las características generales de una máquina básica de maquinado por electro descarga (EDM) se muestra en la figura 1-4. En esencia incluyen una cama como mesa, guías, sistema dieléctrico y una columna sobre la que se monta una cabeza equipada con un servomecanismo para controlar la rapidez de avance del eje en el que eta montado el porta herramienta.

Debido a que la distancia de separación de trabajo es de suma importancia, la rapidez de alimentación es vital y el control mediante un servosistema hidráulico sensible, o un motor de corriente directa acoplado directamente (que reacciona más rápido a las señales), es esencial.

La mesa de trabajo se monta en guías ortogonales con frecuencia equipada con escalas ópticas para situarla en su posición con una precisión que se aproxima a la de taladros con plantilla. Toda el área de trabajo está rodeada por un tanque, para contener el dieléctrico que circula de la máquina a un tanque de almacenamiento en el que las partículas suspendidas del proceso de erosión se sedimentan (figura 1-4).

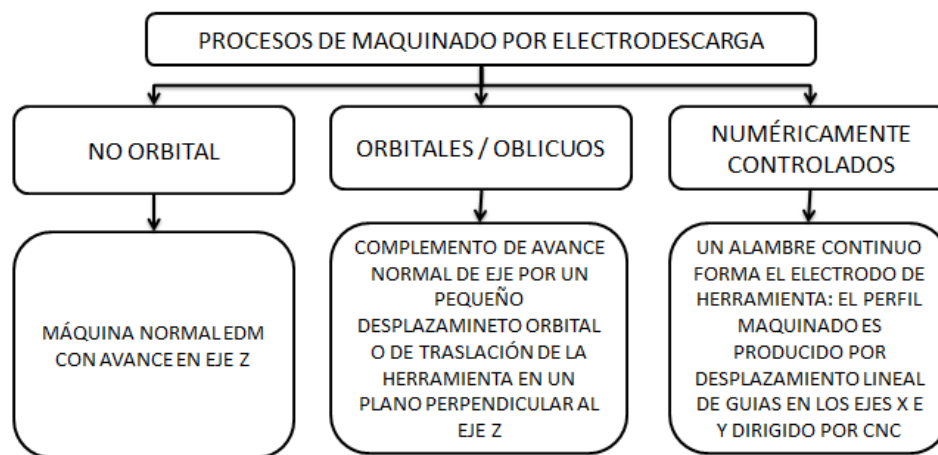
Entonces se bombea de regreso a la zona de trabajo después de filtrarse. Para eliminar el calor generado durante la erosión, el tanque está equipado con un intercambiador de calor para mantener la temperatura de 20°C del dieléctrico. Todo el sistema se analiza de manera más profunda en los siguientes capítulos.





**Figura 1-4.** Características generales de una máquina de electrodescarga.

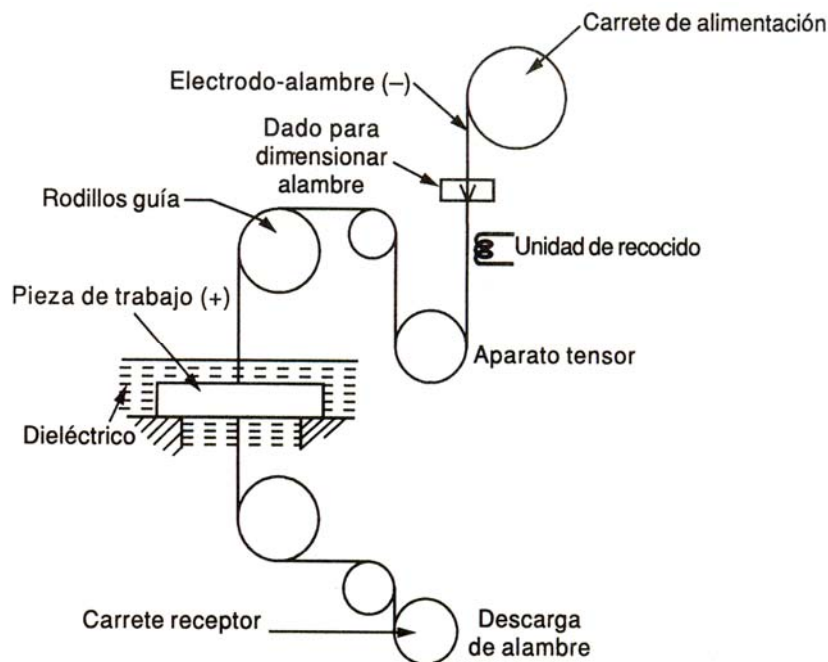
La operación de una máquina básica de maquinado por electrodescarga (EDM) se puede mejorar si se dispone de un pequeño desplazamiento de traslación u orbital del electrodo en un plano perpendicular al vector de avance. Este movimiento lateral mejora la acción de limpieza del dieléctrico en la abertura de trabajo, con lo que se reducen de manera considerable los tiempos de maquinado y el desgaste del electrodo. De manera opcional o adicional, para producir orificios de sección circular, el electrodo se puede hacer girar alrededor de su propio eje. Creando las diferentes categorías (figura 1-5) Para realizar estos movimientos, se puede ajustar un aditamento a máquinas estándar, o bien el aparato puede ser parte integral de la máquina.



**Figura 1-5.** Categorías de máquinas EDM.

### 1.5.2 Sistema EDM CNC de alambre continuo

Existen máquinas EDM de control numérico computalizado (CNC) de electrodo de alambre continuo, figura 1-6, es un importante desarrollo para obtener formas complejas de orificios y cavidades de dados y matrices para extrusores o prensas, respectivamente. El electrodo de alambre, que por lo general mide 0.25 mm de diámetro, se toma de un carrete que contiene suficiente alambre para la operación continua durante 24 horas, a una velocidad de 0.1 a 8 m/min. Para trabajos de alta precisión, el alambre se pasa por un dado calibrador y se reduce en diámetro en 0.015 mm; luego se le hace un recosido y se por unas guías de zafiro a un aparato que estabiliza la tensión entre 0.5 y 1.0 kg. En la operación, se utiliza agua des ionizada como dieléctrico y, además de su función básica, se puede utilizar en un chorro concentrado para pasar el alambre, cuando se hace la preparación, por un agujero previamente perforado en la pieza de trabajo y sobre los rodillos guías para obtener la operación automática. El electrodo puede estar inclinado a un ángulo de  $1.5^\circ$  respecto a la perpendicular, para que haya una altura libre de maquinado en el perfil de dados. El desplazamiento de guías en los ejes X e Y está bajo el control CNC y su programación es la misma que para una máquina CNC convencional. Sin embargo no se profundizara más en este tipo de máquinas ya que son un tipo de máquina diferente a la planteada en este trabajo.



**Figura 1-6.** Principio de máquina EDM CNC de alambre continuo.

## 1.6 Modelado EDM

El Proceso de electroerosión se ve influenciado por muchos factores por lo que se han aplicado diferentes técnicas como: análisis dimensional, redes neuronales artificiales y modelado térmico para predecir el resultado del proceso, principalmente el acabado superficial, desgaste de la herramienta y el MRR.

### 1.6.1 Análisis dimensional

En 1979 Jeswani [26] uso el análisis dimensional para predecir el desgaste de la herramienta en EDM. En 1979 Jeswani [26] utiliza el análisis dimensional para predecir el desgaste de la herramienta en el EDM. La ecuación relaciona el volumen de material erosionado del electrodo con la energía del pulso y la densidad, conductividad térmica, calor específico y calor latente de vaporización del material de los electrodos. Yahya y Manning [24] aplican el método en el análisis de MRR. Los parámetros eléctricos y físicos relacionados con el proceso son el pulso de descarga en el tiempo, la tensión de gap, frecuencia de descarga, corriente del gap y las propiedades del material. Los resultados del modelo muestran una buena aproximación, cuando son comparados experimentalmente.

Un modelo semi empírico del acabado superficial [24], MRR y desgaste de la herramienta [24] para varios materiales fue obtenido usando el análisis dimensional. Usando un diseño de método experimental y parámetros del proceso tales como: corriente de pico, duración de pulso, polaridad eléctrica e identificando las propiedades de los materiales. Los resultados finales muestran que el error medio entre la experimentación y la predicción era inferior al 10% para el modelo acabado de la superficie y menos del 20% de MRR. Sin embargo, las relaciones entre el desgaste de la herramienta y el tiempo de descarga bajo una polaridad eléctrica diferente se observa que tienen un efecto inverso.

### 1.6.2 Modelos matemáticos

Dibitonto et al. [24] presentó un modelo de EDM con una erosión catódica sencilla. El balance de la energía original de Compton para emisiones de gases se modifica utilizando el efecto fotoeléctrico como la principal fuente de energía suministrada a la superficie del cátodo. Luego, Patel et al. [24] desarrolló el modelo de erosión del ánodo, que acepta la potencia como condición de límite en la interfaz del ánodo y se supone que produce una distribución Gaussiana del flujo de calor en la superficie del material del ánodo. El área sobre la cual el flujo es incidente se asume que crece con el tiempo. Un modelo de masa variable y plasma cilíndrico fue introducido por

Eubank et al. [24]. Consiste de tres ecuaciones diferenciales, cada uno a partir de la dinámica del fluido, un balance de energía y las ecuaciones de radiación con la ecuación de estado de plasma combinadas. Problemas en condiciones de tiempo igual a cero son vencidas por un procedimiento de balance de electrones.

McGeough y Rasmussen [24] propuso un modelo de electro descarga de texturas basado en el efecto del líquidos dieléctrico y, en particular, la influencia del cambio en la resistencia en el dieléctrico durante cada pulso de voltaje. Las predicciones teóricas de confirmar los resultados prácticos que la rugosidad de textura de la superficie se determina principalmente por el pico de corriente utilizada y el tiempo de encendido del voltaje. Cogun et al. [24] investigó el perfil de la superficie de acero 2080 para maquinado de herramientas bajo los parámetros de diferentes maquinados. Se ha encontrado que la rugosidad de la superficie aumenta con el aumento de la corriente de descarga, la duración del pulso y el lavado dieléctrico a presión. La Información del perfil de la superficie obtenida se transfiere a la computadora, digitalizándose y modelándose en el forma de series de Fourier.

Pérez et al. [24] presentó un modelo de relativo a la disipación de potencia, teniendo en cuenta las diferentes mecanismo de emisión de corriente y las características del espacio de descarga del cátodo tienen validez en los materiales refractarios y no refractarios. Tantra et al. [24] a prueba la validación del modelo propuesto por Heuvelman para la resistencia de erosión del material para predecir el desgaste de la herramienta y su posible aplicación al proceso EDM

### 1.6.3 Redes neuronales artificiales

Un intento de modelado del procesos EDM a través de ANN (Artificial Neural Network) se llevó a cabo por Gopal y Rajurkar et al [24]. Con la profundidad de maquinado, radio de la herramienta, radio orbital, paso radial, profundidad de la compensación, el pulso a tiempo, el pulso fuera de tiempo y la corriente de descarga como los parámetros de entrada tamaño 9-9-2 de la red neuronal de propagación de vuelta se desarrolló, se han realizado experimentos para comprobar la validez del modelo de ANN y se puede concluir que el modelo ANN proporciona resultados más rápidos y bastante precisos. Tsai y Wang et al [24] han comparado el modelo de ANN en el MRR. Seis modelos de redes neuronales y el modelo neuro-fuzzy de MRR se han establecido y analizado. Los resultados muestran que la red de adaptación del sistema de interferencia difusa (ANFIS) es el más preciso con un error de 16.33%. En sus investigaciones, Tsai y Wang et al [24] han aplicado el mismo método para predecir el acabado de la superficie. Los resultados muestran que la tangente sigmoide perceptrón

multicapa (TANMLP), la red radial de la función de base (RBFN), Adaptive RBFN y modelos ANFIS han mostrado resultados consistentes. Wang et al. [24] combinan la ANN y algoritmos genéticos para encontrar una solución integral al problema de la modelización y optimización de los procesos de fabricación. El error del modelo es de 5,6% para el MRR y el 4,98% de la rugosidad superficial. El sistema de modelado estableció un mejor conocimiento sobre la interacción entre la herramienta (grafito) y la pieza de trabajo (aleación de níquel). Un canal artificial hacia delante de la red neuronal basado en la técnica de vuelta de Levenberg-Marquardt la propagación ha sido desarrollado por Panda y Bhoi [24] para predecir MRR. El modelo proporciona resultados más rápidos y precisos y se desempeña bien en el medio ambiente estocástico de las condiciones de maquinado actual sin comprender el complejo fenómeno físico exhibido en el maquinado por electroerosión.

### **1.7 Maquinado por electro descarga EDM en agua**

El primer artículo acerca de usar agua como dieléctrico fue publicado por Jeswani [26] en 1981, en donde comparó el desempeño del queroseno y el agua destilada sobre el rango de la energía de pulso de 72 – 288 mili joules. El maquinado EDM en agua destilada resultó en un MRR alto y EWR bajo en comparación con el queroseno cuando se utilizan pulsos altos de energía. Con el agua destilada, la precisión de maquinado fue pobre, pero el acabado superficial fue mejor. Por otro lado, Tariq Jilani y Pandey [27] investigaron el uso de agua como dieléctrico en EDM usando agua destilada, agua de grifo y mezcla de 25% de grifo y 75% agua destilada. Los mejores rangos de maquinado conseguidos fueron con agua de grifo, además se tiene la posibilidad de conseguir cero desgaste del electrodo cuando se utilizan herramientas de cobre con polaridad negativa. Una nueva aplicación en el suministro de potencia EDM fue diseñada por Casanueva [28]. Con su propuesta de control consiguió una operación óptima y estable usando agua de grifo como fluido dieléctrico para prevenir la generación de impulsos indeseados y mantener el electrodo y la pieza de trabajo dentro del rango estable óptimo. Estudios conducidos por Kang y Kim [29] con el fin de investigar los efectos en las condiciones del proceso EDM en la susceptibilidad de grieta de una súper aleación base níquel, revelaron que dependiendo del fluido dieléctrico y el post-proceso EDM como una solución al tratamiento térmico, las grietas existentes en la capa nueva podrían propagarse dentro del substrato cuando una fuerza de tensión del 20% fuera aplicada a temperatura ambiente. Cuando se usó queroseno como dieléctrico, se observó que la carburización y propagación de la grieta marcada a través del límite de grano ocurrió después del tratamiento térmico. En cualquiera de los casos, el uso de

agua desionizada como dieléctrico originó la oxidación del espécimen después del tratamiento térmico y no mostró ningún comportamiento de propagación de grieta.

Koenig y Joerres [76] informó que usando una solución acuosa con alta concentración de glicerina tiene una ventaja en comparación con dieléctricos de hidrocarburos cuando se trabaja con duraciones de pulso largo y factores de impulso y las corrientes de descarga, es decir, en el rango de desbaste de alta tensión a circuito abierto y con polaridad positiva en el electrodo. Leao y Pashby [77] encontraron que algunos investigadores han estudiado la viabilidad de agregar compuestos orgánicos, tales como etilenglicol, polietilenglicol 200, polietilenglicol 400, polietilenglicol 600, dextrosa y sacarosa para mejorar el rendimiento de agua desionizada.

La superficie de titanio se modifica después del maquinado EDM con dieléctrico de solución agua con urea [14]. El elemento nitrógeno se descompone del dieléctrico que contiene urea y emigra a la pieza de trabajo formando una capa de TiN duro que resulta en buena resistencia al desgaste de la superficie después del maquinado EDM.

El uso de dieléctricos a base de agua en el EDM tiene muchas ventajas las cuales han sido reportadas en la literatura durante los últimos 25 años. El siguiente párrafo presenta una reseña de estas ventajas:

- 1981 Jeswani [26]: el maquinado con agua destilada tiene alto MRR y bajo desgaste del electrodo.
- 1984 S Tariq Jilani [27]: el mejor rango de maquinado ha sido conseguido con agua de grifo como medio dieléctrico; posible cero desgaste del electrodo.
- 1987 Koenig [30]: el uso de una solución acuosa de compuestos orgánicos como medio para el EDM por penetración excluye casi completamente algún fuego peligroso, permitiendo seguridad en la planta de operación.
- 1993 Koenig [31]: el EDM por penetración puede ser realizado con un costo más efectivo a través del uso de dieléctrico a base de agua, mejorando significativamente la competitividad con otros procesos.
- 1999 Chen S.L. [32]: el MRR es más grande y el desgaste relativo es más bajo cuando se maquina en agua destilada que con queroseno.

- 2004 Leao & Pashby [33]: los dieléctricos a base de agua pudieran reemplazar los fluidos a base de aceites en aplicaciones de penetración.
- 2005 Yan B.H. [14]-[17]: nitruro de titanio (TiN) fue sintetizado en la superficie maquinada por la reacción química la cual involucró elementos obtenidos de la pieza de trabajo y la solución urea en agua como dieléctrico durante el EDM. La modificación de la superficie de metales de titanio puro exhibidos mejoró las características de desgaste y fricción.
- 2016 M. Munza , M. Ristob, R. Haasb [52]: Pruebas realizadas usando agua como dieléctrico y una polaridad negativa demuestran que existe un proceso de electrolisis que ayuda a disminuir el desgaste del electrodo, aumentar la velocidad de avance y disminuir el esfuerzo térmico.

Recientemente los autores [34], [35] han realizado investigaciones relacionadas al maquinado EDM en agua utilizando diversos tipos de agua, materiales de electrodos y materiales de la pieza de trabajo, como parte de estas investigaciones se pretende caracterizar completamente el maquinado EDM en agua, no solo variando el dieléctrico y los materiales del electrodo y pieza de trabajo, sino también variando los diferentes parámetros eléctricos involucrados tal como la corriente, la frecuencia, etc.

## 1.8 Ejemplos de máquinas EDM industriales

### 1.8.1 Mini electroerosionadoras

La mini electroerosionadora, figura 1-7, es una máquina portátil de cabezal inclinable adecuada para remover machuelos y brocas rotas de moldes, piezas pequeñas o sobredimensionadas. Maquinados rectos, oblicuos y rimado de aceros duros.



ESPECIFICACIONES	Unidad	EDM-VLA
Viaje del eje Z	mm	60 / 80
Viaje auxiliar del eje Z	mm	150
Diámetro del electrodo	mm	Ø 0.6 - 6
Corriente de trabajo	A	5 - 6
Potencia de suministro	V (Hz)	220 V (60Hz)
Potencia de entrada	W	400
Solución de trabajo		Keroseno ó saponificador
Peso de la máquina	kg	8.2
Peso del gabinete eléctrico	kg	10.4

*Figura 1-7. Mini electroerosionadora.*

### 1.8.2 Barrenadoras por electroerosión

Las barrenadoras por electroerosión, figura 1-8, son ideales para barrenos pequeños, por ejemplo barrenos de inicio para corte por hilo o barrenos extra profundos en varios tipos de metales, moldes de extrusión y materiales extra duros como carburos, figura 1-9.



ESPECIFICACIONES	Unidad	DS-320
Tamaño de la mesa de trabajo	mm	600 x 300
Máx. tamaño de la pieza de trabajo	mm	600 x 300 x 240
Viaje en el eje X, Y	mm	300 x 200
Viaje del cabezal eje Z	mm	200
Viaje del husillo Z (servo)	mm	350
Capacidad del tanque	l	20
Máxima corriente de salida	A	25
Máximo consumo de energía	kva	4
Peso	kg	1,100

DS-320

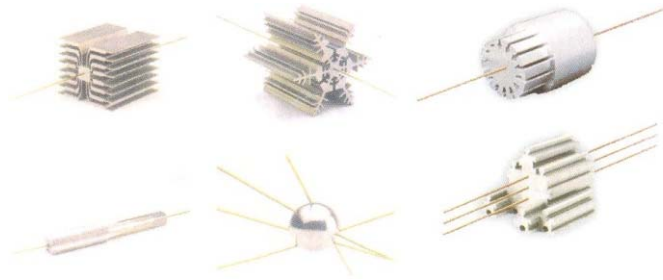
ESPECIFICACIONES	Unidad	DS-703C
Tamaño de la mesa de trabajo	mm	260 x 380
Viaje de la mesa X, Y	mm	200 x 300
Máx. profundidad de maquinado	mm	200
Diámetro del electrodo	mm	Ø 0.3 - 3.0
Máxima corriente de maquinado	l	30
Máxima velocidad de maquinado	A	40
Máximo consumo de energía	kva	800 x 950 x 1,600
Peso	kg	600



DS-703C

*Figura 1-8. Barrenadoras por electroerosión.*





*Figura 1-9. Ejemplos de maquinados en barrenadora por electroerosión.*

### 1.8.3 Electroerosionadoras

Las máquinas electroerosionadoras, figura 1-10 y figura 1-11, son ideales para grabados en moldes en varios tipos de metales y materiales extra duros, figura 1-12.



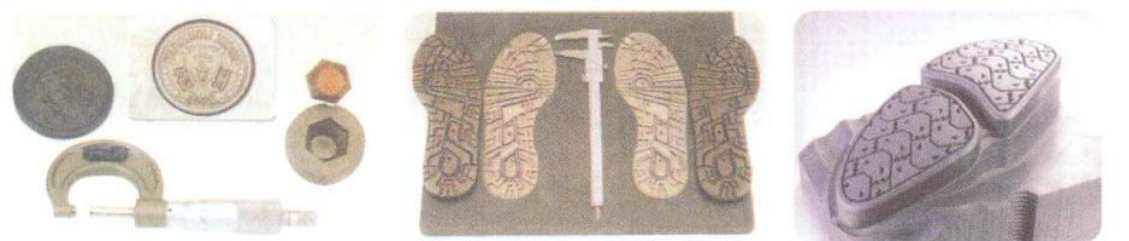
ESPECIFICACIONES	Unidad	ED-203 ZPNC-203	ED-251 / 252 ZPNC-251 / 252
Dimensiones del tanque de trabajo	mm	630 x 410 x 250	770 x 510 x 270
Máx. peso de la pieza	kg	300	500
Tamaño de la mesa	mm	500 x 250	600 x 300
Viajes X, Y, Z	mm	250 x 150 x 150	300 x 200 x 150
Viaje del husillo	mm	150	200
Máx. peso del electrodo	kg	40	50 / 60
Dist. de mesa porta electrodos	mm	100 - 450	150 - 500
Máx. velocidad de corte	g / min	1.34	2.01
Rugosidad	μm	Ra 0.3 - 0.5	Rms 14 - 21
Amperaje de trabajo	A	20, 30 ó 50	30, 50 ó 75
Consumo de energía	kva	3, 4 ó 6	4, 6 ó 9
Capacidad del tanque	l	440	450 / 330
Peso	kg	750	1,000 / 1,060

*Figura 1-10. Electroerosionadoras.*



ESPECIFICACIONES	Unidad	DM-408 ZPNC-408	DM-433	DM-540 ZPNC-540	DM-460	DM-860
Dimensiones del tanque de trabajo	mm	1,000 x 600 x 415	1,000 x 600 x 415	1,300 x 750 x 520	1,300 x 750 x 520	2,000 x 1,000 x 520
Máx. peso de la pieza	kg	500	1,000	1,800	2,200	4,500
Tamaño de la mesa	mm	700 x 400		850 x 450		1,200 x 750
Viajes X, Y, Z	mm	400 x 300 x 200		500 x 400 x 200	600 x 400 x 200	800 x 600 x 200
Viaje del husillo	mm	200	300	200	300	250
Máx. carga del electrodo	kg	60		125	85	
Dist. de mesa porta electrodos	mm	250 - 650	185 - 635	245 - 645	420 - 720	450 - 900
Máx. velocidad de corte	g / min	3.06				
Rugosidad	µm	Ra 0.3 - 0.5 Rms 14 - 21				
Amperaje de trabajo	A	30, 50 ó 75			50, 75 ó 100	
Consumo de energía	kva	4, 6 ó 9			6, 9 ó 12	
Capacidad del tanque	l	600	600	900		1,700
Peso	kg	1,500	2,200	2,500	4,000	4,800

*Figura 1-11. Electroerosionadoras de penetración CNC.*



*Figura 1-12. Ejemplos de piezas fabricadas con electroerosión.*

# Capítulo 2

## Diseño conceptual de la máquina

En este capítulo se presenta el desarrollo del diseño conceptual del sistema EDM utilizando una metodología ordenada y adecuada para lograr cumplir con los objetivos y especificaciones establecidas.

### 2.1 Planteamiento del problema de diseño

El problema de diseño se plantea como diseñar un sistema EDM con capacidad de control del avance del electrodo o herramienta, así como con capacidad de control de la descarga. El sistema EDM deberá ser práctico, sencillo, económico y confiable, y deberá permitir realizar estudios de caracterización completa de este proceso en agua.

Como parte del planteamiento del problema de diseño se tienen las siguientes especificaciones en cuanto a funcionamiento, especificaciones técnicas indispensables y especificaciones deseables no indispensables.

#### 2.1.1 Datos de funcionamiento:

- Para uso en laboratorio.
- Máquina de pruebas para maquinado en agua.
- Capacidad de ser utilizada en pequeños talleres.

#### 2.1.2 Especificaciones técnicas

- Sistema de avance automático de la herramienta en el eje vertical “z”
- Alimentación a 127 VCA 60 Hz.
- Sistema de potencia con control de:
  - Frecuencia
  - Voltaje (40 a 120 VCD).
  - Forma de onda (tiempo ON/OFF)

### 2.1.3 Especificaciones deseables

- Eficiente.
- Utilización de partes estándar.
- Posibilidad de modificación durante la construcción.
- Evitar el uso de tarjetas dedicadas.
- Control de la posición de la pieza a maquinarse (x, y).

### 2.1.4 Criterios de diseño

- Práctica.
- Sencilla.
- Económica.
- Segura.

## 2.2 Diseño conceptual

Dentro del proceso de diseño, una de las etapas más críticas para el desarrollo de del sistema es el diseño conceptual, debido a que en esta etapa se determinan más del cincuenta por ciento de los costos de producción. En la etapa de Diseño Conceptual se estudian varias alternativas de solución (conceptos) para el problema de ingeniería. El concepto es en este caso la máquina EDM. La generación de conceptos es una tarea que se lleva a cabo de una manera altamente ineficiente. Existen metodologías y tecnologías de diseño, pero específicamente el diseño conceptual se ha basado en técnicas poco formales. Aunque las herramientas tecnológicas de análisis en ingeniería sean muy poderosas, hay una incongruencia, porque en muchos casos se están tratando de optimizar mediante dichas herramientas, conceptos de solución erróneos. Esto produce, un producto con un desempeño inferior, y un gran desperdicio de tiempo y dinero.

Una técnica que apoya el diseño conceptual mediante la descripción funcional de un sistema es el Análisis Funcional, que consiste en tres herramientas [48]: El diagrama Funcional, el Diagrama de Fallas y el Análisis del Modo y Efecto de Falla. El Diagrama Funcional es una herramienta para la descomposición funcional de un sistema. En ésta técnica se debe definir la función útil primaria del sistema, esto es, lo que va a hacer el sistema. Después se desglosa la función principal en sub-funciones del sistema y se representan en un diagrama conocido de funciones. La combinación compatible y lógica de subfunciones para completar la función general produce lo que se conoce como estructura funcional [49], la cual debe variarse hasta satisfacer la función general. El Diagrama de Fallas y el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) se utilizan para identificar los factores críticos que pueden producir un inconveniente en el desempeño

del sistema, esto es, efectos secundarios perjudiciales o modos de falla, que son las salidas no deseables en el sistema. Esos indicadores de desempeño ampliamente usados son síntomas de problemas físicos adyacentes en el sistema. Saber cuáles son los modos de falla ayuda a establecer límites razonables en las expectativas del diseño.

### **2.2.1 Abstracción para el conocimiento de los problemas principales**

Cualquier proceso de solución de problemas involucra dos componentes principales: el problema en sí mismo y el sistema en el cual el problema existe. La forma común es enfocarse en el sistema, esto es, intentar eliminar el problema cambiando el sistema. Cuando se enfrenta un problema difícil, es muy útil reconsiderar el problema (reformular también el planteamiento del problema). Para formular el problema con el enfoque diseño es conveniente hacer una descripción funcional del sistema en desarrollo. Esto permite la definición de las direcciones de innovación, o problemas principales.

Actualmente, para la descripción funcional de un sistema, se utiliza la técnica del Diagrama de funciones.

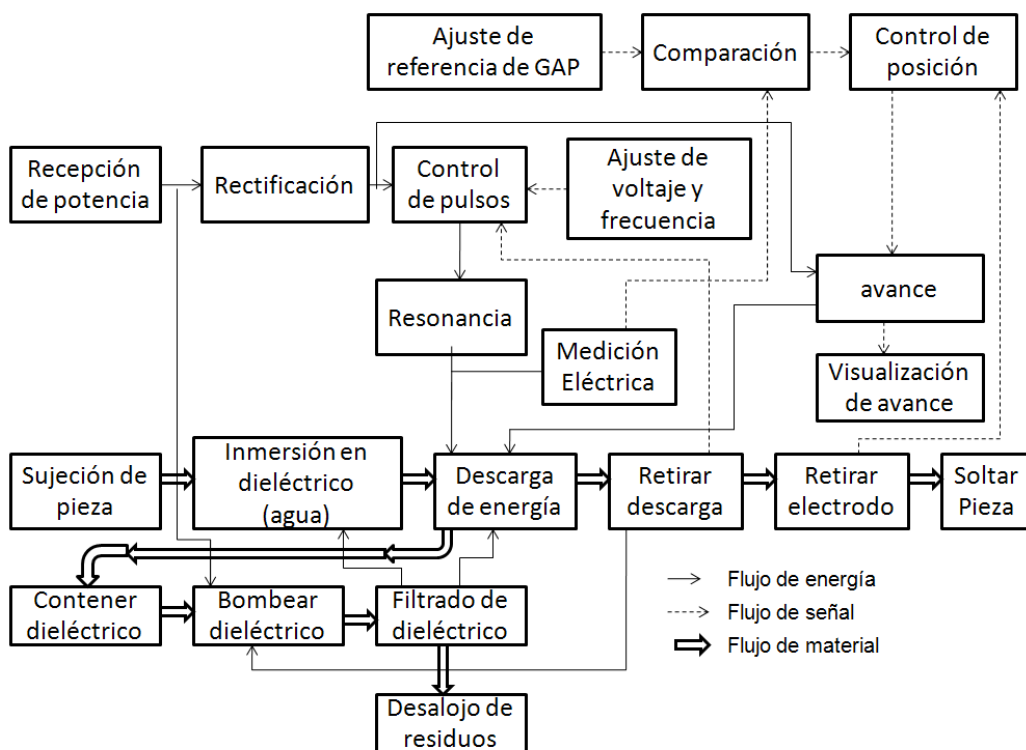
Otro enfoque similar para establecer la estructura funcional de un sistema es el propuesto por Pahl y Beitz [49] utilizado en esta tesis. Ellos establecen que para describir y resolver problemas de diseño, es muy útil aplicar el término “función” a la relación general entrada/salida de un sistema cuyo propósito es llevar a cabo una tarea. Una función principal puede dividirse directamente en subfunciones identificables correspondientes a diferentes subtareas. Las funciones se definen usualmente mediante frases con un verbo y un objeto directo, por ejemplo: “Incrementar presión”, “transferir torque”, etc. y se derivan de la conversión de energía, material e información.

Los efectos secundarios y los modos de falla son las salidas no deseables en el sistema. Esos indicadores de desempeño ampliamente usados son síntomas de problemas físicos adyacentes en el sistema. Saber cuáles son los modos de falla ayuda a establecer límites razonables en las expectativas del diseño. Comprender la física de los modos de falla del sistema permite la comprensión necesaria para identificar los factores críticos que pueden contribuir más directamente a la falla del sistema. Conocer los efectos laterales secundarios del sistema durante la transformación de energía necesaria para llevar a cabo la Función Útil Primaria permite la comprensión de los factores internos críticos que el diseño puede imponerse a sí mismo, así como los factores que el subsistema puede imponer a otros subsistemas vecinos.

El Análisis de Modos y Efectos de Fallas es un método usado para diseñar productos y procesos donde se asegure que los objetivos de calidad, diseño y manufactura cumplan con los requerimientos del cliente. Para utilizar un AMEF tanto en el diseño de componentes como en el proceso de manufactura, es necesario que el equipo de desarrollo del producto ayude a identificar los modos potenciales de falla. Esta información puede ser utilizada para concentrar los esfuerzos en implementar modificaciones en el diseño y el proceso que puedan reducir el riesgo de falla.

Toda la información obtenida del Análisis Funcional es representada en el Diagrama Funcional.

Dada la complejidad del sistema EDM, es necesario realizar un proceso de abstracción para identificar los problemas principales. Para ello es necesario tener un conocimiento pleno de los parámetros del proceso y su efecto en el proceso EDM. Como resultado de este análisis de abstracción, se genera un diagrama de funciones (figura 2-1) donde la función total se vuelve lo más concreta posible con referencia a la transformación de energía, material y señales. Esta se define y se descompone en funciones parciales reconocibles.



**Figura 2-1.** Diagrama de funciones para la máquina EDM.

### 2.2.2 Planteamiento de soluciones

Una vez establecida las funciones, se realizó la búsqueda de principios de solución para cada una de estas funciones. Las soluciones se muestran en la tabla 2-1. Estas soluciones se combinaron con ayuda del diagrama de funciones para lograr el cumplimiento de la función total con el mínimo de gasto y esfuerzo pero en cumplimiento con las exigencias.

Las situaciones más innovadoras resultan de combinaciones de muchos problemas interrelacionados. Algo interesante es que cada problema representa más de una dirección hacia una solución. La Formulación de Problemas es una técnica especial para descubrir todos los problemas relacionados con la situación a desarrollar e identificar todas las áreas de oportunidad de mejora del sistema. Teniendo una lista completa de todos los planteamientos de problemas posibles, se pueden analizar y escoger el que parezca tener una solución más prometedora.

La Formulación de Problemas se basa, al igual que el Análisis Funcional, en la teoría de que los Sistemas Tecnológicos tienen una estructura jerárquica, esto es, cualquier Sistema Tecnológico tiene sistemas subordinados y este mismo sirve de subsistema para un sistema de mayor nivel. Un cambio en la estructura del Sistema Tecnológico causa cambios consecuentes en sistemas y subsistemas adyacentes, por lo tanto una falla en una parte del sistema puede causar consecuencias indeseables como efectos secundarios perjudiciales y modos de falla en otras partes del sistema y en el sistema total. Por eso se pueden utilizar las herramientas del Análisis Funcional en la Formulación de Problemas, porque integra la información obtenida con ellas.

El proceso de la creatividad en tecnología para generar conceptos de solución empieza con la clarificación y el análisis de la situación de innovación. La situación de innovación es cualquier situación tecnológica que contenga claramente una característica insatisfactoria (entiéndase la palabra "tecnológica" en su más amplio sentido: la técnica, la producción, la investigación, el uso diario, militar, etc.). En la clarificación y el análisis de la situación tecnológica se utilizan las técnicas del Análisis Funcional. Comúnmente, la generación de ideas creativas y el proceso de síntesis de soluciones dependen totalmente del conocimiento específico y las habilidades que posea la persona para integrar el conocimiento y producir un concepto. Actualmente se piensa que el proceso creativo es totalmente subjetivo.

*Tabla 2-1. Soluciones posibles de las funciones.*

Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4
<b>Recepción de potencia</b>	Des conector.	Cuchillas y fusibles	Termo magnético	
<b>Rectificación</b>	Media onda	Onda completa	Onda completa con filtrado.	
<b>Control de pulsos</b>	Circuito RC	Tiristores	Técnica PWM	
<b>Ajuste de Voltaje y frecuencia</b>	Divisores de voltaje	Señal análoga	Fuente externa	Señal digital
<b>Resonancia</b>	Circuito de relajación	Fuentes resonantes	Fuente resonante retroalimentada	
<b>Sujeción de la pieza</b>	Magnetismo	Mesa con sujetadores	Mesa con prensa	Mesa con prensa orientación x, y
<b>Inmersión en dieléctrico</b>	Tanque de inoxidable	Tanque de aluminio	Tanque de acrílico	
<b>Descarga de energía</b>	Electrodo de latón	Electrodo de cobre	Electrodo de grafito	Electrodo de bronce
<b>Retirar descarga</b>	Inversión de avance de mecanismo	Inversión de avance más rápido	Inversión de avance rápido más desc. fuente	
<b>Retirar electrodo</b>	Inversión de Avance rápido	Inversión de avance más rápido		
<b>Soltar Pieza</b>	Manual	Manual prensa con regreso rápido		
<b>Medición Eléctrica</b>	Voltaje	Corriente	Ambos	
<b>Ajuste de referencia de GAP</b>	Divisor	Fuente externa	Análoga	Digital
<b>Comparación</b>	Comparador lógico análogo	Comparador lógico digital		
<b>Control de posición</b>	Encoder	Cuenta de pasos	Retroalimentación externa	
<b>Avance</b>	lineal	Cremallera piñón	Tornillo directo	
<b>Visualización de avance</b>	Mecánica lineal	Mecánica con indicador	Display digital	
<b>Contener dieléctrico</b>	Tanque de acero inoxidable	Tanque de aluminio	Tanque de acrílico	
<b>Bombear dieléctrico</b>	Bomba sumergible	Bomba roto dinámica		
<b>Filtrado de dieléctrico</b>	Filtro paso 1			
<b>Desalojo de residuos</b>	Manual	Por drene		



### 2.2.3 Evaluación de las soluciones de las funciones

Después de obtener todas las ideas o conceptos que cumplan con las especificaciones, debe llevarse a cabo una selección del mejor concepto. Por lo tanto, la presentación de los conceptos debe hacerse de manera clara.

Para la evaluación de los conceptos obtenidos fue necesario fijar criterios de evaluación a partir de los elementos que forman las especificaciones del producto. La finalidad última de la evaluación de los conceptos es la obtención de una idea que cumpla de manera satisfactoria con los requerimientos del producto. Y las limitaciones económicas y de manufactura. A partir de ahí se tendrá que hacer el diseño del producto.

La evaluación de las soluciones o conceptos está basada en la lista de requerimientos (exigencias). Primero se decidió eliminar todas aquellas soluciones que son imposibles. Posteriormente se realizó la evaluación de las soluciones buscando la combinación más adecuada, cumpliendo con las exigencias y en base a los criterios de evaluación de funcionalidad, manufacturabilidad, operación, mantenimiento, seguridad, ergonomía, precisión y costo, para el diseño mecánico, y de funcionalidad, fabricación, operación, mantenimiento, seguridad, confiabilidad, sencillez y costo para el diseño eléctrico de control y potencia. Sin embargo dado el presupuesto resulta necesario dar mayor peso a las limitantes económicas sin perder de vista la precisión y confiabilidad.

Cada criterio de evaluación se ve afectado por la importancia que tiene dentro del diseño por lo que se prefieren aquellas soluciones que sin ser técnicamente las mejores logran un balance en sus características técnicas y su costo. Estas evaluaciones se concentran en las características principales sin olvidar aquellas con menor influencia. De esta manera, es posible introducir estos valores en forma de factores de peso.

La manera más exitosa de aplicar este procedimiento de evaluación es realizando un listado en forma de tabla, la cual contiene todas las posibles soluciones y los criterios de evaluación. Permitiendo calificar con los mismos criterios a cada solución, resultado como la mejor aquella que obtiene la mayor puntuación cuando las calificaciones por criterio se afectan por los pesos. La tabla 2-2 muestra un ejemplo del procedimiento de calificación para la obtención de la solución a la función. En este caso, la recepción de la potencia.

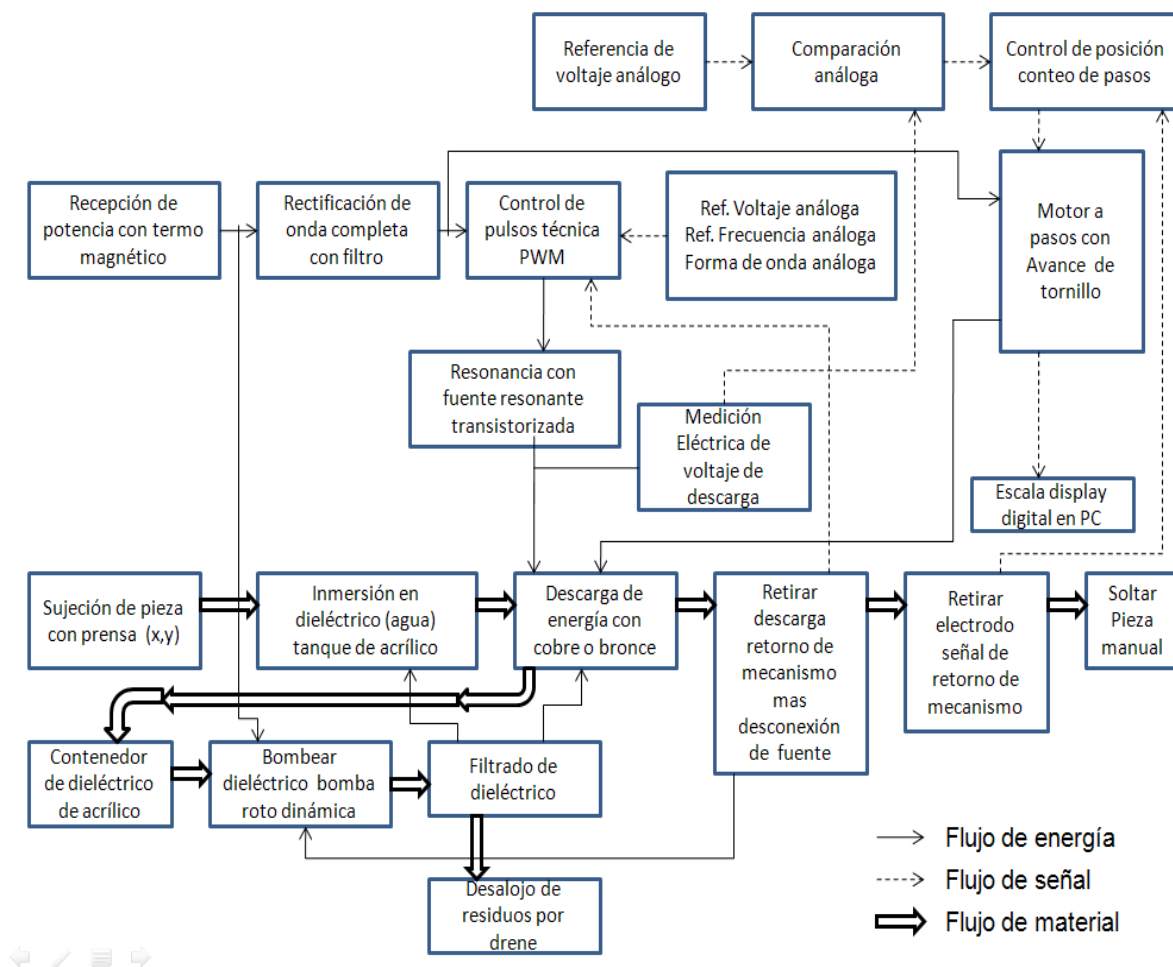
RECEPCIÓN DE POTENCIA							
CONCEPTO	PESO	SOLUCIÓN 1		SOLUCIÓN 2		SOLUCIÓN 3	
		CAL.	C.P.	CAL.	C.P.	CAL.	C.P.
funcionalidad	1	1	1	8	8	10	10
manufacturabilidad	0.5	10	5	10	5	10	5
operación	0.8	2	1.6	10	8	10	8
mantenimiento	0.5	10	5	5	2.5	10	5
seguridad	1	1	1	7	7	10	10
ergonomía	0.7	10	7	10	7	10	7
precisión	0.9	0	0	8	7.2	10	9
costo	0.5	7	3.5	1	0.5	1	0.5
TOTAL			24.1		45.2		54.5

*Tabla 2-2. Tabla de evaluación de la solución recepción de potencia.*

### 2.3 Concepto final

En el proceso real de creatividad la "invención" y las etapas "del diseñador" de tiempo en tiempo se entremezclan de manera extraña: de la etapa del diseño, a menudo, se tiene que regresar a la etapa inventiva y enmendar alguna idea que había sido encontrada. El proceso creativo en diseño se complementa con el proceso analítico. Tanto en el proceso creativo como en el proceso analítico toman decisiones de diseño para evaluar las nuevas ideas propuestas. Esos dos procesos se interrelacionan, puesto que el proceso analítico ayuda a abandonar o descartar las malas ideas rápidamente para acelerar el proceso de la creación del sistema.

El proceso de diseño debe ser revisado mediante el análisis y deben corregirse las diferencias entre la definición del problema percibido y la solución propuesta. La habilidad de juzgar la calidad de la salida del proceso creativo mejora este proceso en sí. El análisis del diseño implica hacer decisiones correctas de diseño y evaluar los detalles de características específicas del diseño. Solo cuando los diseños propuestos puedan ser analizados, el proceso de diseño converge a una solución rápidamente. Las ideas no prometedoras han sido descartadas y las buenas ideas se mantienen. El método usado aporta conceptos de solución y evaluación, pero todavía se debe seguir con el trabajo de diseño hasta terminar el sistema.



**Figura 2-2.** Solución de funciones para máquina EDM.

Para resumir, en ingeniería el primer paso hacia el desarrollo de una solución es la síntesis del sistema tecnológico, lo cual involucra la conceptualización y diseño de toda una solución integrando el conocimiento empírico y principios científicos. Este paso es seguido del proceso de optimización, el cual involucra la subdivisión del diseño en sus componentes, y el análisis de cada componente usando principios científicos y herramientas matemáticas. Todo con el objetivo de obtener un producto competitivo, innovador y adaptado a sus limitaciones.

# Capítulo 3

## Desarrollo del sistema mecánico

En este capítulo se presenta el diseño de detalle del sistema mecánico de la máquina EDM, así como los detalles del ensamble y la construcción mecánica.

### 3.1 Mecanismo de avance vertical “z”

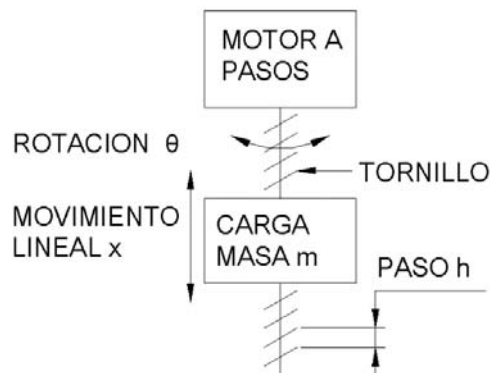
El sistema tornillo-tuerca presenta una ventaja muy grande respecto a otros sistemas de conversión de movimiento giratorio en longitudinal: por cada vuelta del tornillo la tuerca solamente avanza la distancia que tiene de separación entre filetes (paso de rosca) por lo que la fuerza de apriete (longitudinal) es muy grande. Cuando el avance lineal exige mucha precisión (por ejemplo en los instrumentos de medida) este mecanismo sustituye con gran ventaja al sistema cremallera-piñón. Por otro lado, el sistema no es reversible (no se puede aplicar un movimiento longitudinal y obtener uno giratorio), lo cual constituye otra ventaja para esta aplicación.

Para lo general en estos mecanismos suelen emplearse roscas cuadradas (de uno o varios hilos) debido a su bajo rozamiento. Este se encuentra en multitud de objetos de uso cotidiano: grifos, tapones de botellas y frascos, lápices de labios, barras de pegamento, elevadores de talleres, gatos de coche, tornillos de banco, presillas, máquinas herramientas, sacacorchos. El sistema tornillo-tuerca como mecanismo de desplazamiento se emplea en multitud de máquinas pudiendo ofrecer servicio tanto en sistemas que requieran de gran precisión de movimiento (balanzas, tornillos micrométricos, transductores de posición, posicionadores, etc.) como en sistemas de baja precisión.

Aunque la mayor parte de los sistemas tornillo-tuerca se fabrican en acero, también los podemos encontrar fabricados en otros metales (bronce, latón, cobre, níquel, aceros inoxidables y aluminio) y en plásticos (nylon, teflón, polietileno, pvc, etc.), todo ello dependerá de sus condiciones de funcionamiento.

### 3.1.1 Modelado del mecanismo de avance

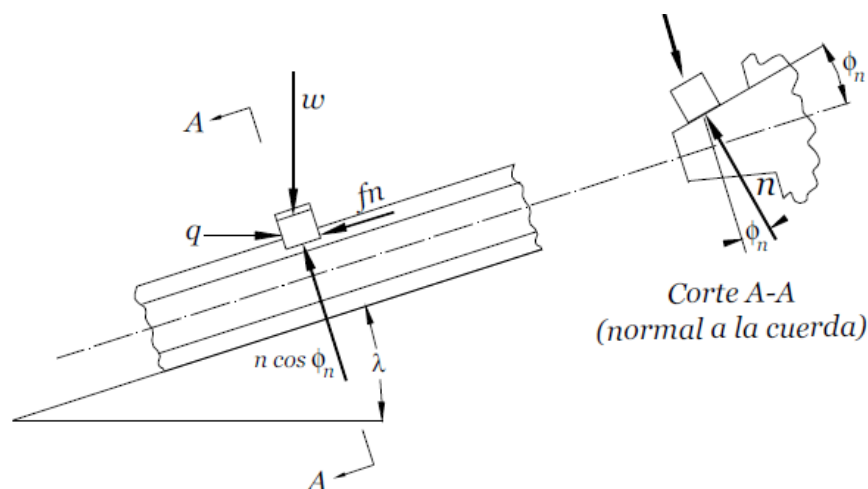
El sistema de avance propuesto para la máquina EDM es como se muestra en la figura 3-1, el cual consiste de un motor a pasos acoplado directamente a un mecanismo tornillo-tuerca el cual mueve el portaherramientas o electrodo.



*Figura 3-1. Diagrama esquemático del sistema de avance.*

#### 3.1.1.1 Par de giro de la carga

Para obtener la ecuación de par de giro de elevación requerido del mecanismo de avance, el cual supone el peor de los casos levantando la carga, se procede con el siguiente análisis. Tomando un elemento diferencial en equilibrio de la tuerca del avance figura 3-2.



*Figura 3-2. Equilibrio de un segmento diferencial de la tuerca del porta herramientas.*

La ecuación del par requerido para la transmisión de potencia, se obtiene a partir del equilibrio de un segmento diferencial figura 3-2 de la tuerca sobre la actúa la carga  $w$  del peso del portaherramientas.

$$w = \text{carga axial debida a al peso}$$

$$n = \text{reacción normal}$$

$$f_n = \text{fuerza de fricción}$$

$$q = \text{fuerza tangencial generada por } T$$

Sumando las fuerzas axiales y tangenciales:

$$\sum F_t = 0 \quad (3.1)$$

$$q - n(f \cos \lambda + \cos \phi_n \operatorname{sen} \lambda) = 0 \quad (3.2)$$

y

$$\sum F_a = 0 \quad (3.3)$$

$$w - n(f \operatorname{sen} \lambda + \cos \phi_n \cos \lambda) = 0 \quad (3.4)$$

Eliminando  $n$  de las ecuaciones anteriores

$$q = w \left( \frac{f \cos \lambda + \cos \phi_n \operatorname{sen} \lambda}{\cos \phi_n \cos \lambda - f \operatorname{sen} \lambda} \right) \quad (3.5)$$

Para la superficie de la tuerca, se integra sobre la superficie completa y se obtiene  $W$  y  $N$

$$\int w ds = W \text{ y } \int n ds = N \quad (3.6)$$

Dado que el producto de la fuerza  $q$  por  $D_m/2$  representa el par de torsión aplicado al segmento de la tuerca, la ecuación para el par de torsión requerido para levantar la carga  $W$  es:

$$T_L = Q \frac{D_m}{2} = W \frac{D_m}{2} \left( \frac{f \cos \lambda + \cos \phi_n \operatorname{sen} \lambda}{\cos \phi_n \cos \lambda - f \operatorname{sen} \lambda} \right) \quad (3.7)$$

Lo cual es válido para:

- Elevación de la carga
- Sin fricción adicional de las guías

Ya que el avance es un valor más conocido que el ángulo de hélice, se puede obtener una forma más conveniente de la ecuación de par de torsión dividiendo el numerador y el denominador entre  $\cos\lambda$  y, luego, escribiendo  $L/\pi D_m$  en lugar de  $\tan\lambda$ :

$$T_L = W \left[ \frac{D_m}{2} \left( \frac{f\pi D_m + L \cos\phi_n}{\pi D_m \cos\phi_n - fL} \right) \right] \quad (3.8)$$

### 3.1.1.2 Par de giro de las guías

Para agregar el par ocasionado por la fricción de las guías se establece la relación del brazo de palanca horizontal de  $W$  a las guías representado por la letra “ $x$ ” con la separación vertical entre los puntos de apoyo de las guías “ $y$ ” afectadas por el coeficiente de fricción entre la guía de aluminio y los collarines de Nylamid®.

$$T_G = \frac{W f_G x}{y} \left[ \frac{D_m}{2} \left( \frac{f\pi D_m + L \cos\phi_n}{\pi D_m \cos\phi_n - fL} \right) \right] \quad (3.9)$$

### 3.1.1.3 Par de giro de rodamientos

Adicionalmente se considera la torsión debida al empuje de los rodamientos que soportan el tornillo, que para el caso de rodamientos de bolas, se toma el diámetro medio  $D_c$  con coeficiente de fricción  $f_c$ , entonces el par de torsión requerido para vencer la fricción del rodamiento es:

$$T_c = f_c W \frac{D_c}{2} \quad (3.10)$$

Para el caso de rodamientos el coeficiente de fricción es de:

$$0.01 \leq f_c \leq 0.02 \quad (3.11)$$

### 3.1.1.4 Par de giro total

Al final la ecuación general resulta:

$$T_L = \left( 1 + \frac{f_G x}{y} \right) \left[ W \frac{D_m}{2} \left( \frac{f\pi D_m + L \cos\phi_n}{\pi D_m \cos\phi_n - fL} \right) \right] + f_c W \frac{D_c}{2} \quad (3.12)$$

### 3.1.1.5 Inercia de la carga

Para los sistemas de cargas conectadas a motores por tornillos, una revolución del motor causa un movimiento de la carga igual al paso ( $L$ ) del tornillo, así que para un ángulo  $\theta$  (en radianes), el movimiento lineal ( $x$ ) de la carga es:

$$x = \frac{\theta}{2\pi} L \quad (3.13)$$

Como se observa en la ecuación 3.13 el avance depende del ángulo del motor a pasos  $\theta$ , el cual se encuentra definido en función del número de pasos  $N_p$  del motor y el ángulo por paso del motor  $\theta_p$ .

$$\theta = \theta_p N_p \quad (3.14)$$

Entonces el trabajo ( $Q$ ) hecho para un desplazamiento, es igual al trabajo hecho por el torque  $T_L$  del motor para un ángulo  $\theta$  [36].

$$Q = T_L \theta = Fx \quad (3.15)$$

Despejando para el torque:

$$T_L = \frac{Fx}{\theta} = \frac{FL}{2\pi} \quad (3.16)$$

Para acelerar la carga se requiere una fuerza adicional proporcional a la masa de la carga  $m$  y a la aceleración.

$$F = m \left( \frac{d^2x}{dt^2} \right) \quad (3.17)$$

Si la fuerza se expresa como un torque del motor.

$$T_L = \frac{FL}{2\pi} = mL \left( \frac{d^2x}{dt^2} \right) / 2\pi \quad (3.18)$$

Substituyendo  $x$  en términos de  $\theta$

$$T_L = m \left( \frac{L}{2\pi} \right)^2 \left( \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) \quad (3.19)$$

Substituyendo  $T_L$  y dejándola en términos de  $\theta$

$$T_L = m \left( \frac{L}{2\pi} \right)^2 \left( \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) \quad (3.20)$$

Donde la inercia efectiva de la carga es:

$$J_L = m \left( \frac{L}{2\pi} \right)^2 \quad (3.21)$$



La inercia del tornillo está determinada por:

$$J_B = \frac{\pi \rho D_m^4 l_T}{32} \quad (3.22)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del material del tornillo y  $l_T$  es la longitud del tornillo

Por último la inercia del motor según el fabricante es de:

$$J_M = 47.82 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.23)$$

### 3.1.2 Modelado total del mecanismo

La ecuación general para el par de giro inicial del mecanismo es:

$$T_L = \left(1 + \frac{f_G x}{y}\right) \left[ W \frac{D_m}{2} \left( \frac{f \pi D_m + L \cos \phi_n}{\pi D_m \cos \phi_n - f L} \right) \right] + f_c W \frac{D_c}{2} + \left( m \left( \frac{L}{2\pi} \right)^2 + \frac{\pi \rho D_m^4 l_T}{32} + 47.82 \times 10^{-6} \right) \alpha \quad (3.24)$$

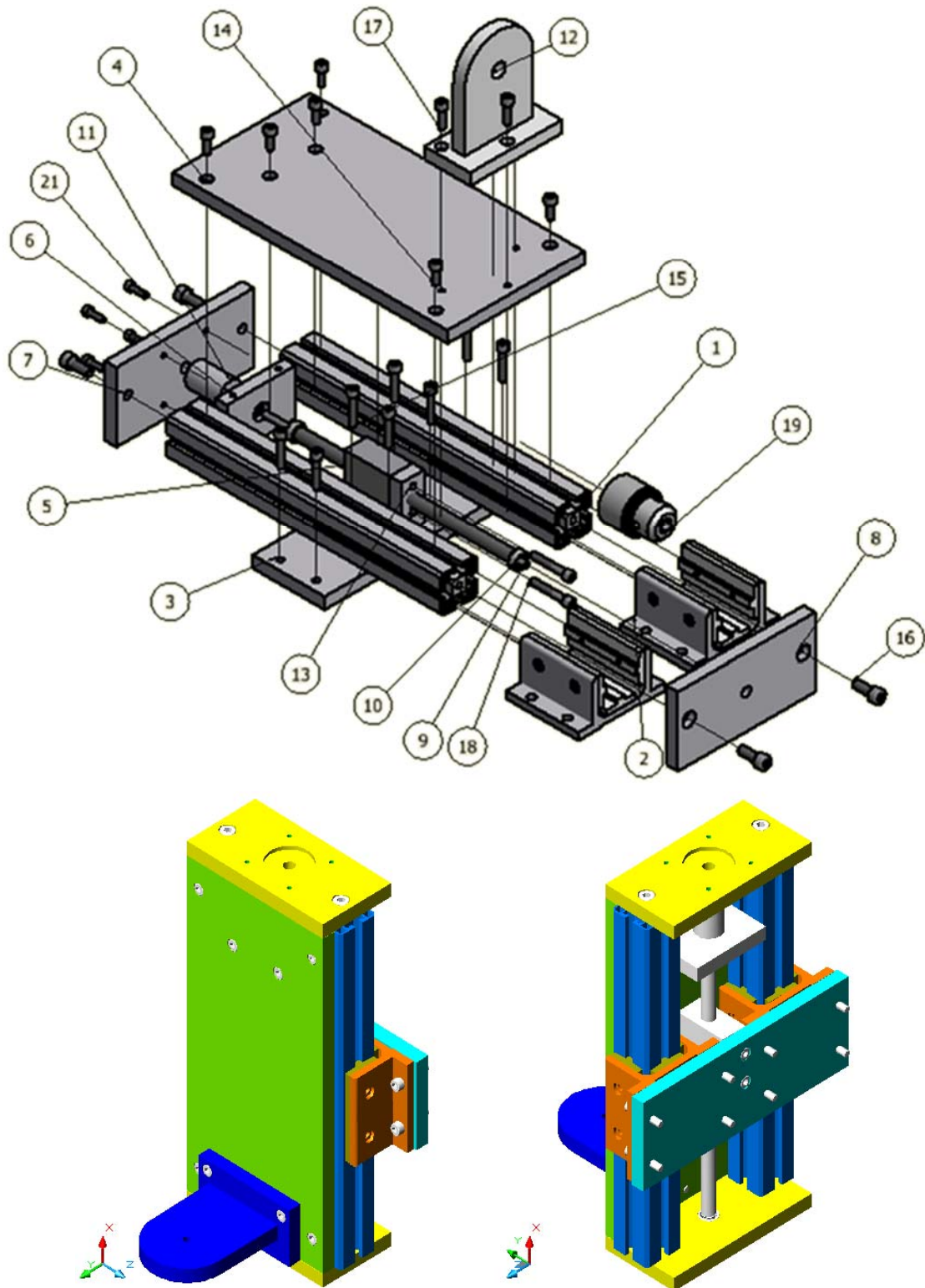
donde  $\alpha$  es la aceleración angular del motor expresada en rad/seg<sup>2</sup>

Y el par constante queda expresado como:

$$T_L = \left(1 + \frac{f_G x}{y}\right) \left[ W \frac{D_m}{2} \left( \frac{f \pi D_m + L \cos \phi_n}{\pi D_m \cos \phi_n - f L} \right) \right] + f_c W \frac{D_c}{2} \quad (3.25)$$

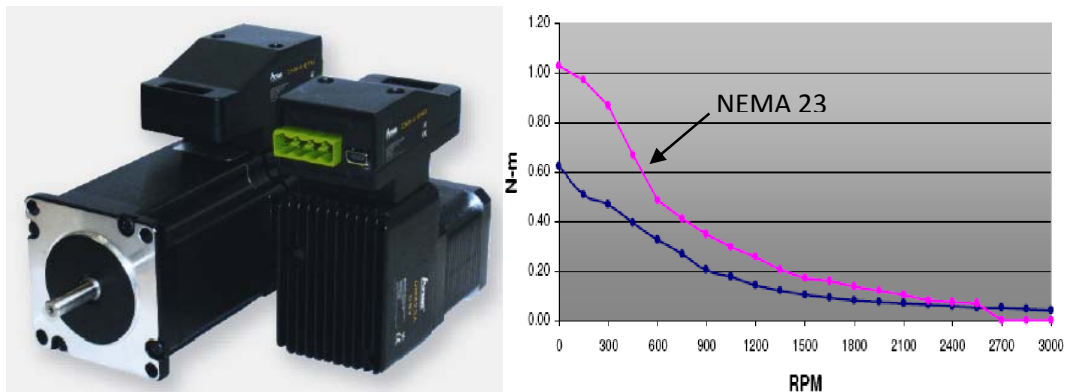
### 3.1.3 Diseño del mecanismo de avance

El diseño CAD del mecanismo de avance se muestra en la figura 3-3. Se considera una carrera de 200 mm. Estas dimensiones resultan de la adaptación de los componentes comerciales 40mm x 40mm de IPS de aluminio 7075 con que se fabricaron las guías (1) que se deslizan sobre las correderas fijas (2). Para el mecanismo de avance se propone un tornillo métrico estándar de 12 mm y 1 mm de paso (9) soportado en ambos extremos por baleros de bolas (10) ubicados dentro de las cajas de las chumaceras (6 y 7), el motor se monta sobre la placa (7) y transmite la potencia al tornillo por medio del acoplamiento flexible (11). El tornillo (9) y la tuerca (5) que se encuentra fija sobre el soporte de montaje (3) cuenta con un sistema de ajuste (13) que elimina el juego de la rosca para un mejor control del gap. Estas piezas están fabricadas en acero inoxidable 304 y el porta herramienta (12) de Nylamid®. Cabe hacer mención que debido a que el mecanismo de avance estará en contacto con el agua, los materiales fueron seleccionados para evitar la corrosión y deterioro del mismo. La unión de las guías y todo el soporte para el tornillo de avance, se logra mediante la placa (4) que también sirve de plataforma para el porta herramienta.



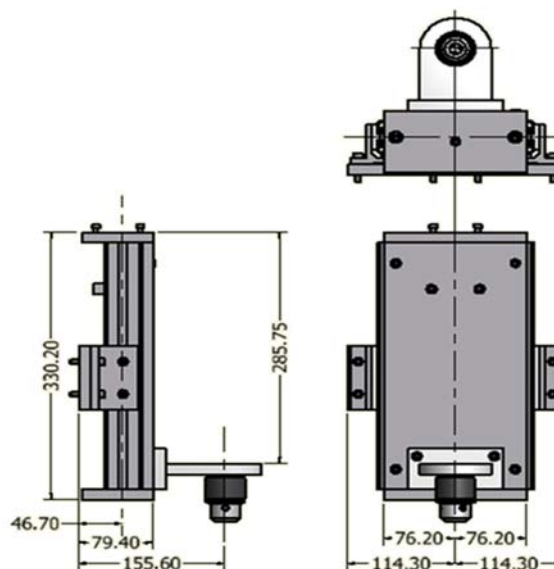
*Figura 3-3. Mecanismo de avance.*

Para el accionamiento del mecanismo de avance, se cuenta con un servomotor NEMA 23 modelo DMX-UMD-23-3 con la gráfica de par-velocidad (color violeta) que se muestra en la figura 3-4.



**Figura 3-4.** Curva par-velocidad motor DMX-UMD-23-3.

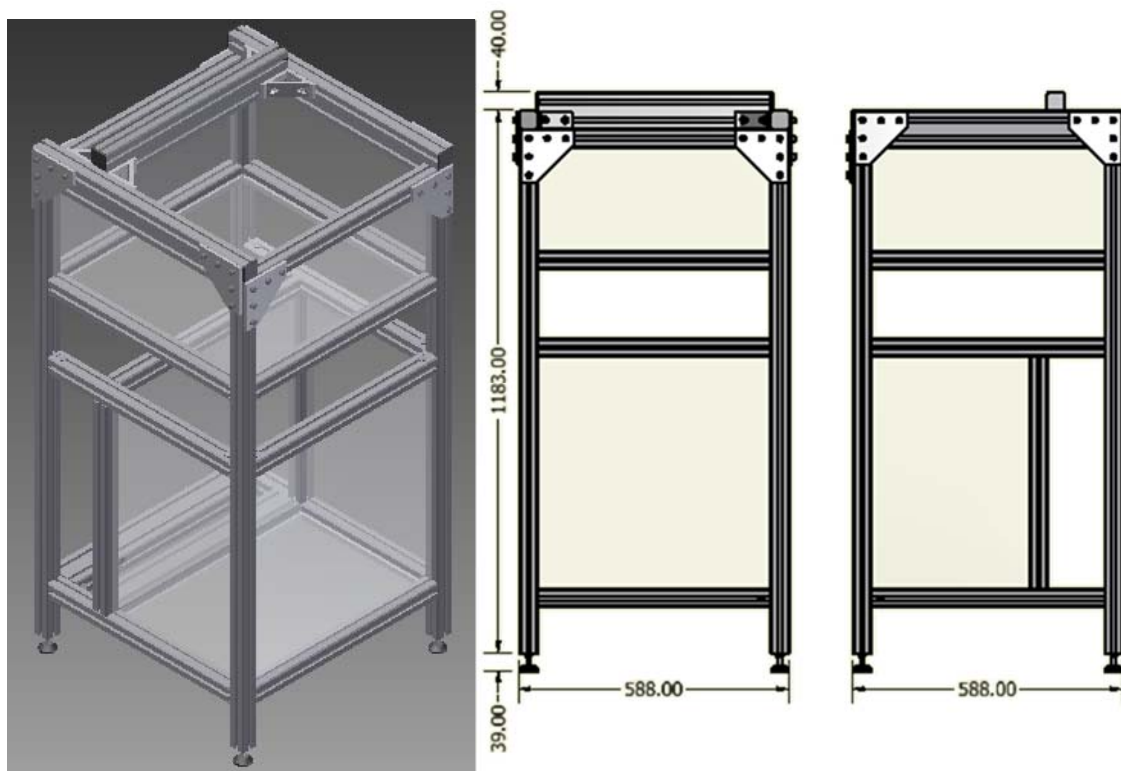
Considerando la masa del mecanismo de 6.177 Kg, las relaciones geométricas, las fricciones de guías y valeros a una aceleración angular máxima de  $2\pi/60$  rad/seg y sustituyéndolas en ec. (3.24) y ec. (3.25) el par de inicio es  $51.5 \times 10^{-3}$  N-m y el par sostenido es  $51.46 \times 10^{-3}$  N-m, puesto que ambos son menores al par máximo del motor de 1.0 N-m a 1 RPM que equivale al avance típico de una maquina EDM de 1 mm/min. Es posible garantizar la respuesta dinámica. Utilizando la técnica de micro pasos con un encoder con 4000 cuentas sobre revolución se consigue una precisión de avance de 0.00025 mm/paso, lo que es suficiente, ya que se requiere tan solo de 0.001 mm/paso.



**Figura 3-5.** Dimensiones generales del mecanismo en mm.

### 3.2 Diseño del bastidor

El bastidor fue fabricado de IPS de aluminio 7075 de 40 mm x 40 mm figura 3.6, el uso de estos perfiles ofrece grandes ventajas como un diseño adaptable y fácil de ensamblar, es por ello que son comúnmente usados en la fabricación de módulos de manufactura a nivel industrial, además de ser resistente a la corrosión y ligero. La versatilidad de este sistema modular lo hace idealmente adecuado para marcos y bastidores de máquinas. Sistemas deslizables lineales, guardas de seguridad y gabinetes. Las estructuras de aluminio modular ofrecen una gran flexibilidad y funcionalidad, combinada con una apariencia visual de limpieza de la superficie anodizada. Estas ventajas importantes presentan una multitud de beneficios en la construcción de la máquina y la automatización del proyecto. Comparado con los bastidores de acero, el sistema modular de aluminio IPS ofrece beneficios como la flexibilidad y versatilidad. La pre-ingeniería del IPS, redujo el tiempo invertido en ingeniería y fabricación. Los cambios y modificaciones se facilitaron. El tiempo del diseño a la fabricación fue extremadamente corto con las siguientes ventajas y la reducción de los costos típicos de los sistemas tradicionales de manufactura: sin soldadura, sin limpieza sin filos, sin distorsiones y sin pintura.

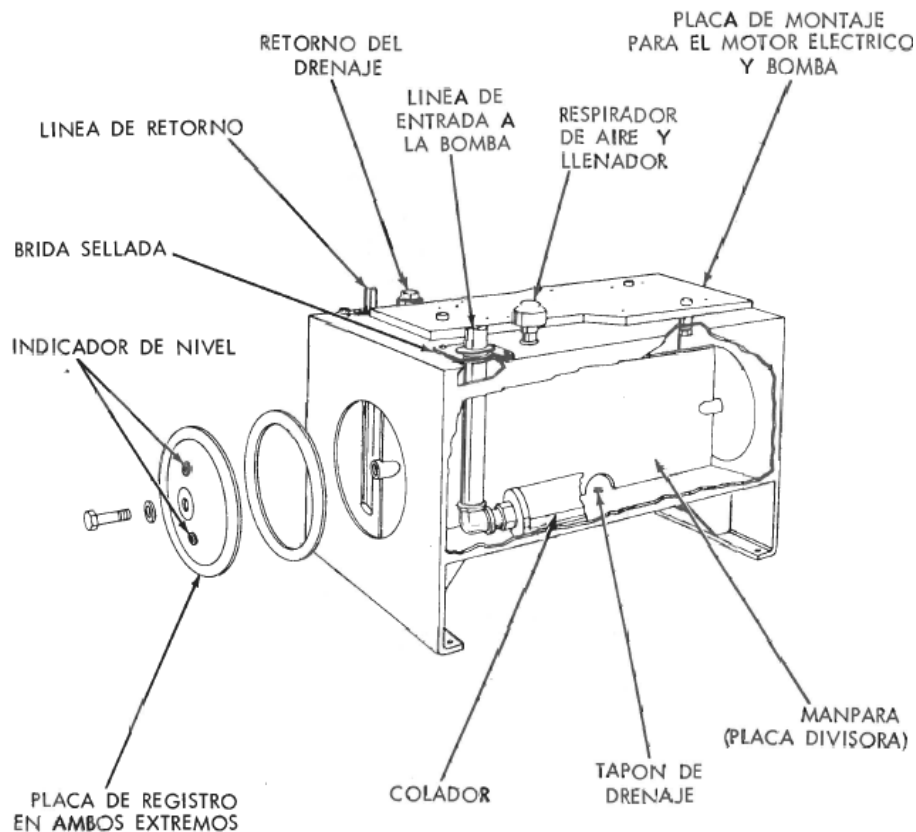


*Figura 3-6. Bastidor de máquina EDM fabricado en IPS dimensiones en mm.*

### 3.3 Tanque contenedor

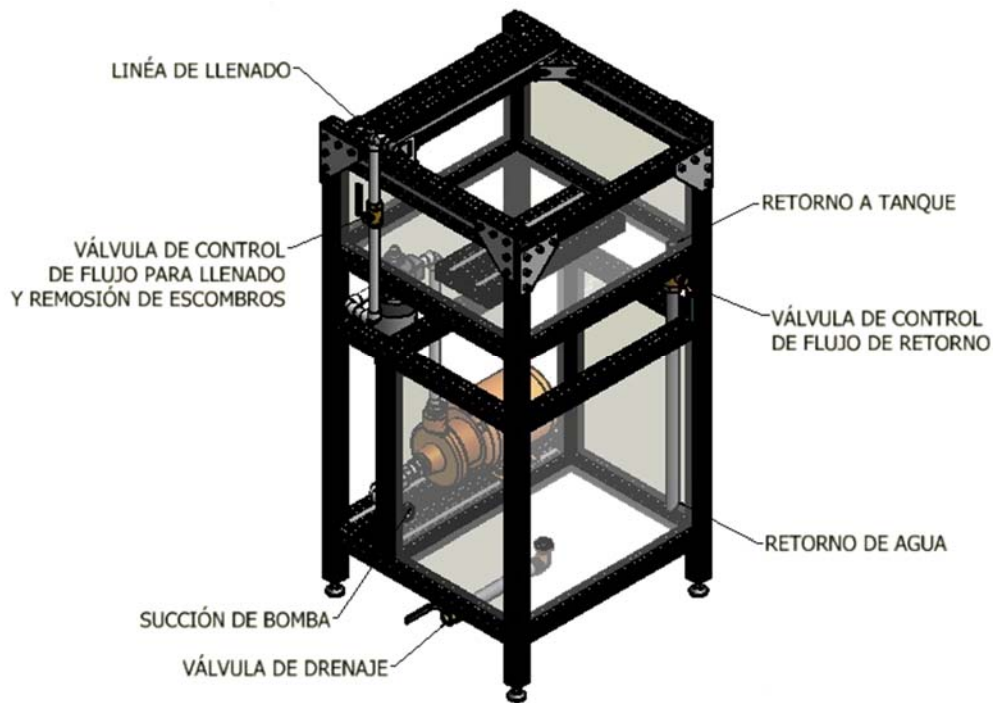
En esta parte se explica las bases de diseño del tanque como un espacio apropiado para el fluido requerido más una reserva. En este caso no se requiere de un control de disipación del calor debido a que la temperatura no es un factor que pueda afectar al agua en sus propiedades, como sucede en los aceites usados convencionalmente en este proceso. El depósito o tanque debe cumplir con varias funciones principales: contener el fluido dieléctrico sobre el cual se sumergen las piezas y electrodos, almacenar el fluido hasta que el sistema lo necesita, y permitir que se asienten los contaminantes y los residuos producidos durante el maquinado.

Un depósito industrial típico para aceite en sistemas EDM conforme a los estándares industriales se muestra en la figura 3-7, además de que se utilizan sistemas de disipación de calor para evitar que el aceite pierda sus propiedades.



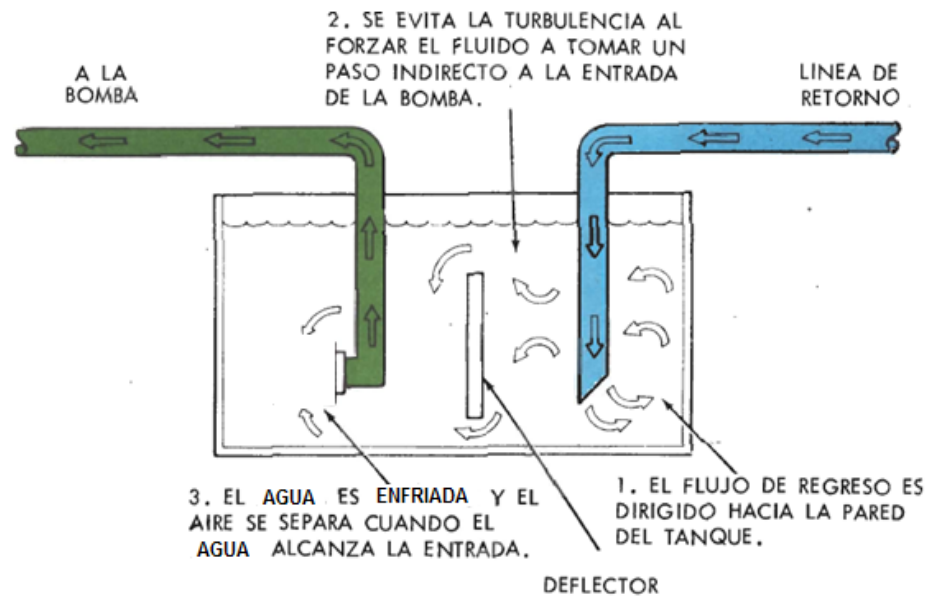
*Figura 3-7. Depósito industrial EDM típico.*

El depósito para la máquina EDM figura 3-8 está diseñado para dar un fácil mantenimiento al fluido, el fondo del tanque tiene un tapón de drenaje en el punto más bajo para poder vaciarlo completamente y debido a que el tanque ha sido fabricado de ACRILICO transparente, no es necesaria la colocación de mirillas de nivel. El no contar con una tapa, permite la entrada de aire que el flujo necesita para mantener la presión estando vacío o lleno. Una placa deflectora se extiende hacia los lados través del tanque y se usa para separar la línea de entrada de la bomba de la línea de regreso de esa manera evita la turbulencia y además permite a los materiales extraños y los escombros del proceso asentarse. Al mismo tiempo contribuye a que el agua pueda liberarse del aire.



**Figura 3-8.** Esquema de tanque contenedor.

Las líneas de conexión del depósito terminan bajo el nivel de agua, las conexiones de las líneas en la cubierta están empacadas y atornilladas como si fuera una brida con el objetivo de un desmontaje fácil para limpieza. Tanto las líneas de entrada como de retorno están por debajo del nivel de fluido, para evitar que el agua se pueda airear y hacer espuma. La línea de retorno al no estar equipada con un colador fue cortada a 45°. Evitando que la abertura de la línea tenga una capa de fundación en el tanque y que ello reduzca el flujo. Esta abertura está orientada de tal manera que el flujo es descargado contra la pared del tanque y alejado de la entrada a la línea de la bomba como se explica en figura 3-9.



*Figura 3-9. Comportamiento teórico del fluido en el tanque.*

El tamaño del tanque recomendado para los sistemas hidráulicos es de dos o tres galones de líquido por cada galón por minuto de desplazamiento de la bomba. Puesto que para este caso los galones de desplazamiento dependerán de la apertura de las válvulas de alimentación y retorno, y como el fluido únicamente se encuentra en recirculación, no es necesario aplicar este principio. Y solo se busca con el tamaño evitar la formación de remolinos durante la aspiración. Las dimensiones del tanque contenedor son de: 550 mm de ancho, por 550 mm de alto y 386 mm de fondo. Y las del tanque de maquinado son de: 550 mm de largo, por 550 mm de ancho y 265 mm de alto.

### 3.4 Sistema de bombeo y filtrado

En general es importante analizar los parámetros relacionados en la impulsión del fluido, así como las características y configuración del sistema de tuberías y accesorios. Para proceder a la selección de la bomba se consideran los siguientes parámetros:

- Carga total.
- Gasto.
- Viscosidad cinemática.
- Presión atmosférica del lugar.
- Propiedades químicas del equipo.

Para este equipo se requiere un caudal mínimo de 10 gpm y la carga total es depreciable por las dimensiones de las tuberías y los conectores además de que el fluido a desplazar es agua. Por lo que no requiere de grandes especificaciones y resulta

suficiente el uso de una bomba convencional para agua de uso residencial, siendo la más pequeña disponible comercialmente de  $\frac{1}{4}$  hp.

**Tabla 3-1.** Placa de datos de la bomba.

MOTOBOMBA CENTRIFUGA	
Voltaje.	115/230 Vca 60 Hz.
Corriente	6.7/2.7 Amp.
rpm	3450
Flujo Max.	92 l/min
Altura Max.	18 m
Succión	1" NPT
Descarga	1" NPT

Las principales causas de problemas en equipos de bombeo independientemente de la selección son:

- Desalineamiento de las tuberías de succión de la bomba
- Tuberías de succión defectuosas.

Los requisitos que debe cumplir para evitar estos problemas son:

- La línea de succión debe ser lo más corta posible pero no menor a 5 veces el diámetro de la tubería.
- Lo más recta posible.
- Mínimo de accesorios.
- Curvas de radio amplio.
- Pendientes de elevación continúa hacia la bomba.
- Reductores excéntricos y con el lado recto hacia arriba.
- A prueba de fugas.

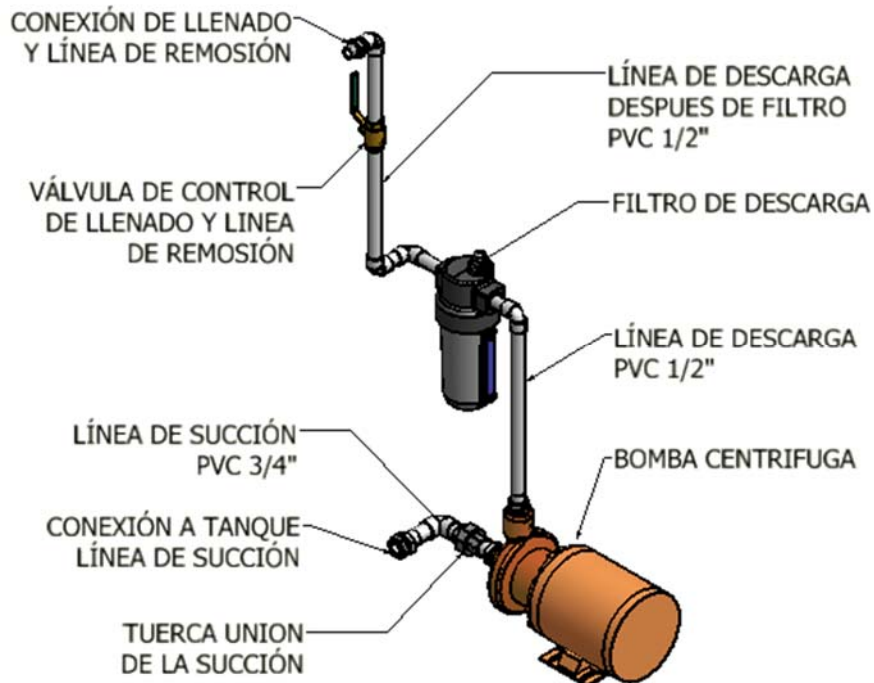
Cada uno de estos requisitos tiene su razón de ser y el incumplimiento de cada uno de ellos puede provocar problemas a la instalación. Si la tubería es demasiado larga las pérdidas serán más altas y por consiguiente la altura máxima a la que la bomba puede succionar, se reduce en función del aumento de pérdida, si existen demasiados cambios de dirección en la tubería además de incrementarse las pérdidas se pueden provocar remolinos y turbulencias que al entrar en la bomba se traducirán en baja eficiencia en la impulsión. La introducción de burbujas de aire en el flujo suele ser un problema frecuente, estas pueden ser provocadas por:

- Falta de estanqueidad en la tubería de succión.



- Pendiente invertida en la tubería de succión.
- Reducciones excéntricas mal instaladas con el lado recto hacia abajo.
- Escasa profundidad de la tubería en el líquido.

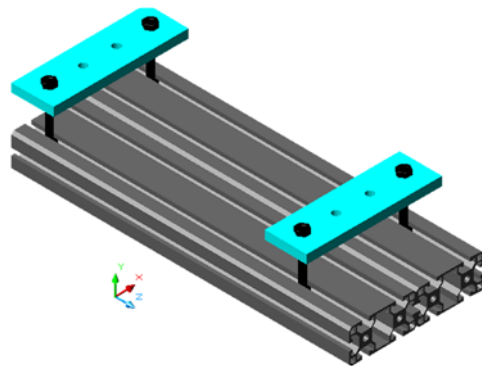
En la figura 3-10, se aprecia el ensamble del sistema de bombeo y filtrado.



*Figura 3-10. Ensamble de sistema de bombeo y filtrado.*

### 3.5 Sistema de sujeción de piezas

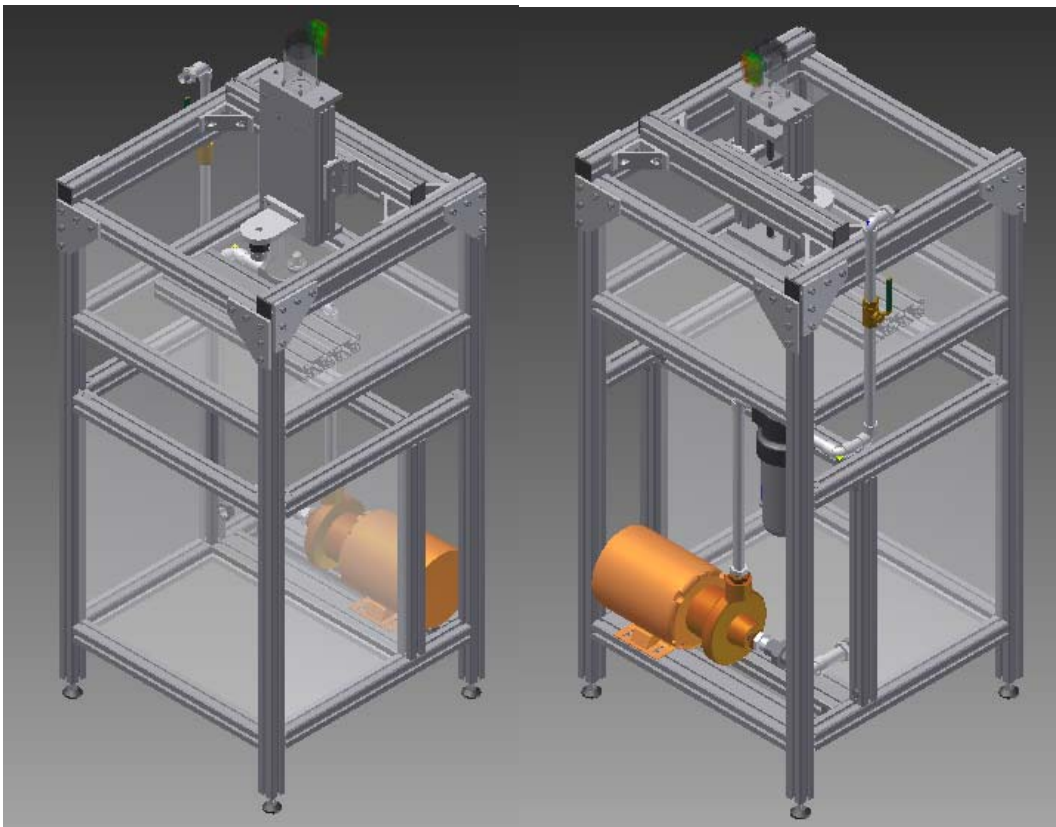
Se decidió usar un perfil de IPS de aluminio 7075 de 40mm X 80 mm para la mesa de sujeción de piezas figura 3-11, ya que gracias a las ranuras características del IPS, estas son usadas para presionar los tornillos de las mordazas. La sujeción de piezas es necesaria aun cuando no existe contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo, esto debido a que al acercarse demasiado la herramienta (electrodo) a la pieza, éste podría llegar a pegarse (corto circuito). Al levantar el electrodo para despegarlo de la pieza, éste tendería a mover la pieza a maquinar. La mesa de sujeción está aislada del resto de la máquina por seguridad, ya que se encuentra sujeta al acrílico y no al bastidor de aluminio. Aunque estas máquinas generalmente trabajan con la polaridad negativa en la pieza, es uno de los requisitos del diseño que se pueda operar invirtiendo las polaridades para comparar sus efectos.



*Figura 3-11. Sistema de sujeción de piezas.*

### 3.6 Ensamble del sistema

El ensamble general de la máquina EDM, se muestra en la figura 3-12, para los diagramas de fabricación de las piezas y ensamble detallado de los subsistemas, es necesario referirse al apéndice A. En la figura 3-13, se muestra una foto de la máquina construida.



*Figura 3-12. Esquema de ensamble de los subsistemas de la máquina EDM.*



*Figura 3-13. Máquina EDM construida.*

# Capítulo 4

## Desarrollo del sistema de potencia

En este capítulo se analizan y comparan diferentes esquemas de circuitos generadores de descargas, resaltando sus principales ventajas y desventajas con el propósito de seleccionar el más adecuado para la máquina EDM en desarrollo. Se presenta el diseño del circuito generador de voltaje y de control de descargas propuesto.

### 4.1 Circuitos generadores de potencia

Para erosionar metal de una pieza de trabajo es necesario que la máquina EDM utilice una chispa cuyas características sean controladas, a fin de obtener condiciones óptimas en una aplicación específica, por ejemplo una alta remoción de material o una fina textura de la superficie estos requisitos demandan una fuente de voltaje adecuada para iniciar y mantener el proceso de descarga, así como un sistema que proporcione el control necesario sobre la intensidad, duración y tiempos de ciclo de las descargas.

#### 4.1.1 El circuito de relajación (RC)

El circuito de relajación (*RC*) mostrado en la figura 4-1 consiste en un capacitor que es cargado a través de la resistencia al voltaje de corriente directa, que generalmente es fijo [13]. Cuando el voltaje a través del capacitor es mayor que el voltaje de ruptura del dieléctrico se presenta la descarga y se erosiona la pieza de trabajo. El voltaje de ruptura varía en función de la distancia geométrica entre el electrodo y la pieza de trabajo, y del grado de ionización del espacio situado entre las superficies participantes del mecanizado. La descarga (chispa) no se sostiene porque el capacitor se descarga más rápido de lo que se puede recargar a través de la resistencia. El propósito de la resistencia es aumentar el tiempo que toma el capacitor en cargarse, permitiendo que exista el tiempo suficiente para la desionización del dieléctrico entre las descargas. Esta

secuencia se puede examinar en términos eléctricos porque se sabe que el aumento en el voltaje durante la carga de un capacitor está dado por la expresión:

$$V_c = V_s (1 - e^{-t/RC}) \quad (4.1)$$

donde  $V_c$  es el voltaje del capacitor,  $V_s$  es el voltaje de alimentación,  $t$  es el tiempo,  $R$  es la resistencia y  $C$  es la capacitancia. El voltaje del capacitor se aproxima al de alimentación con una constante de tiempo igual a  $RC$ , y la chispa se descarga cuando  $V_c$  alcanza un valor correspondiente al voltaje de ruptura entre el electrodo y la pieza de trabajo,  $V_b$ . En la figura 4-2 se muestra la relación entre el voltaje de carga y descarga del capacitor como una función del tiempo.

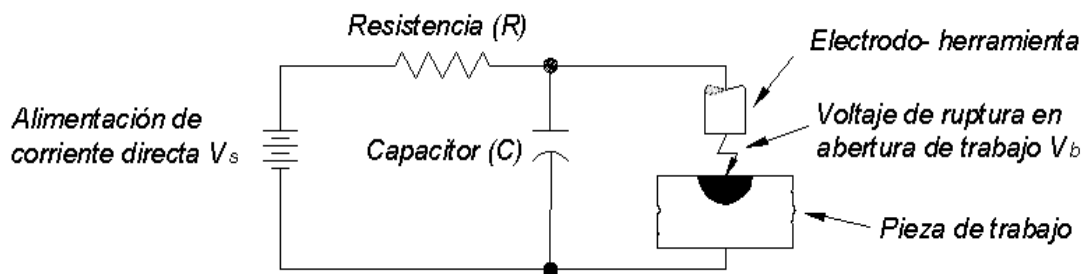


Figura 4-1. Circuito básico de relajación (RC).

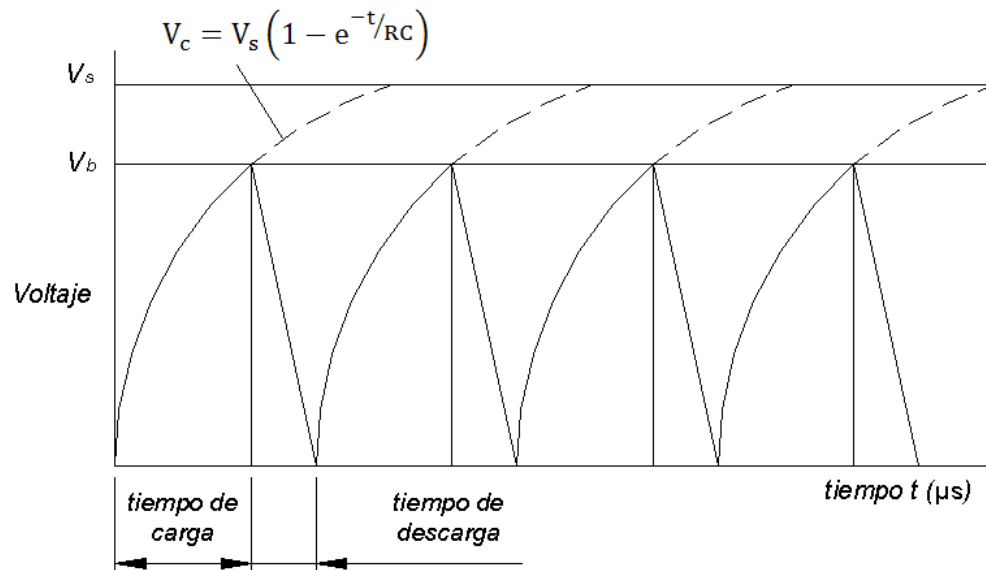


Figura 4-2. Relación entre voltaje de carga y tiempo.

La energía teórica ( $W$ ) en una descarga individual de chispa está dada por la expresión:

$$W = \frac{1}{2} V_b^2 C \quad (4.2)$$

De donde se deduce que cuanto mayor sea el valor de  $V_b$  con respecto a  $V_s$ , mayor será la energía descargada. Sin embargo, de la curva de voltaje de carga contra tiempo que se muestra en la figura 4-2, se puede observar que el tiempo de carga aumenta conforme el valor de  $V_c$  se aproxima al de  $V_s$ . Por lo tanto, si  $V_b$  fuera cercano a  $V_s$ , ocurrirían menos descargas por unidad de tiempo y en consecuencia la rapidez de remoción de metal disminuiría.

En las fuentes de potencia tipo  $RC$ , el incremento en la remoción de material depende más de una mayor intensidad de corriente y capacidad de los capacitores, que del incremento del número de descargas por segundo. Esto origina que el sobrecorte sea mayor debido a que las descargas son de mayor energía y remueven partículas más grandes. Las descargas ocurren a voltajes relativamente altos y son difíciles de controlar, lo que resulta en bajas velocidades de remoción de metal y considerable desgaste de la herramienta. Pero la principal ventaja es que el circuito es extremadamente sencillo, confiable y produce texturas superficiales finas tales como  $0.25 \mu\text{m Ra}$ . [13].

Tomando en cuenta que el tiempo de ciclo es importante para permitir la des ionización del dieléctrico y la remoción de los residuos, es necesario realizar ajustes en voltaje,  $R$  y  $C$ , para un conjunto dado de condiciones de operación. Para obtener velocidades altas de maquinado se tiene que reducir la constante de tiempo  $RC$  para lograr la carga rápida del capacitor, pero, a medida que  $R$  se reduce, la frecuencia aumenta y puede llegar un punto en que no se logra la des ionización, dando lugar a un arco eléctrico. Esto ocasiona que el maquinado efectivo finalice y se crean daños térmicos. Actualmente se utilizan fuentes tipo  $RC$  pero con corrientes muy bajas que permiten condiciones estables de mecanizado.

Existe también una variante de las fuentes de potencia tipo  $RC$ , y es la llamada  $RLC$ , en la que la inductancia  $L$  en el circuito ayuda a controlar la velocidad con la que el capacitor se carga y descarga. Se estima que la inductancia en el circuito puede duplicar la frecuencia de las descargas.

### 4.1.2 Circuito generador de pulsos

El circuito generador de pulsos utiliza además de la resistencia y el capacitor, una serie de circuitos a base de transistores y semiconductores que permiten generar y controlar los pulsos [13]. Mediante un diodo, que representa una mínima resistencia cuando el capacitor se carga y máxima cuando se descarga. La mínima resistencia disminuye el tiempo de carga del capacitor y la máxima resistencia asegura que la descarga sea a través de la pieza de trabajo. La acción del diodo es similar a la de un interruptor que cierra y abre a velocidades muy altas, por lo tanto la frecuencia de las descargas pueden aumentarse considerablemente.

La figura 4-3(a) muestra una forma sencilla del circuito generador de pulsos transistorizado. Las descargas se controlan mediante una unidad de conmutación a una frecuencia seleccionada de acuerdo a los parámetros de maquinado. Sin embargo, las condiciones en el espacio de trabajo varían, lo que ocasiona retrasos en el encendido. Como el tiempo de encendido y el tiempo de apagado son fijos, el periodo útil de descarga  $x$  varía y disminuye la eficiencia, Figura 4-3(b).

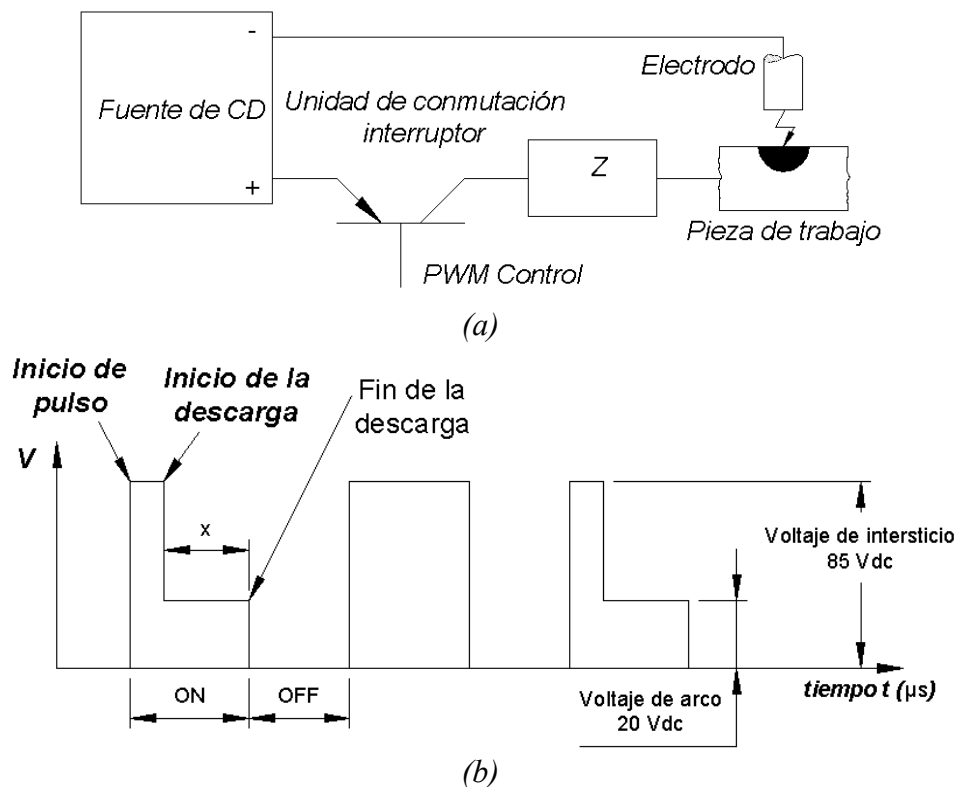
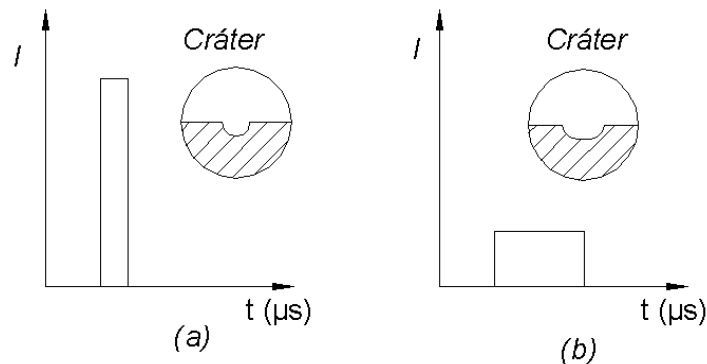


Figura 4-3. a) Circuito básico generador de pulsos, b) característica de descarga.

Por lo general las fuentes de poder EDM son de 25 o 50 A. Un circuito tipo pulsante generalmente es operado a bajos voltajes (de 60 a 80 V), lo que permite características de descarga con un perfil menor. Los cráteres formados en la descarga tienden a ser más anchos, ver figura 4-4 [13].



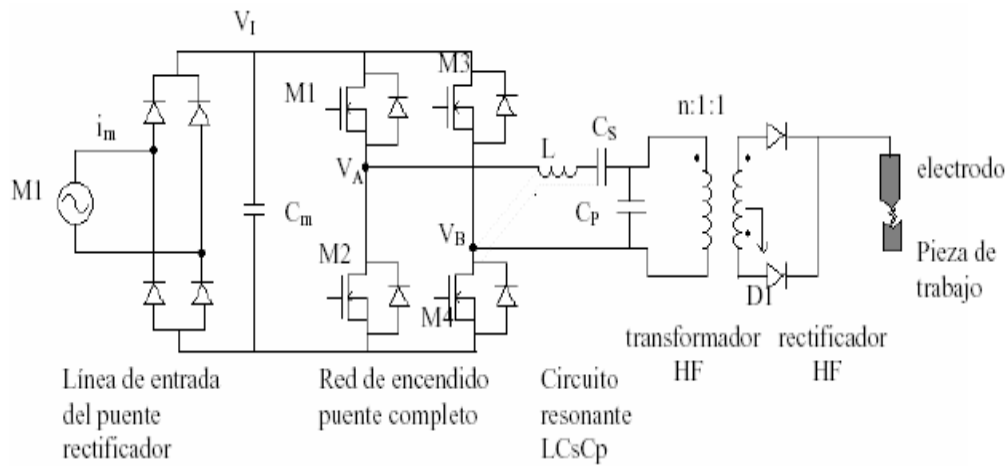
**Figura 4-4.** Comparación de características de descargas de igual energía producidas por: a) generador RC, b) generador transistorizado.

Las fuentes de poder tipo pulsante son más versátiles, sin embargo, son mucho más complejas que una fuente tipo RC, esto debido a que requiere de todo un sistema electrónico para la generación de los pulsos. El desarrollo de los generadores de pulsos EDM está determinado por su poder de disipación, reducción del tamaño, y por las necesidades específicas para aplicaciones del proceso EDM [37]-[38].

#### 4.1.3 Inversor resonante de puente completo DC serie paralelo

Los inversores resonantes permiten la operación en semiconductores de potencia con pérdidas de encendido reducidas [39], [40]. El generador de pulsos es un convertidor resonante de puente-completo dc serie paralelo ( $LCsCp$ ), como se muestra en la Figura 4-5, en donde la frecuencia de encendido es mucho más grande que la frecuencia de maquinado. Los convertidores resonantes  $LCsCp$  son capaces de alcanzar el sobre voltaje requerido para la ruptura del dieléctrico y trabajando arriba de la frecuencia de resonancia la corriente se retrasa al voltaje así que esta topología consigue cero voltaje de encendido, es decir, transistores encendidos a cero voltaje, resultando en mínimas pérdidas de encendido.



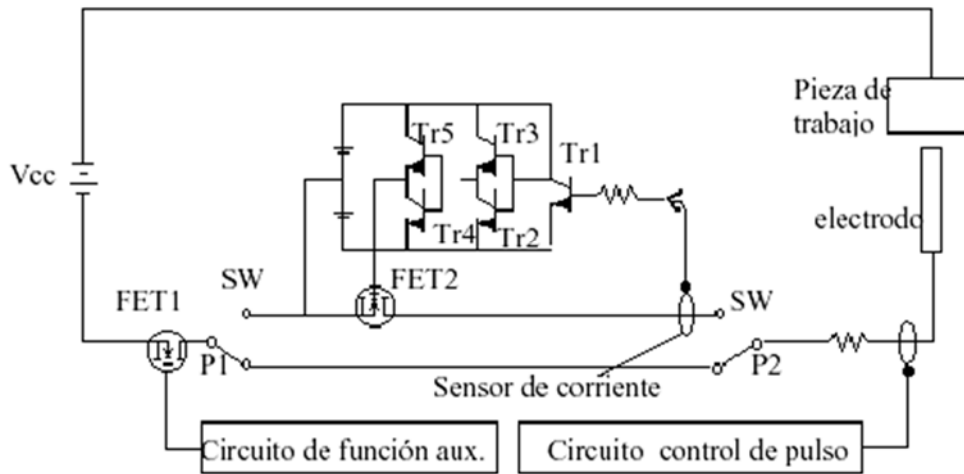


**Figura 4-5.** Diagrama del circuito del suministro de poder EDM usando un convertidor resonante LCsCp de puente completo.

El generador de pulsos para EDM basado en un convertidor resonante de series en paralelo proporciona una gran reducción en peso y tamaño, siendo especialmente conveniente para operaciones portátiles. La tecnología, primeramente orientada para operaciones bajo el agua en plantas nucleares, pudiera ser extendida para maquinado de metal con viruta pequeña.

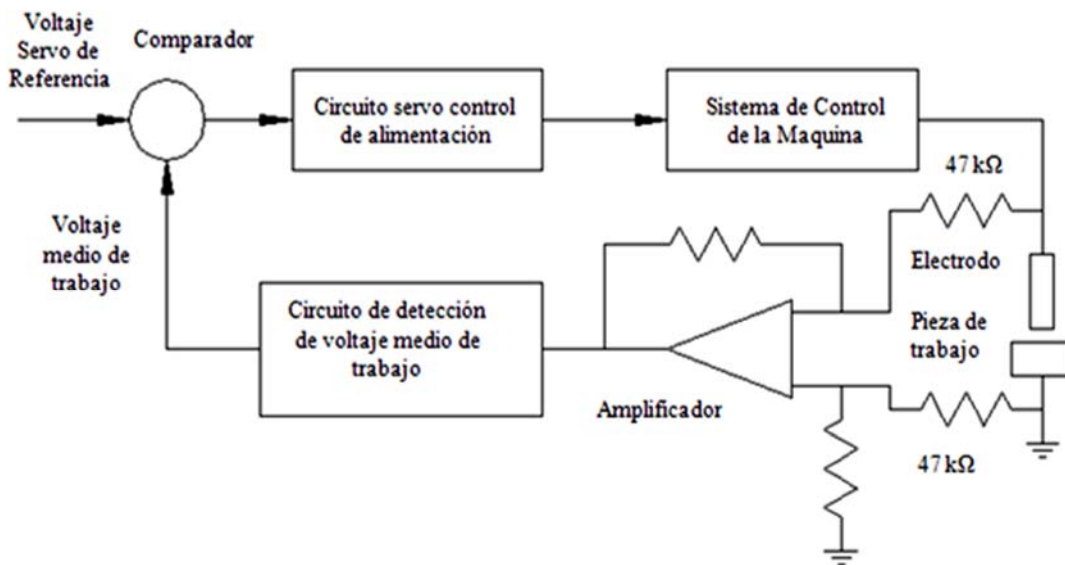
#### 4.1.4 Generador de transistor tipo isopulso y alimentación servo controlada

El desarrollo del generador de transistor tipo isopulso para micro EDM ha sido exitoso en la generación de la duración de pulso para acabado [41], semiacabado [42] y en la producción de piezas como engranes miniatura ya que ofrece gran calidad en el producto final comparado con otros procesos [51]. El generador RC es principalmente aplicado en el micro-EDM convencional aunque el generador de transistor tipo isopulso es generalmente más efectivo para obtener altos rangos de remoción, porque el generador de transistor es incapaz de generar los pulsos de iso-duración para la corriente de descarga con pequeñas duraciones de pulso (muchas docenas de nano-segundos), que es el nivel normal para el micro-EDM. El generador de transistor tipo isopulso fue desarrollado por [42] usando un sensor de corriente con alta respuesta de frecuencia, Figura 4-6. Con el nuevo generador de transistor tipo isopulso desarrollado, la duración del pulso puede ser reducida a cerca de 30ns, que es el equivalente a la duración del pulso utilizada por el generador de pulso RC convencional para micro-EDM. Otros autores [50] han propuesto un electro-mecanismo a base de suspensión magnética del electrodo controlado por PWM lo que aumenta la corriente media con la acumulación del ciclo de trabajo.



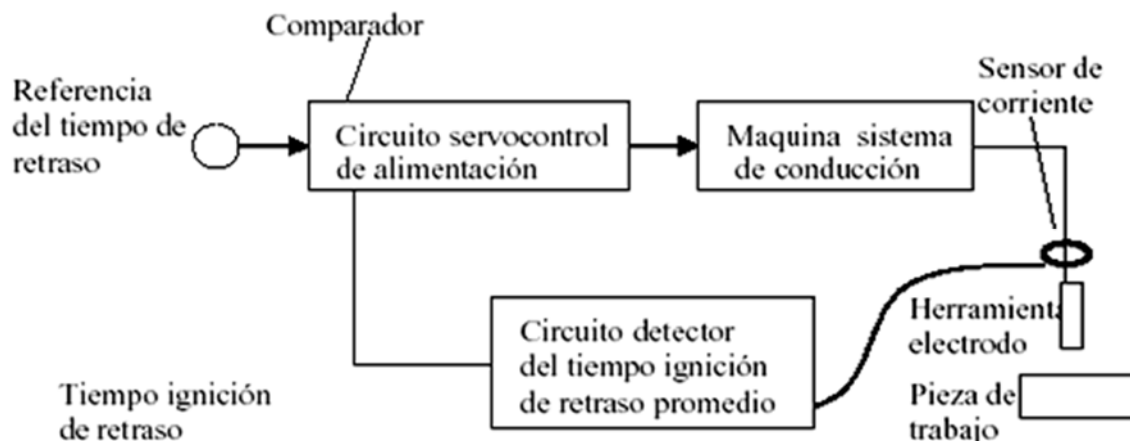
**Figura 4-6.** Generador transistor tipo isopulso para micro-EDM.

Con el fin de conseguir un maquinado estable y mejorar las características de maquinado, un sistema de alimentación con servo control para micro-EDM usando un tiempo de ignición con retraso fue desarrollado en [43], [44], ver figura 4-7. Con este desarrollo se obtuvo un rango de remoción cerca de 24 veces más alto que con el generador de pulso RC convencional con rango de alimentación constante en ambos semiacabado y acabado. La efectividad de la alimentación con servo control fue más alta en acabado que en semiacabado, mientras que el generador de transistor tipo isopulso fue más efectivo en semiacabado que en acabado.



**Figura 4-7.** Servo control de alimentación para generador de pulso RC.

También se desarrolló [44] otro sistema nuevo con servo control de alimentación para el generador de transistor tipo isopulso (Figura 4-8). En lugar de monitorear el voltaje de trabajo medio, el tiempo de retraso medio es usado para retroalimentar la señal para controlar la velocidad de alimentación.



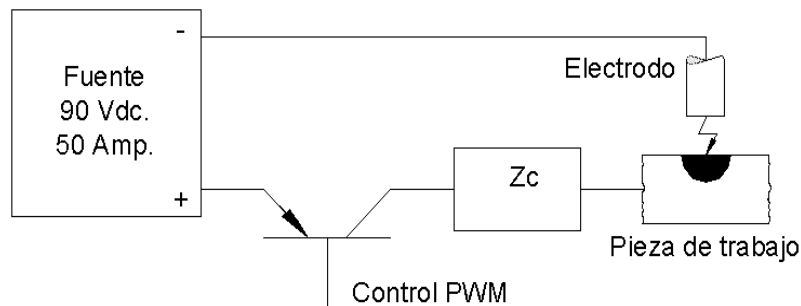
**Figura 4-8.** Servo control de alimentación para el generador transistor tipo isopulso.

Los efectos de usar la alimentación con servo control son significantes porque el rango de remoción del generador de pulsos  $RC$  de alimentación servo controlada es alrededor de nueve veces más alta que la de generador de pulsos  $RC$  con control de alimentación constante. Los resultados de la velocidad de maquinado para el generador de transistor tipo isopulso con alimentación servo controlada fue cerca de 3 veces más alta que con generador de pulsos  $RC$  con alimentación servo controlada. Por lo tanto, el generador de transistor tipo isopulso con alimentación servo controlada puede mejorar la velocidad de remoción cerca de 24 veces más alta que con generador de pulsos  $RC$  con control de alimentación constante.

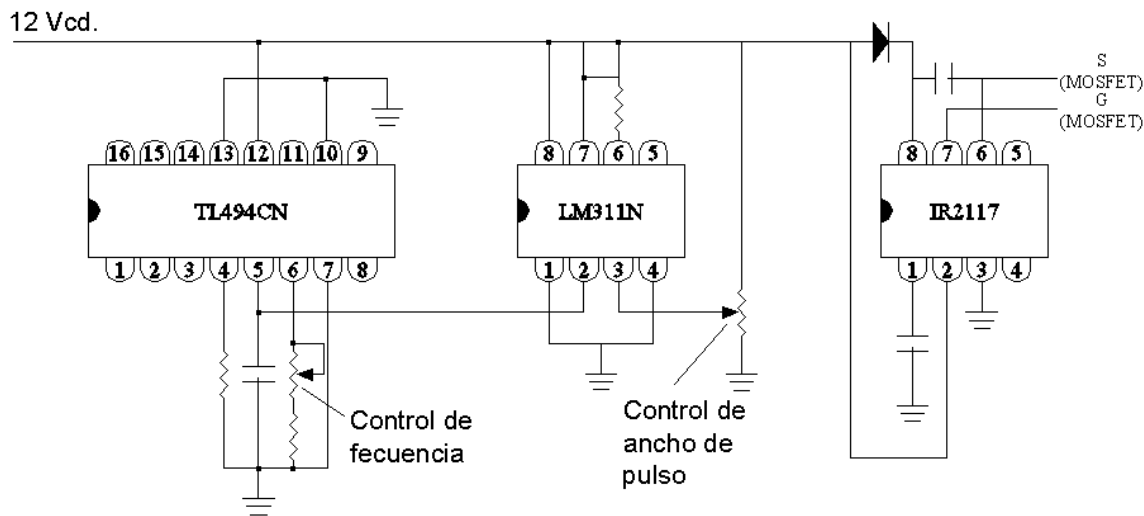
#### 4.1.5 Sistema de potencia por fuente regulada de voltaje y circuito generador de pulsos de descarga

Este tipo de fuente de potencia utiliza un regulador de voltaje CC-CC para generar la potencia necesaria a un nivel de voltaje ajustable, y un circuito con IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) que permiten generar y controlar los pulsos de la descarga tanto en frecuencia como en tiempo de encendido. La acción del IGBT es la de un interruptor que se cierra y se abre a velocidades muy altas, por lo tanto la frecuencia de las descargas puede aumentarse considerablemente. En una forma sencilla del circuito, Figura. 4-9, las descargas se controlan mediante una unidad de conmutación en una frecuencia fija seleccionada de acuerdo a los parámetros de maquinado, a la vez que

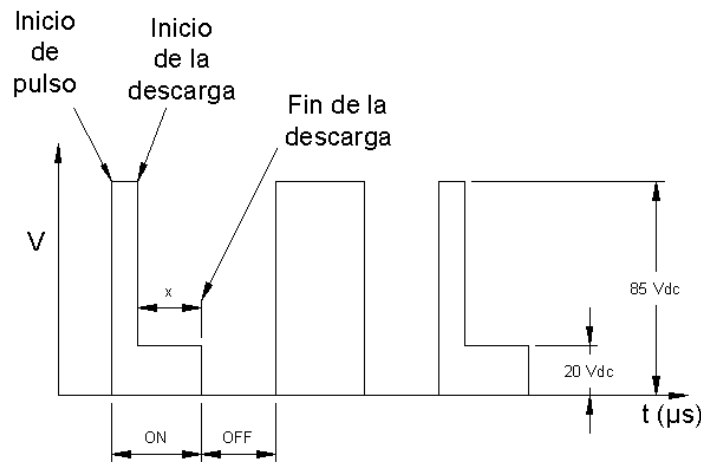
es posible controlar el ancho de pulso mediante dos potenciómetros, Figura 4-10. Sin embargo, las condiciones en la abertura de trabajo pueden variar, lo que podría ocasionar retrasos en el encendido. Como el tiempo de encendido y el tiempo de apagado son fijos, el periodo útil de descarga  $X$  varía, disminuyendo la eficiencia, figura 4-11. Por lo general estas fuentes de potencia son de 25 ó 50 A. Un circuito tipo pulsante generalmente es operado a bajos voltajes (de 60 a 80 V), lo que permite características de descarga con un perfil menor, con el resultado de que los cráteres formados en la descarga tienden a ser más profundos y anchos [13].



*Figura 4-9. Circuito simplificado de pulsos de descarga.*



*Figura 4-10. Circuito generador de pulsos.*



**Figura 4-11.** Característica de la descarga.

Las fuentes de poder tipo pulsante son más versátiles, sin embargo, son mucho más complicadas que una fuente tipo RC, debido a que requiere de todo un sistema electrónico para la generación de los pulsos. El desarrollo de los generadores de pulso EDM está determinado por su poder de disipación, reducción del tamaño y por las necesidades específicas para aplicaciones del proceso EDM [37], [38].

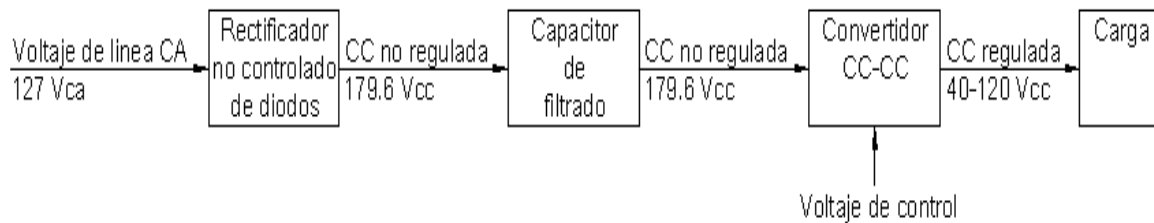
## 4.2 Diseño de la fuente de voltaje

En base al análisis de los diferentes sistemas usados para EDM se concluye que el más conveniente dadas sus características y adaptación a los requisitos del sistema EDM a desarrollar debe ser del tipo fuente regulada de voltaje y circuito generador de pulsos de descarga cuyo esquema general y modo de funcionamiento se describe en 4.1.5. En lo sucesivo se describen de manera puntual cada uno de sus componentes, su funcionamiento, modelación y diseño.

### 4.2.1 El convertidor CC-CC

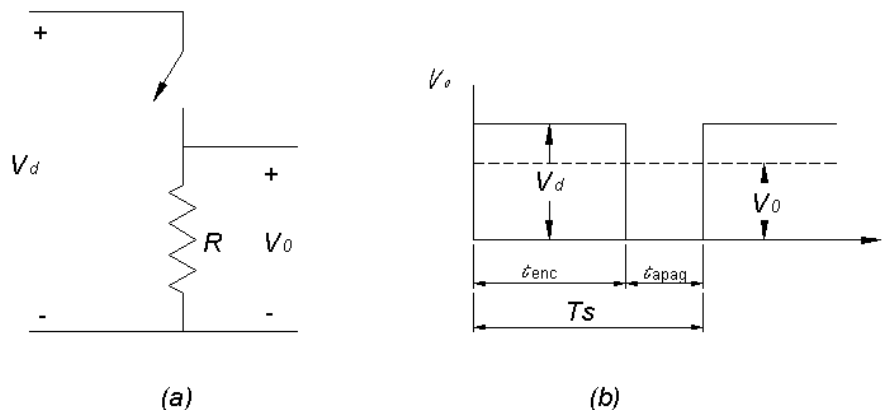
Para el diseño de la fuente de voltaje es necesario cumplir con los requisitos de regulación dentro del rango establecido en las especificaciones de diseño que son de 40 a 120 Vcd. Los convertidores de CC-CC se usan extensamente en sistemas de suministro de energía de CC regulada de modo de conmutación y para aplicaciones de accionamientos motrices [45]. Como se muestra en la figura 4-13, la entrada a este convertidor es un voltaje de CC no regulado que se obtiene mediante la rectificación del voltaje de línea, y por tanto existen fluctuaciones debidas a los cambios en la magnitud del voltaje de la línea. El convertidor en modo de fluctuación de CC a CC es usado para

convertir la entrada de CC no regulada en una salida de CC controlada en el nivel de voltaje ajustado. Para esta aplicación se requiere del uso de una de las topologías básicas del convertidor, que es la de reductor. La salida alimenta la carga, la cual puede ser representada por una resistencia, pero en este caso la salida va hacia el interruptor controlado representado por el IGBT quien abre o cierra dependiendo de la frecuencia y el tiempo de encendido gobernado por el control PWM, figura 4-12.



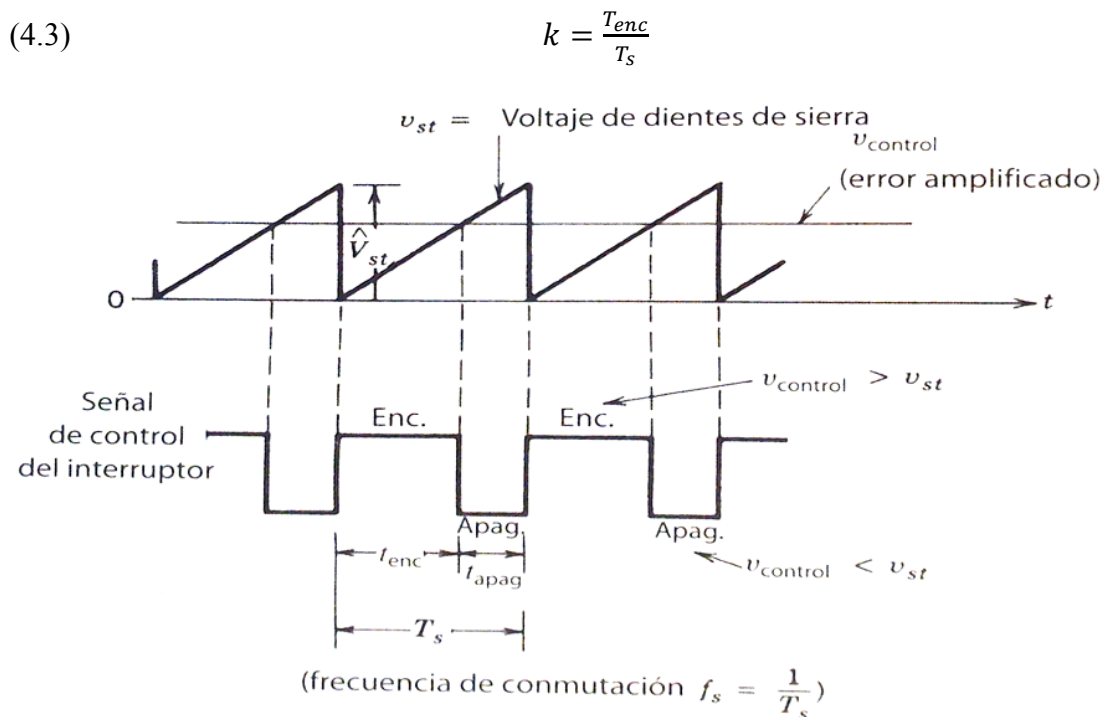
**Figura 4-12.** Sistema convertidor CC-CC.

En el convertidor de CC, el voltaje medio de salida de CC es controlado para que iguale al nivel deseado, aunque puede fluctuar el voltaje de entrada y la carga de salida. Para controlar el nivel de voltaje a la salida, es necesario controlar el tiempo de encendido y apagado de la entrada ( $t_{enc}$  y  $t_{apag}$ ). Este método de conversión se ilustra con un convertidor CC-CC básico en la figura 4-13(a). El valor medio  $V_o$  del voltaje de salida  $V_d$  en la figura 4-13(b) depende de  $t_{enc}$  y  $t_{apag}$ . El método para controlar el voltaje de salida  $V_o$  emplea la conmutación constante  $T_s = t_{enc} + t_{apag}$  y el ajuste en la duración de encendido del interruptor para controlar el voltaje medio de salida. Este método es llamado modulación de anchura de pulso. (Pulse Width Modulation, PWM) y la relación de trabajo del interruptor  $k$ , se define como la proporción de encendido con el periodo de conmutación.



**Figura 4-13.** Conversión CC-CC en modo de conmutación.

En la conmutación de PWM a una frecuencia de conmutación constante, la señal de control del interruptor que controla el estado (encendido y apagado) del interruptor se genera típicamente por la comparación del voltaje de control en el nivel de señales  $V_{control}$ . Figura 4-15. Sin embargo para esta aplicación se genera el control PWM por medio del C.I. TL494CN mientras que la señal de control se obtiene mediante una amplificación del error. Manteniendo la frecuencia de operación en un rango de los kHz limitada por la selección del IGBT. Cuando la señal del error es amplificada. Que varía muy lentamente con el tiempo en relación con la frecuencia de conmutación, es más grande que la forma de onda de diente de sierra, la señal de control del interruptor se vuelve alta, lo que causa que el interruptor encienda. Ver figura 4-14.



**Figura 4-14** PWM. Señales del comparador.

El convertidor reductor a desarrollar produce un voltaje de salida más bajo que el voltaje CC de entrada  $V_d$ . Si se supone un interruptor ideal que suministra un voltaje de salida instantáneo constante  $V_d$  y una carga permanente, la forma de onda del voltaje de salida instantáneo se muestra en la figura 4-14 como función de la posición del interruptor. El voltaje medio de salida se calcula en términos de la relación de trabajo del interruptor:

(4.4) 
$$V_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_0(t) dt = \frac{t_{enc}}{T_s} V_d = DV_d$$

Para la aplicación real es necesaria la implementación de filtro pasa bajas como se muestra en la figura 4-15 la frecuencia de ángulo del filtro pasa bajas es seleccionada de modo que es mucho más baja que la frecuencia de conmutación, para eliminar esencialmente la ondulación o rizo de la frecuencia de conmutación del voltaje de salida.

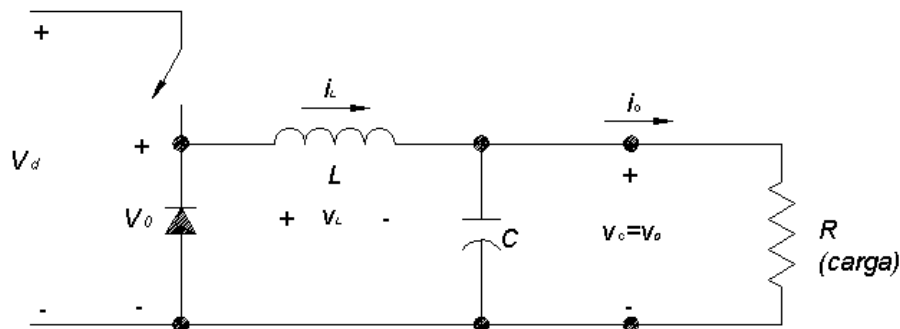


Figura 4-15. Convertidor reductor CC-CC con filtro pasa bajas.

#### 4.2.2 Diseño del regulador reductor en modo de conmutación

En un regulador reductor común el voltaje promedio de salida  $V_a$  es menor que el voltaje de entrada  $V_s$ , por ello el nombre de reductor. El diagrama de circuito de un regulador reductor común se muestra en la figura 4-16, parecido a un convertidor de bajada.

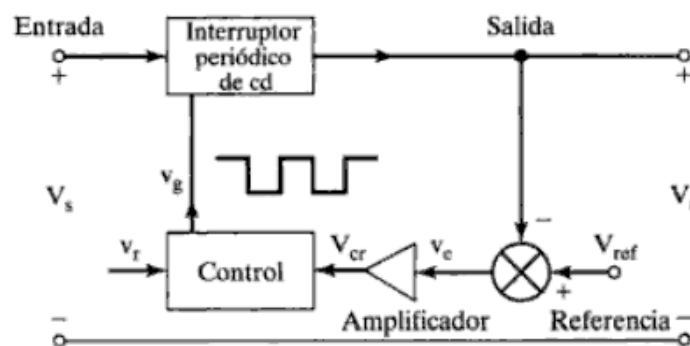
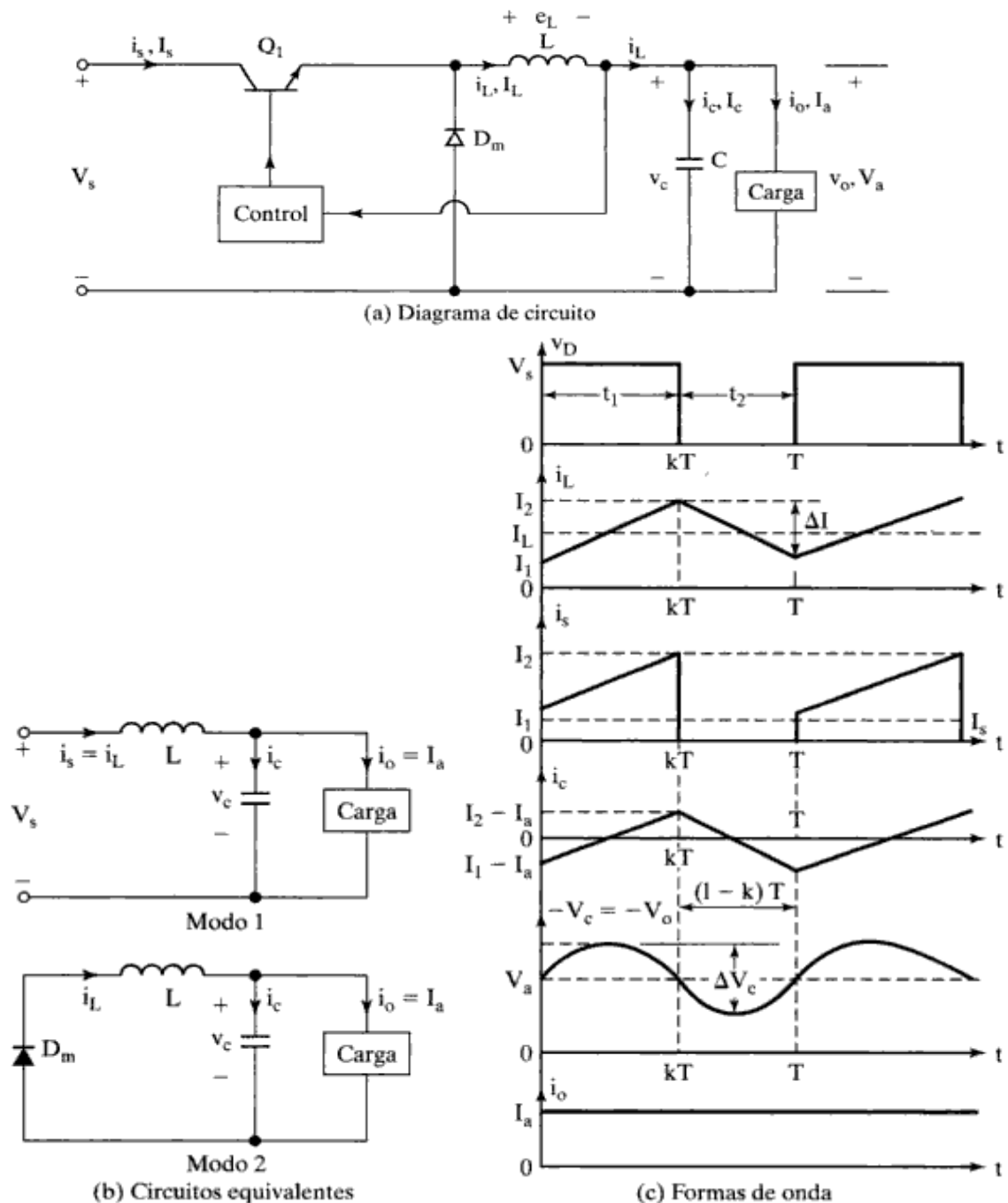


Figura 4-16. Circuito regulador reductor.

El funcionamiento del circuito se puede dividir en dos modos. El modo uno comienza cuando se cierra el transistor  $Q_1$  en  $t = 0$ . La corriente de entrada, que aumenta, pasa por el inductor del filtro  $L$ , el capacitor del filtro  $C$  y el resistor de carga  $R$ . El modo dos comienza cuando se apaga el transistor  $Q_1$  cuando  $t = t_1$ . El diodo de rápida recuperación  $D_m$  conduce debido a la energía almacenada en el inductor, y la corriente del inductor sigue pasando por  $L$ ,  $C$ , la carga y el diodo  $D_m$ . La corriente del inductor baja hasta que el transistor  $Q_1$  se enciende de nuevo, en el siguiente ciclo. Los



circuitos equivalentes del modo de operación se ven en la figura 4-17(b) las formas de onda de voltajes y corrientes se muestran en la figura 4-17(c), para un paso continuo de la corriente por el inductor  $L$ .



**Figura 4-17.** Regulador reductor en modo de conmutación, a) Diagrama de circuito. b) circuitos equivalentes. c) formas de onda.

Se supone que la corriente aumenta y baja de forma lineal. En los circuitos reales el resistor tiene una resistencia finita y no lineal. En general, su efecto se puede despreciar, en la mayor parte de las aplicaciones. De acuerdo con la frecuencia de conmutación, la inductancia y capacitancia del filtro, la corriente del inductor puede ser discontinua.

El voltaje a través del inductor  $L$  es, en general;

$$e_l = L \frac{di}{dt} \quad (4.5)$$

Suponiendo que la corriente del inductor aumenta en forma lineal de  $I_1$  a  $I_2$  en el tiempo  $t_1$ ,

$$V_s - V_a = L \frac{I_2 - I_1}{t_1} = L \frac{\Delta I}{t_1} \quad (4.6)$$

es decir,

$$t_1 = \frac{\Delta I L}{V_s - V_a} \quad (4.7)$$

y la corriente del inductor baja en forma no lineal, de  $I_2$  a  $I_1$ , en el tiempo  $t_2$ ,

$$-V_a = -L \frac{\Delta I}{t_2} \quad (4.8)$$

es decir.

$$t_2 = \frac{\Delta I L}{V_a} \quad (4.9)$$

Donde  $\Delta I = I_2 - I_1$  es la corriente de rizo pico a pico del inductor  $L$ . igualando los valores de  $\Delta I$  en las ecuaciones se obtiene

$$\Delta I = \frac{(V_s - V_a)t_1}{L} = \frac{V_a t_2}{L} \quad (4.10)$$

Se sustituye  $t_1 = kT$  y  $t_2 = (1-k)T$  y se obtiene el valor del voltaje promedio de salida:

$$V_a = V_s \frac{t_1}{T} = kV_s \quad (4.11)$$

Suponiendo que el circuito no tiene pérdidas,  $V_s I_s = V_a I_a = kV_s I_a$ , la corriente promedio de entrada es

$$I_s = kI_a \quad (4.12)$$

El periodo de conmutación T se puede expresar como sigue

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I L}{V_s - V_a} + \frac{\Delta I L}{V_a} = \frac{\Delta I L V_s}{V_a (V_s - V_a)} \quad (4.13)$$

Lo que determina la corriente de rizo de pico a pico siguiente:

$$\Delta I = \frac{V_a (V_s - V_a)}{f L V_s} \quad (4.14)$$

Es decir

$$\Delta I = \frac{V_s k (1 - k)}{f L} \quad (4.15)$$

Se aplica la ley de corrientes de Kirchhoff para poder expresar la corriente  $i_L$  del inductor.

$$i_L = i_c + i_0 \quad (4.16)$$

Si se supone que la corriente de rizo de la carga  $\Delta i_0$  es muy pequeña y despreciable  $\Delta i_L = \Delta i_c$ , la corriente promedio del capacitor, que entra durante  $t_1/2 + t_2/2 = T/2$ , es

$$I_c = \frac{\Delta I}{4} \quad (4.17)$$

El voltaje del capacitor se expresa como sigue:

$$v_c = \frac{1}{C} \int i_c dt + v_c(t = 0) \quad (4.18)$$

Y el voltaje de rizo pico a pico del capacitor es

$$\Delta V_c = v_c - v_c(t = 0) = \frac{1}{C} \int_0^{T/2} \frac{\Delta I}{4} dt = \frac{\Delta I T}{8C} = \frac{\Delta I}{8fC} \quad (4.19)$$

Se sustituye el valor de  $\Delta I$  para llegar a

$$\Delta V_c = \frac{V_a (V_s - V_a)}{8LCf^2 V_s} \quad (4.20)$$

Es decir,

$$\Delta V_c = \frac{V_s k (1 - k)}{8LCf^2} \quad (4.21)$$

**Condición para corriente continua en el inductor y voltaje continuo en el capacitor.**

Siendo que  $I_L$  es la corriente promedio en el inductor, la corriente de rizo en el mismo es  $\Delta I = 2I_L$ . Aplicando las ecuaciones se obtiene

$$\frac{V_s(1-k)k}{fL} = 2I_L = 2I_a = \frac{2kV_s}{R} \quad (4.22)$$

de donde se obtiene el valor crítico  $L_C$  del inductor.

$$L_c = L = \frac{(1-k)R}{2f} \quad (4.23)$$

Si  $V_c$  es el voltaje promedio del capacitor, su voltaje de rizo es  $\Delta V_c = 2V_a$ , obteniéndose

$$\frac{V_s(1-k)k}{8CLf^2} = 2V_a = 2kV_s \quad (4.24)$$

Donde el valor crítico  $C_c$  del capacitor es

$$C_c = C = \frac{1-k}{16Lf^2} \quad (4.25)$$

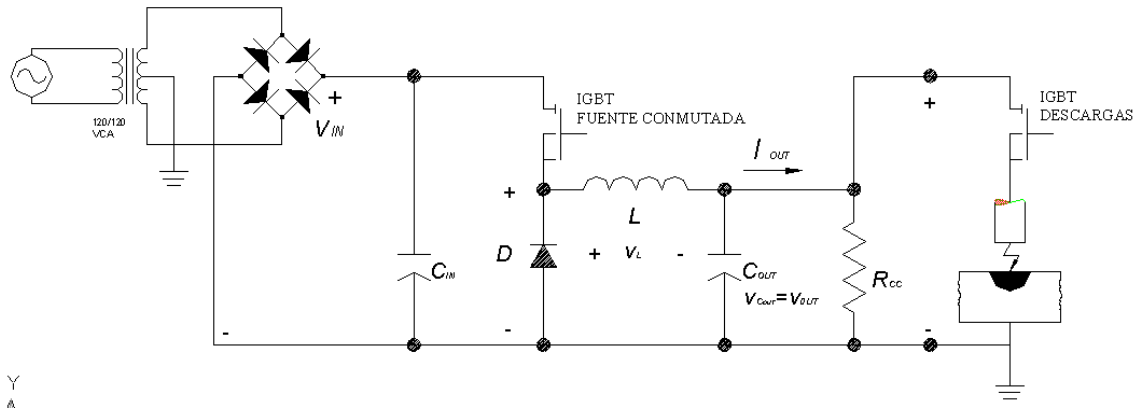
El regulador reductor sólo requiere de un transistor, es sencillo y en general tienen una eficiencia alta, mayor a 90%. La tasa  $di/dt$  de la corriente de carga se limita con el inductor  $L$ , sin embargo, la corriente de entrada es discontinua, y en el caso normal se requiere de un filtro de aislamiento en la entrada. Proporciona voltaje de salida de una polaridad, y corriente unidireccional de salida. Requiere de un circuito de protección para el caso de un posible corto circuito a través de la trayectoria del diodo.

**4.2.3 Aplicación al diseño de la fuente CC-CC**

A pesar de su extenso uso, el diseño de un convertidor-reductor puede plantear problemas para diseñadores de fuentes de potencia principiantes o intermedios, porque casi todas las reglas de oro y algunos de los cálculos que rigen su diseño son difíciles de obtener. Y aunque algunos de los cálculos están disponibles en hojas de datos de los circuitos estos cálculos son a veces impresos con errores. [47]

Para esta aplicación es necesario un único regulador reductor con una topología fija de frecuencia de conmutación y voltaje variable a través de la modulación de ancho de pulso (PWM) y con funcionamiento en el modo de corriente continua (CCM). Los principios que se discuten se pueden aplicar a otras topologías, pero las ecuaciones no son aplicables directamente a otras topologías. A continuación se presenta el diseño del convertidor reductor, se incluye un análisis detallado para el cálculo de los valores de los componentes. Los cuatro parámetros de diseño necesarios son: rango de entrada de

voltaje que es fijo de 179.06 Vcd, el rango de regulación de tensión de salida que es de 40 a 120 Vcd, el cual se definió desde las exigencias, y corriente de salida máxima que es de 50 A. y la frecuencia de conmutación del convertidor se fija en 100 kHz. La figura 4-18 muestra el circuito y los componentes básicos necesarios para el convertidor.



**Figura 4-18.** Circuito del convertidor reductor.

#### 4.2.3.1 Selección del inductor

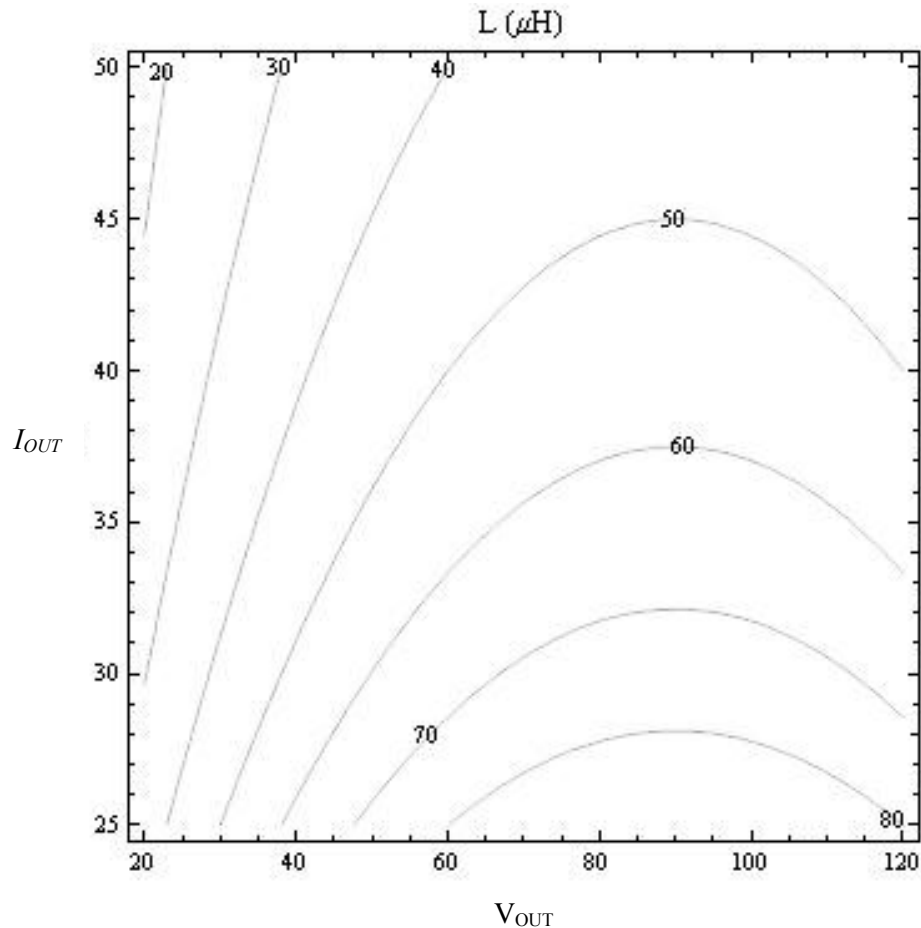
En el diseño de un convertidor reductor, el cálculo del inductor es crítico. Primero se asume que el convertidor funciona en modo de corriente continua (CCM), esto implica que el inductor no se descarga completamente durante el tiempo de OFF. La siguiente ecuación considera que es un interruptor ideal (resistencia cero en estado ON, resistencia infinita en estado OFF y tiempo de interrupción cero) y un diodo ideal.

$$L = \frac{(V_{INmax} - V_{OUT})V_{OUT}}{V_{INmax} f_{SW} LIR I_{OUTmax}} \quad (4.26)$$

Donde  $f_{sw}$  es la frecuencia de conmutación del convertidor que para nuestro caso es de 100 kHz y  $LIR$  es el promedio de la corriente del inductor expresada como un porcentaje de la corriente de salida  $I_{OUT}$ . Típicamente como 0.3 o 30% para garantizar el modo de operación en corriente continua, sin embargo es suficiente con 0.25 % para nuestro caso.

Para dimensionar el inductor, es necesario garantizar las condiciones de operación propuestas en las características de diseño. Para el caso más crítico en el rango de voltaje de salida  $V_{OUT}$  y corriente en el inductor  $I_{OUT}$  ver figura 4-19. Se obtiene en el

valor más apropiado de  $100 \mu\text{H}$ , ya que este valor garantiza una operación en modo de corriente continua para todo el rango de voltaje y corriente de las descargas de EDM.

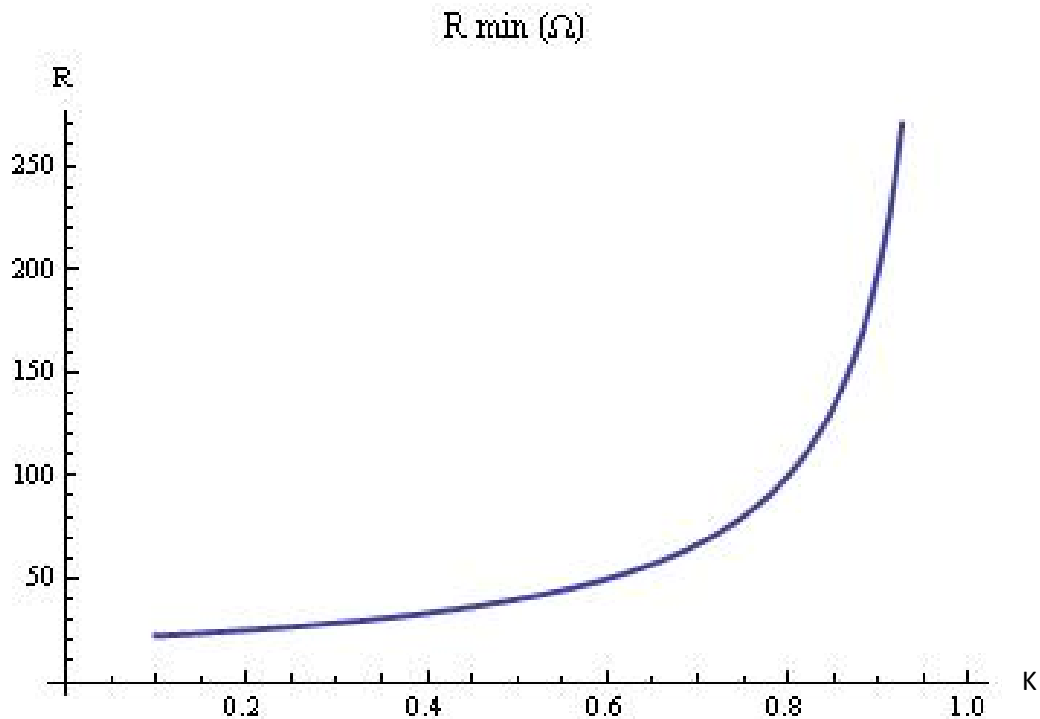


**Figura 4-19.** Gráfica de inductancia  $L$  para diferentes rangos de  $V_{\text{OUT}}$  e  $I_{\text{OUT}}$ .

Adicionalmente se realiza el análisis para el valor mínimo de resistencia en la salida  $R_{\text{CC}}$  que garantiza que el convertidor siempre funcionara en conducción continua. Este análisis se obtiene despejando  $R$  de ec. (4.23) pero con la definición de variables de nuestro circuito.

$$R = \frac{L}{f_{\text{SW}} 2(1-k)} \quad (4.27)$$

Realizando el cálculo para todo el rango de funcionamiento respecto al ciclo de trabajo, se obtiene el valor máximo de  $25 \Omega$ , ver figura 4-20.



**Figura 4-20.** Rcc mínima para todo el rango de operación en función del ciclo de trabajo  $k$ .

El pico de corriente a través del inductor determina la corriente de saturación del inductor, la cual a su vez determina el tamaño aproximado del inductor. La saturación del núcleo del inductor reduce la eficiencia del convertidor, a la vez que incrementa la temperatura del inductor, del IGBT y del diodo. La corriente pico del inductor se calcula como sigue:

$$I_{PICO} = I_{OUT_{max}} + \frac{\Delta I_{INDUCTOR}}{2} \quad (4.28)$$

Donde,

$$\Delta I_{INDUCTOR} = LIR I_{OUT_{max}} = \frac{(V_{IN_{max}} - V_{OUT})V_{OUT}}{V_{IN_{max}} f_{SW} L} \quad (4.29)$$

Sustituyendo las variables en ec. (4.29), se obtiene  $\Delta I_{INDUCTOR}$  igual a 12.5 A. un valor de  $LIR$  menor, disminuiría el rizo en la corriente del inductor, pero incrementaría el tamaño del inductor y el calentamiento de todo el circuito.

### 4.2.3.2 Selección del capacitor

El capacitor de salida es necesario para minimizar el sobretiro del voltaje y el rizo presente en la salida del convertidor reductor. Sobrepasos y risos considerables de voltaje considerables son causados por un capacitor insuficiente o bien por una alta resistencia en serie equivalente (*ESR*) en el capacitor de salida. El sobrepaso máximo y el rizo es considerado desde la etapa de diseño sin embargo esto se resuelve más adelante. Buscando el capacitor más grande disponible para el cumplimiento del sobrepaso y el rizo, y con un bajo *ESR*.

El sobrepaso de voltaje se calcula usando la siguiente ecuación.

$$\Delta V = \left( \sqrt{V_{OUT}^2 \frac{L \left( I_{OUT_{max}} + \frac{\Delta I_{INDUCTOR}}{2} \right)^2}{C_O}} \right) - V_{OUT} \quad (4.30)$$

Reordenando los campos:

$$C_O = \frac{L \left( I_{OUT} + \frac{\Delta I_{INDUCTOR}}{2} \right)^2}{(\Delta V + V_{OUT})^2 - V_{OUT}^2} \quad (4.31)$$

Donde  $C_O$  es igual al capacitor de salida y  $\Delta V$  es igual al sobrepaso máximo de voltaje el cual generalmente toma valores de 5%, para nuestro caso se define en 5 V en el límite superior del rango de operación. Sustituyendo todos los valores en la ec. (4.31) y redondeando al valor próximo comercial,  $C_O$  es igual a 4,800  $\mu f$ . El voltaje debido al capacitor está determinado por la ec. (4.32) a la cual no se otorgan valores numéricos, puesto que varía en todo el rango de operación:

$$V_{OUT_{CAPACITOR}} = \left( \frac{V_{IN_{max}} - V_{OUT}}{2LC_O} \right) \left( \frac{V_{OUT}}{V_{IN_{max}} f_{SW}} \right)^2 \quad (4.32)$$

El *ESR* del capacitor determina el rizo, dado por:

$$V_{OUT} = I_{L_{RIPPLE}} ESR_{C_O} = \Delta I_{INDUCTOR} ESR_{C_O}$$

La selección de un capacitor con un *ESR* muy bajo, puede hacer que el convertidor sea inestable. Es por esto que el capacitor empleado es del tipo electrolítico, existen otros capacitores especiales pero en general son costosos. Los factores que afectan la estabilidad varían de IC a IC, así que en la selección se asegura una selección acorde con las especificaciones del IC.



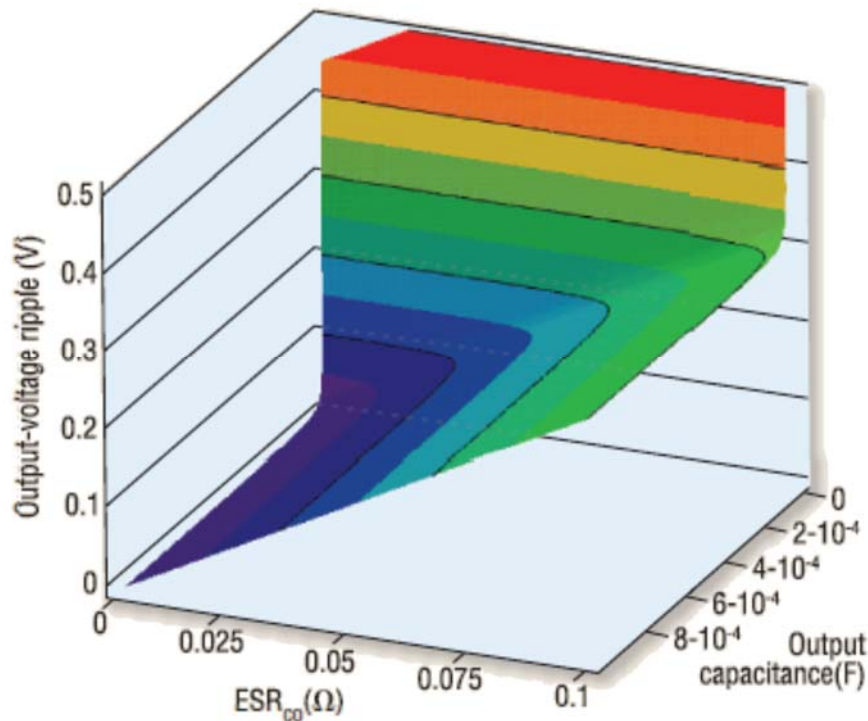
Sumando el rizo del voltaje de salida debido al capacitor y el debido al  $ESR$  del capacitor. Se obtiene el rizo de voltaje total para el convertidor reductor el cual también varía en todo el rango de operación pero dadas las características de operación de esta fuente, no es un factor que trascendente para su funcionamiento.

$$V_{OUT\_RIPPLE} = \left( \frac{V_{INmax} - V_{OUT}}{2LC_O} \right) \left( \frac{V_{OUT}}{V_{INmax} f_{SW}} \right)^2 + \Delta I_{INDUCTOR} ESR_{C_O} \quad (4.33)$$

Reordenado y resolviendo para  $ESR$ .

$$ESR_{C_O} = \frac{1}{\Delta I_{INDUCTOR}} \left( V_{OUT\_RIPPLE} - \frac{1}{2C_O} \left( \frac{V_{INmax} - V_{OUT}}{L} \right) \left( \frac{V_{OUT}}{V_{INmax} f_{SW}} \right)^2 \right) \quad (4.34)$$

La figura 4-21 presenta un ejemplo típico del rizo de voltaje de salida contra el capacitor de salida y el  $ESR$ .



**Figura 4-21.** Comportamiento típico de voltaje de salida contra el capacitor de salida y el  $ESR$ .

### 4.2.3.3 Selección del capacitor de entrada

La cantidad de corriente de rizo de capacitor de entrada determina el valor y el tamaño físico, y las siguientes ecuaciones calculan la cantidad de corriente de rizo que puede manejar el capacitor de entrada.

$$I_{C_{IMS}} = I_{OUT_{MAX}} \frac{\sqrt{V_{OUT}(V_{IN}-V_{OUT})}}{V_{IN}} \quad (4.35)$$

El peor caso ocurre cuando:

$$V_{IN} = 2 V_{OUT} \quad (4.36)$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 0.5 \quad (4.37)$$

El rendimiento para el peor caso de la corriente de rizo es:

$$\frac{I_{OUT_{MAX}}}{2} \quad (4.38)$$

La capacitancia requerida para el convertidor reductor, depende de la impedancia de la fuente de entrada. Para las fuentes comunes de laboratorio, es suficiente con 10  $\mu\text{F}$  a 22  $\mu\text{F}$  de capacitancia por ampere de la corriente de salida. En esta aplicación tenemos un amperaje máximo de salida de 50 A, y como lo más conveniente es que nuestro voltaje de entrada tenga el menor rizo posible. Se utiliza el límite superior de 1,100  $\mu\text{F}$

Los capacitores de Tantalio son una elección pobre para capacitores de entrada. Estos usualmente fallan, es decir hacen corto circuito creando una posibilidad de fuego además de que no son comerciales para valores tan altos. Los cerámicos o electrolíticos de aluminio son preferidos por que no tienen este modo de falla y son más comunes comercialmente para valores elevados de capacitancia

Los capacitores cerámicos son una buena opción cuando el área de montaje o altura está limitada. Pero los capacitores cerámicos pueden causar un zumbido en el circuito. Este pequeño ruido es provocado por la vibración física del capacitor cerámico. Por lo que la mejor opción en esta aplicación es un capacitor del tipo electrolítico.

#### 4.2.3.4 Selección del diodo

El poder de disipación es el factor determinante en la selección de un diodo. El peor caso de potencia promedio puede ser calculado como sigue:

$$P_{DIODE} = \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN_{MAX}}}\right) I_{OUT_{MAX}} V_D \quad (4.39)$$

Donde  $V_D$  es la caída de voltaje a través del diodo a la corriente de salida dada de  $I_{OUT_{MAX}}$ . (El valor típico es de 0.7 V para el diodo de silicio y 0.3 V para el diodo de Schottky.) Es necesario asegurar que el diodo será capaz de disipar esta potencia. Para un funcionamiento confiable en el rango de entrada de voltaje, también es necesario asegurarse de que la máxima tensión inversa repetitiva sea mayor que la tensión de entrada máxima ( $V_{RRM} \geq V_{IN_{MAX}}$ ). La especificación del diodo, debe soportar o exceder la corriente de salida. ( $I_{FAV} \geq I_{OUT_{MAX}}$ ). Este punto se cumple con el uso de un diodo de potencia de alta velocidad.

#### 4.2.3.5 Selección del IGBT

La selección del IGBT es difícil a continuación se presenta el procedimiento de cálculo para el IGBT, sin embargo esto se omite ya que no es algo que afecte el comportamiento de la fuente y no es necesaria su selección para fines de simulación y diseño del circuito. Y solo serán usados durante la implementación física y con valores obtenidos de las simulaciones.

La temperatura máxima de la unión  $T_{J_{MAX}}$  y la temperatura ambiente máxima  $T_{A_{MAX}}$  para el IGBT, suele ser conocida antes de seleccionar el dispositivo.  $T_{J_{MAX}}$  no debe exceder los 115°C a los 120°C y  $T_{A_{MAX}}$  no debe exceder los 60°C. Una temperatura ambiente máxima de 60°C puede parecer elevada, pero para los circuitos convertidores reductores que típicamente se encuentran alojados en gabinetes en donde la temperatura no es muy normal. La temperatura del IGBT se calcula como sigue:

$$T_{J_{RISE}} = T_{J_{MAX}} - T_{A_{MAX}} \quad (4.40)$$

Y la potencia máxima disipada por el IGBT se calcula con la temperatura máxima de rizo del IGBT.

$$P_{D_{TOT}} = \frac{T_{J_{RISE}}}{\theta_{JA}} \quad (4.41)$$

El tipo de empaque del IGBT y el montaje sobre la placa afecta la resistencia térmica de unión ( $\theta_{JA}$ ). Cuando  $\theta_{JA}$  no se especifica en la hoja de datos,  $62 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$  es una buena estimación. La potencia de disipación es causada por la resistencia y pérdidas del encendido. Las pérdidas por la resistencia se calculan como:

$$P_{D_{RDS}} = \frac{V_{OUT}(I_{OUT_{MAX}})^2 R_{DS(ON)_{HOT}}}{V_{IN_{MIN}}} \quad (4.42)$$

Como regla, un coeficiente de temperatura de  $0.5\% / ^\circ\text{C}$  proporciona un buen indicador de la resistencia máxima de encendido así que la resistencia real en el encendido se calcula como:

$$R_{DS(ON)_{HOT}} = [1 + 0.005(T_{J_{HOT}} - 25^\circ\text{C})] R_{DS(ON)_{25^\circ\text{C}}} \quad (4.43)$$

Asumiendo que las pérdidas por la resistencia de encendido son aproximadamente el 60% de las pérdidas totales del IGBT entonces:

$$R_{DS(ON)_{25^\circ\text{C}}} = \frac{V_{IN_{MIN}} P_{D_{TOT}} 60\%}{V_{OUT} (I_{OUT_{MAX}})^2 [1 + 0.005(T_{J_{HOT}} - 25^\circ\text{C})]} \quad (4.44)$$

Las pérdidas de conmutación constituyen una porción mucho menor de las pérdidas de disipación del IGBT, pero deben ser tomadas en cuenta. El siguiente cálculo de las pérdidas por conmutación proporciona un estimado, y no substituye a las evaluaciones de laboratorio, preferentemente debe usarse un termocople.

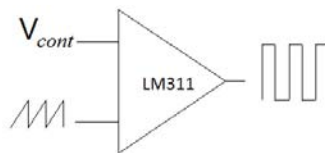
$$P_{D_{SW}} = \frac{C_{RSS} V_{IN_{MAX}}^2 f_{SW} I_{OUT_{MAX}}}{I_{GATE}} \quad (4.45)$$

Donde  $C_{RSS}$  es la capacitancia de transferencia inversa de P1,  $I_{GATE}$  es la corriente de pico entre la compuerta y la fuente del controlador y P1 es el lado de alta del IGBT.

#### 4.2.4 Modulación de ancho de pulso para la fuente

El voltaje del interruptor controlado representado por el IGBT quien abre o cierra dependiendo de la frecuencia y el tiempo de encendido es gobernado por el control PWM, figura 4-18, manteniendo una frecuencia constante fija en 100 kHz y controlando el nivel de voltaje mediante el tiempo de encendido y apagado del IGBT, la señal resultante se denomina modulación de ancho de pulso (PWM). El generador consiste en la comparación de un nivel de voltaje con una señal diente de sierra.

La comparación mostrada en la figura 2-22 se realiza a través del circuito LM311, a éste llega una señal diente de sierra de 100000 Hz. a 3V, generada por el circuito de control TL494. Ésta señal se compara con una segunda señal entrante llamada voltaje de control produciendo la señal pulsante mostrada en la figura 2-22.

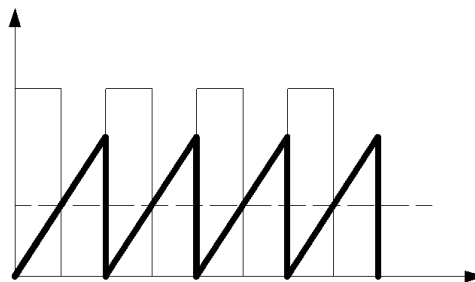


**Figura 4-22.** Circuito de generación PWM.

El circuito LM311 realiza la comparación de la siguiente manera:

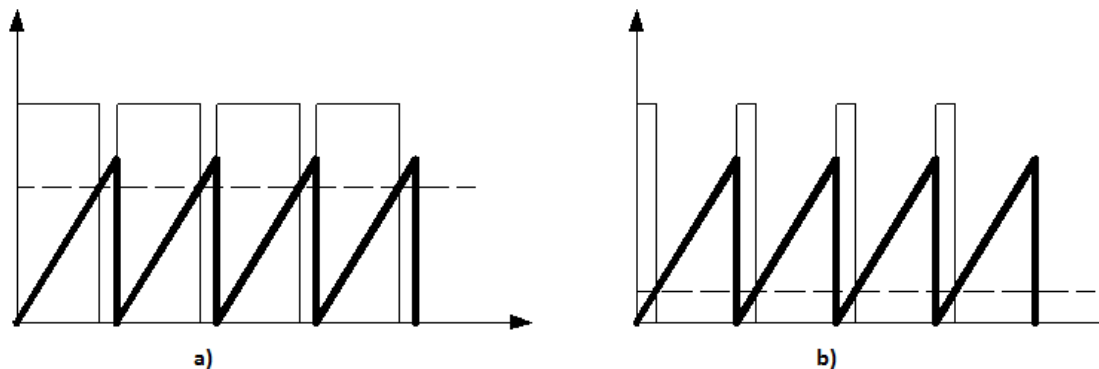
- Cuando el voltaje de control es mayor que el voltaje diente de sierra, el comparador entrega un voltaje positivo de 15 V necesario para el cierre del MOSFET,
- Cuando el voltaje de control es menor que el voltaje diente de sierra, el voltaje de salida del comparador será ligeramente negativo para asegurar la apertura del MOSFET.

El resultado se muestra en la figura 4-23.



**Figura 4-23.** Implementación de Modulación de Ancho de Pulso

En la figura 4-24, se observa el efecto que produce una variación en el voltaje de control, la elevación de la señal de control aumenta el ancho de la señal pulsante y al disminuir la señal de control los pulsos son más cortos.



**Figura 4-24.** Efecto de cambiar la señal de referencia: a) referencia alta b) referencia baja.

El ajuste de la señal de control asegura la obtención de un voltaje constante adecuada a las especificaciones de desempeño requeridas. El dispositivo generador de la señal de control debe cumplir con las características siguientes:

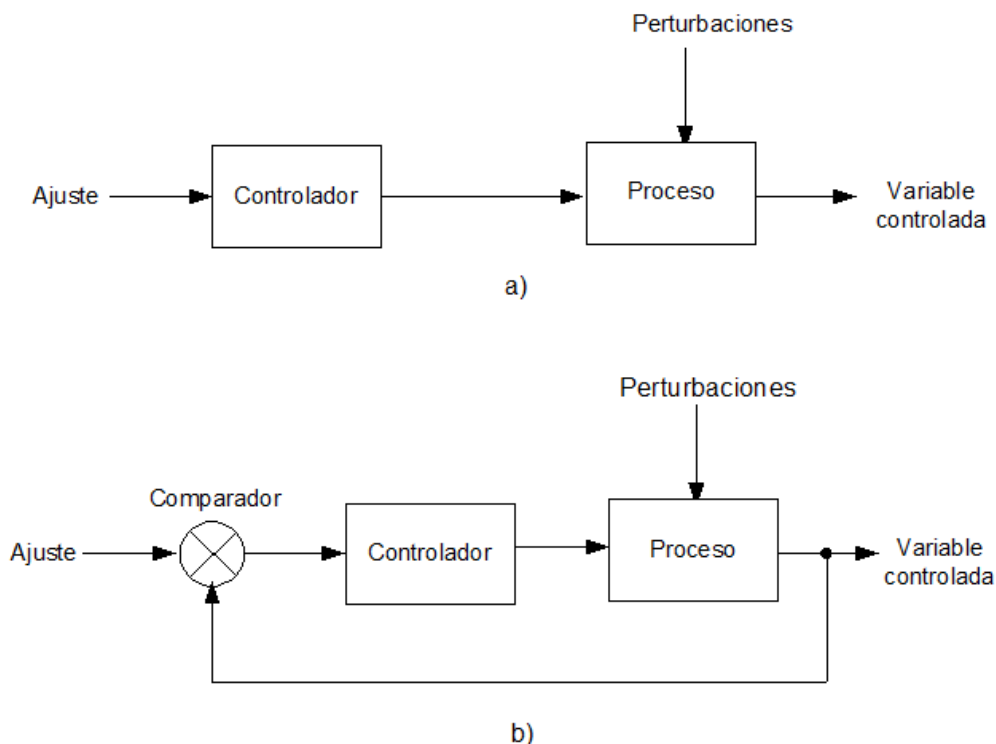
- Precisión mejorada,
- Respuesta dinámica rápida,
- Atenuación de los efectos producidos por disturbios en la carga.

La obtención de la señal de control se realizará a través de una etapa de control. La acción que se desea del control aplicado al convertidor, es la regulación del voltaje de salida en base a una condición nominal de operación en presencia de perturbaciones de carga. A continuación se hablará brevemente de los conceptos básicos necesarios para la comprensión de dicha etapa de control.

#### 4.2.5 Conceptos básicos de control automático

Comencemos por considerar la diferencia esencial entre un sistema en lazo abierto y un sistema en lazo cerrado. En el sistema en lazo abierto no existe auto corrección, una vez que se ajusta el control del sistema a un valor dado éste permanecerá y el sistema estará controlado mientras las condiciones de operación se mantengan iguales. El problema con esto es que las condiciones de operación no se mantienen iguales, podrían ocurrir numerosos cambios sutiles que alterarían el equilibrio. En el sistema en lazo cerrado existe auto corrección, con éste control las condiciones de operación del sistema pueden variar y el control tenderá a restablecer el punto de equilibrio deseado.

Debido a las similitudes entre los diferentes sistemas, es posible idear diagramas de bloques generalizados que se apliquen a todos. En la figura 2.25, se presenta uno de tales diagramas de bloques generalizados de un sistema en lazo abierto y otro en lazo cerrado.



**Figura 4-25.** Diagramas de bloques que muestran las relaciones entre las diferentes partes del sistema: a) Para un sistema en lazo abierto; b) Para un sistema en lazo cerrado.

Los bloques que componen la figura 4.25 son un controlador que afecta un proceso. La flecha que va del controlador al proceso significa que el controlador envía señales al proceso. El controlador tiene una flecha apuntando a éste, llamada ajuste, que le indica lo que debe hacer. El proceso tiene una flecha apuntándole llamada perturbaciones, significa que las condiciones externas pueden afectar el proceso y afectar su salida. Las perturbaciones presentes en nuestro sistema son: fluctuaciones en el voltaje de alimentación y de carga. La variable controlada es la variable del proceso que el sistema debe monitorear y corregir cuando se requiera.

Dado que el diagrama de bloques de la figura 4.25 a) no muestra ninguna línea que regrese al principio para “cerrar lazo”, tal sistema se llama sistema en lazo abierto. Por otra parte en la figura 4.25 b) el ajuste y el valor de la variable controlada son comparados mediante un comparador. La salida del comparador es alimentada al controlador, permitiendo que afecte el proceso. El que la variable controlada regrese a ser comparada con los ajustes hace que el diagrama de bloques forme un lazo cerrado. En un sistema de control el lazo cerrado se usa para que el sistema sea insensible a variaciones y tenga rechazo ante perturbaciones o ruido en las señales de entrada. La elección en la variable de retroalimentación, así como el diseño del lazo de retroalimentación tiene importancia ya que un sistema que es estable en lazo abierto, en lazo cerrado puede ser inestable.

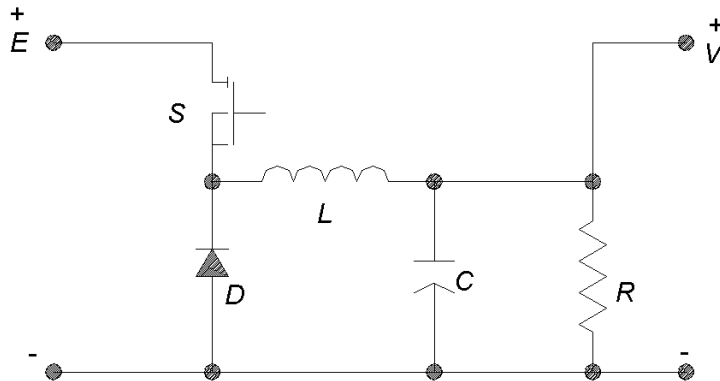
El punto importante de la teoría anterior es remarcar que el control del convertidor cd-cd será de lazo cerrado, ya que tales sistemas de control tienen la capacidad de llevar acciones de manera automática para corregir cualquier diferencia entre el valor real y el valor deseado de la variable controlada, sin importar la razón de esta diferencia.

Para implementar cualquier acción de control, es necesario conocer la dinámica del sistema (función de transferencia), así como las especificaciones de desempeño deseadas del convertidor. Antes de seguir adelante con el diseño del controlador se debe hacer énfasis en el modelado de la fuente ya que la obtención de un modelo matemático es muy importante para el desarrollo de cualquier metodología de control, sobre todo si se habla de control automático.



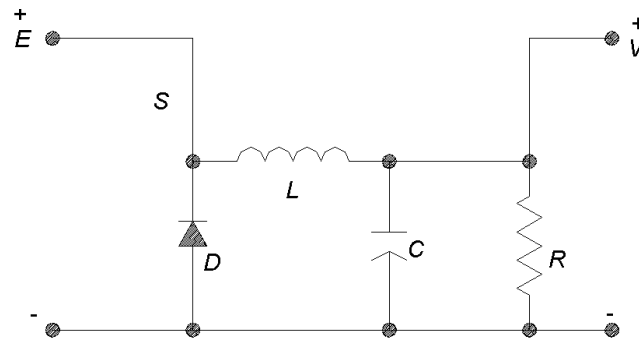
### 4.2.6 Función de transferencia de la fuente

Para la obtención de la función de transferencia de la fuente, es necesario analizar el circuito de la figura 4-26 del convertidor reductor mediante el método del promedio de los estados de IGBT encendido e IGBT apagado es decir  $S=1$  y  $S=0$ .



**Figura 4-26.** Circuito convertidor reductor.

Para  $S=1$ :



**Figura 4-27.** Circuito convertidor reductor en  $S=1$ .

Realizando la solución de las mallas del circuito por las leyes de voltajes y corrientes de Kirchhoff se tiene:

Para el voltaje:

$$E - V_L - V_C = 0 \quad (4.46)$$

$$E = L \frac{di_L}{dt} + V_C \quad (4.47)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = E - V_C \quad (4.48)$$

Y para las corrientes

$$I_L - I_C - I_R = 0 \tag{4.49}$$

$$I_L = C \frac{dV_C}{dt} + \frac{V_C}{R} \tag{4.50}$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = I_L - \frac{V_C}{R} \tag{4.51}$$

Para S=0:

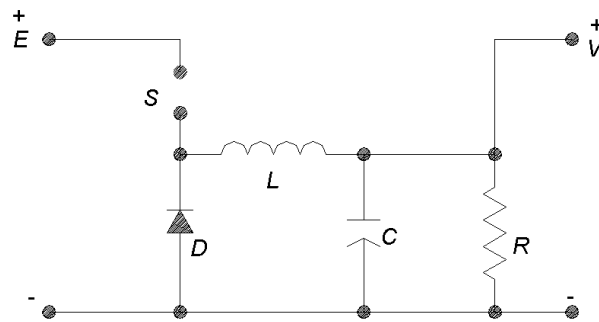


Figura 4-28. Circuito convertidor reductor en S=0.

Realizando la solución de las mallas del circuito por las leyes de voltajes y corrientes de Kirchhoff se tiene:

Para el voltaje:

$$V_L = -V_C \tag{4.52}$$

$$L \frac{dI_L}{dt} = -V_C \tag{4.53}$$

Y para las corrientes

$$I_L - I_C - I_R = 0 \tag{4.54}$$

$$I_L = C \frac{dV_C}{dt} + \frac{V_C}{R} \tag{4.55}$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = I_L - \frac{V_C}{R} \tag{4.56}$$

Para cuando el interruptor está apagado es decir  $(1-k)T$  las ecuaciones se expresan en forma matricial de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [E] \quad (4.57)$$

Para el intervalo  $kT$  y

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [E] \quad (4.58)$$

Para el intervalo  $(1-k)T$ , respectivamente, la matriz de coeficientes para el promedio de los estados es:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [E] \quad (4.59)$$

Y resolviendo para el circuito linealizado equivalente expresado como  $V_C$  respecto de  $k$ , se obtiene:

$$\frac{V_C}{k} = \frac{ER}{CLRs^2 + Ls + R} \quad (4.60)$$

Que es la función de transferencia de  $V_C$  respecto de  $k$ , y para el caso de la corriente  $I_L$  referida a  $k$ .

$$\frac{I_L}{k} = \frac{CRs + E}{CLRs^2 + Ls + R} \quad (4.61)$$

Esto es debido a que inicialmente solo se deseaba obtener la función de transferencia para el voltaje de salida, sin embargo el controlador presento problemas de estabilidad que se resuelven con la adición de un controlador en modo corriente.

## 4.2.7 Descripción de elementos para la etapa de control

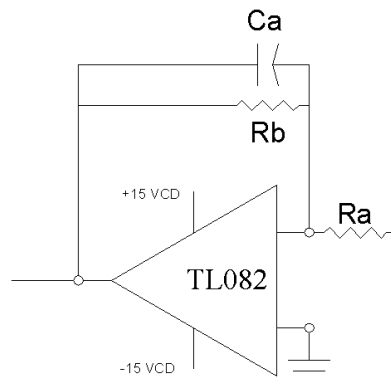
### 4.2.7.1 Sensor

El sensor es el dispositivo que convierte la variable de salida en una variable manejable como un voltaje que pueda usarse para comparar la salida con la señal de entrada de referencia. Se trata de una simple ganancia en la salida de la fuente con el propósito de disminuir el nivel de voltaje en la salida a niveles del sistema de control de una manera proporcional a la cual denotamos con  $H$ .

### 4.2.7.2 Filtro

La señal de realimentación del sistema indica al controlador el valor actual del voltaje de salida a fin de efectuar la acción de control. Para obtener precisión en el control la señal realimentada debe tener una calidad adecuada, por lo que hace necesario un análisis de la señal de voltaje entregado por el sensor.

Se observa la necesidad de implementar un filtro figura 4-29 para suavizar la salida de voltaje, se elige un filtro capacitivo, la elección del filtro se realizó por ser común y simple, ya que permite reducir el tamaño del filtro, debido a que las inductancias son de mayor tamaño que los capacitores comerciales.



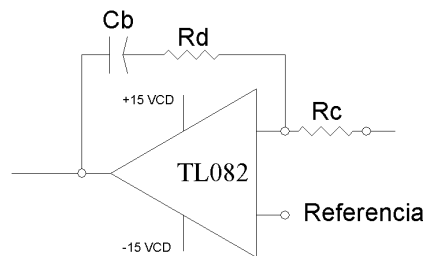
**Figura 4-29.** Filtro pasa bajas.

La función de transferencia del filtro es la siguiente:

$$G_F(s) = \frac{-R_b}{R_a(R_b C_a s + 1)} \quad (4.62)$$

### 4.2.7.3 Controlador Proporcional Integral

El controlador utilizado es un proporcional – integral (PI). Para la implementación y construcción del PI se utilizaron amplificadores operacionales. Los amplificadores operacionales, se emplean a menudo para implementar controladores y compensadores que se obtienen del proceso de diseño de sistemas de control. La representación gráfica del controlador PI se muestra en la figura 4-30.



**Figura 4-30.** Esquema de un controlador PI.

La función de transferencia para el controlador es la siguiente:

$$G_c(s) = \frac{R_d C_b s + 1}{R_c C_b s} \quad (4.63)$$

El diseño del controlador se completa al seleccionar los valores de  $R_c$ ,  $R_d$  y  $C_b$  tomando en cuenta la disponibilidad de valores estándar de capacitores y resistores. Reformulando la ecuación anterior de una manera diferente:

$$G_c(s) = \frac{R_d}{R_c} + \frac{1}{R_c C_b s} \quad (4.64)$$

$$K_p = \frac{R_d}{R_c} = \text{Ganancia proporcional del control.} \quad (4.65)$$

$$K_I = \frac{1}{R_c C_b} = \text{Ganancia integral del control.} \quad (4.66)$$

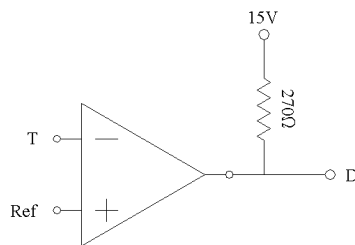
Cada una de las ganancias del controlador, tanto la proporcional ( $K_p$ ) como la integral ( $K_I$ ), se pueden ajustar en forma individual manipulando los valores de sus resistores respectivos, afectando el comportamiento final del sistema de manera independiente.

Las entradas al PI, son la señal de voltaje filtrado del lazo de realimentación y un voltaje de referencia de 1.5 V generado a partir de un divisor de voltaje. El resultado es un voltaje de control que entra al comparador paralelamente con otra señal de voltaje generada por el circuito TL494. Esta última señal es un diente de sierra de frecuencia 100000 Hz y magnitud 3V.

Cabe señalar que el voltaje de control es inverso al voltaje del sensor, resultando que un voltaje reducido del sensor provocado por un bajo voltaje de salida en la fuente conmutada originará un voltaje de control alto y viceversa.

#### 4.2.7.4 Comparador

Se utilizó el comparador de voltaje simple LM311 figura 4-31.



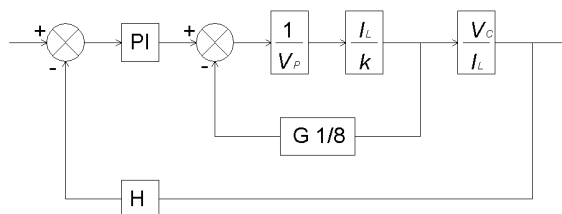
**Figura 4-31.** Comparador.

Para generar un voltaje pulsante de 0 a 15 V. La función de transferencia del comparador está dada por:

$$G_{act} = \frac{I}{V_p} \tag{4.66}$$

Donde  $V_p = 3$  es la magnitud de la señal diente de sierra.

Lo anterior se puede representar en un diagrama de bloque como aparece en la figura 4-32 para proporcionar una visión clara de la relación de funciones de transferencia en cada bloque del sistema.



**Figura 4-32.** Diagrama de control de bloques.

## 4.2.8 Diseño del controlador basado en la respuesta en frecuencia

Para determinar los valores de resistencia y capacitancia la etapa de control se deben utilizar metodologías de diseño de controladores. Se utilizará el diseño en base a respuesta en frecuencia, el cual analiza la función de transferencia en el plano complejo, es decir, trabajando con la magnitud y el ángulo de forma gráfica para alcanzar el comportamiento deseado del sistema.

### 4.2.8.1 Análisis de la respuesta en frecuencia

El análisis de la respuesta frecuencia es sencillo y directo, presenta una imagen cualitativa de la respuesta transitoria e indica en forma clara la manera en la que debe modificarse el sistema. El enfoque de la respuesta en frecuencia se aplica a los sistemas o componentes cuyas características dinámicas están dadas en forma de datos de respuesta en frecuencia.

En el enfoque de la respuesta en frecuencia, especificamos el desempeño de la respuesta transitoria en una forma indirecta. Aunque la correlación entre la respuesta transitoria y la respuesta en frecuencia es indirecta, las especificaciones en el dominio de la frecuencia se cumplen adecuadamente en el enfoque de las trazas de Bode.

### 4.2.8.2 Trazas de Bode

Las trazas de Bode de una función de transferencia son una herramienta gráfica de suma utilidad para el análisis y diseño de sistemas de control. Para analizar los datos de la respuesta en frecuencia se utilizarán las trazas de Bode.

Las trazas de Bode están formadas por dos gráficas, una es el logaritmo de la magnitud de una función de transferencia senoidal y la otra es el ángulo de fase. Ambos se grafican contra la frecuencia en escala logarítmica. Graficar las trazas de Bode completas es un asunto sencillo, por tanto, para propósitos de diseño, se trabajó con las trazas de Bode.

Algunas ventajas que ofrece el trabajar con las trazas de Bode son:

- Las trazas de Bode, se pueden bosquejar por la aproximación de la magnitud y fase con segmentos de línea recta.
- El cruce de ganancia, el cruce de fase, el margen de ganancia y el margen de fase se determinan más fácilmente en las trazas de Bode.

- Para propósitos de diseño, los efectos de añadir controladores y sus parámetros se visualizan con mayor facilidad sobre las trazas de Bode.

El diseño mediante el método de respuesta en frecuencia se enfocó en obtener una respuesta en estado estable adecuada y un transitorio aceptable. Para continuar se especificarán los términos margen de fase y margen de ganancia, ya que a partir de éstos se estima a grandes rasgos la velocidad de la respuesta transitoria y la precisión en estado estable.

#### 4.2.8.3 Márgenes de fase y de ganancia

El margen de fase es la cantidad de atraso de fase adicional de la frecuencia de cruce de ganancia requerida para llevar al sistema al borde de la inestabilidad. La frecuencia de cruce de ganancia es la frecuencia en la cual la magnitud de la función de transferencia en lazo abierto, es unitaria. El margen de fase es de  $180^\circ$  más el ángulo de fase en la frecuencia de cruce de ganancia, o

$$\gamma = 180 + \phi \quad (4.67)$$

La figura 4-33 ilustra el margen de fase y el margen de ganancia que determinan la estabilidad:

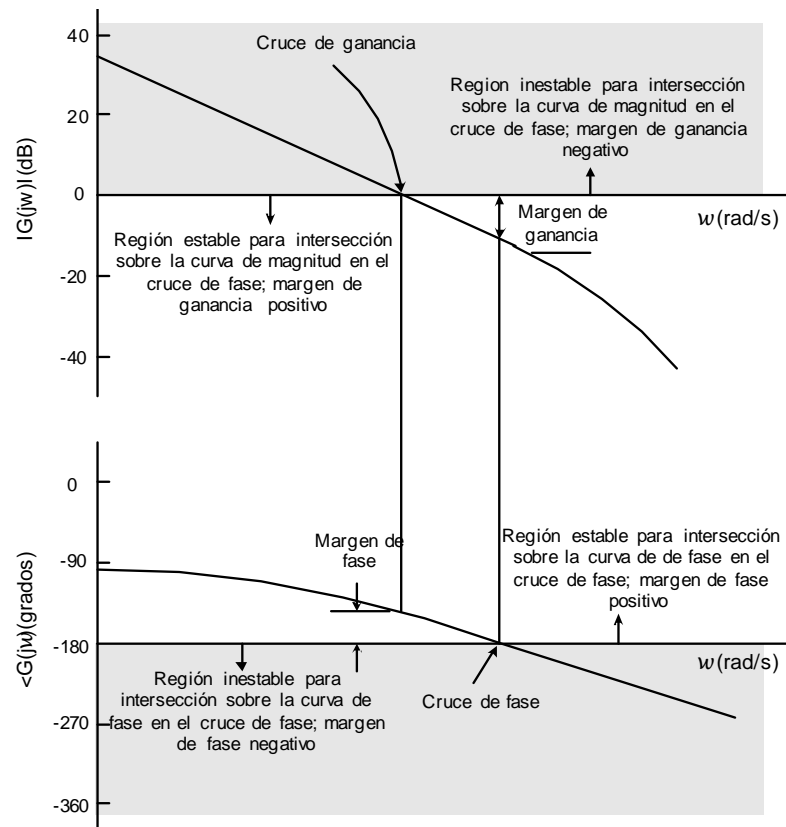
El margen de ganancia es el recíproco de la magnitud en la frecuencia a la cual el ángulo de fase es  $-180^\circ$ . Si definimos la frecuencia de cruce de fase como la frecuencia a la cual el ángulo de fase de la función de transferencia en lazo abierto es igual a  $-180$ , se produce un margen de ganancia.

$$K_g = 1/|G(j\omega)| \quad (4.68)$$

En términos de decibeles,

$$K_g[dB] = 20\log K_g = -20\log|G(j\omega)| \quad (4.69)$$





**Figura 4-33.** Margen de ganancia y margen de fase sobre las trazas de Bode.

El margen de ganancia expresado en decibeles es positivo si es mayor que la unidad y negativo si es menor que la unidad. Por tanto, un margen de ganancia positivo (en decibeles) significa que el sistema es estable y un margen de ganancia negativo (en decibeles) quiere decir que el sistema es inestable. Para un sistema inestable, el margen de ganancia indica cuanto puede disminuir la ganancia para que el sistema se vuelva estable.

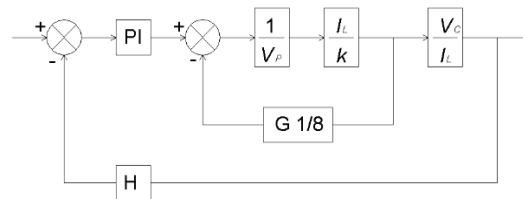
Además del margen de fase y el margen de ganancia, la pendiente de la curva de las trazas de Bode de la función de transferencia también da una indicación cualitativa sobre la estabilidad relativa del sistema en lazo cerrado. En la mayor parte de los casos prácticos, es conveniente para la estabilidad una pendiente de -20 dB/década en la frecuencia de cruce de ganancia.

En la elección de los valores de resistencia y capacitancia se buscó cumplir con los siguientes requerimientos:

- Dar estabilidad al sistema, adecuando los valores de margen de fase y margen de ganancia.

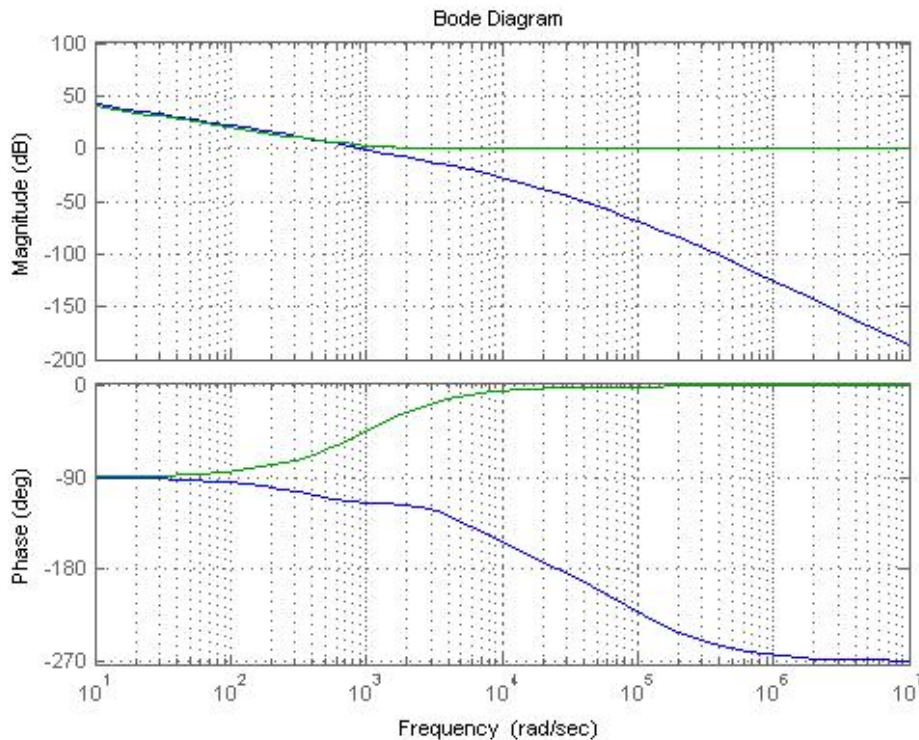
- Respuesta transitoria rápida con sobrepasos moderados.

El proceso de diseño utilizado fue sencillo, se eligió un controlador y se buscó satisfacer las especificaciones de margen de fase y margen de ganancia mediante simulación, sin embargo el controlador PI no fue suficiente por lo que se debió implementar un lazo de control en modo corriente G. como se muestra en el diagrama de bloques del sistema de control en la figura 4-34.



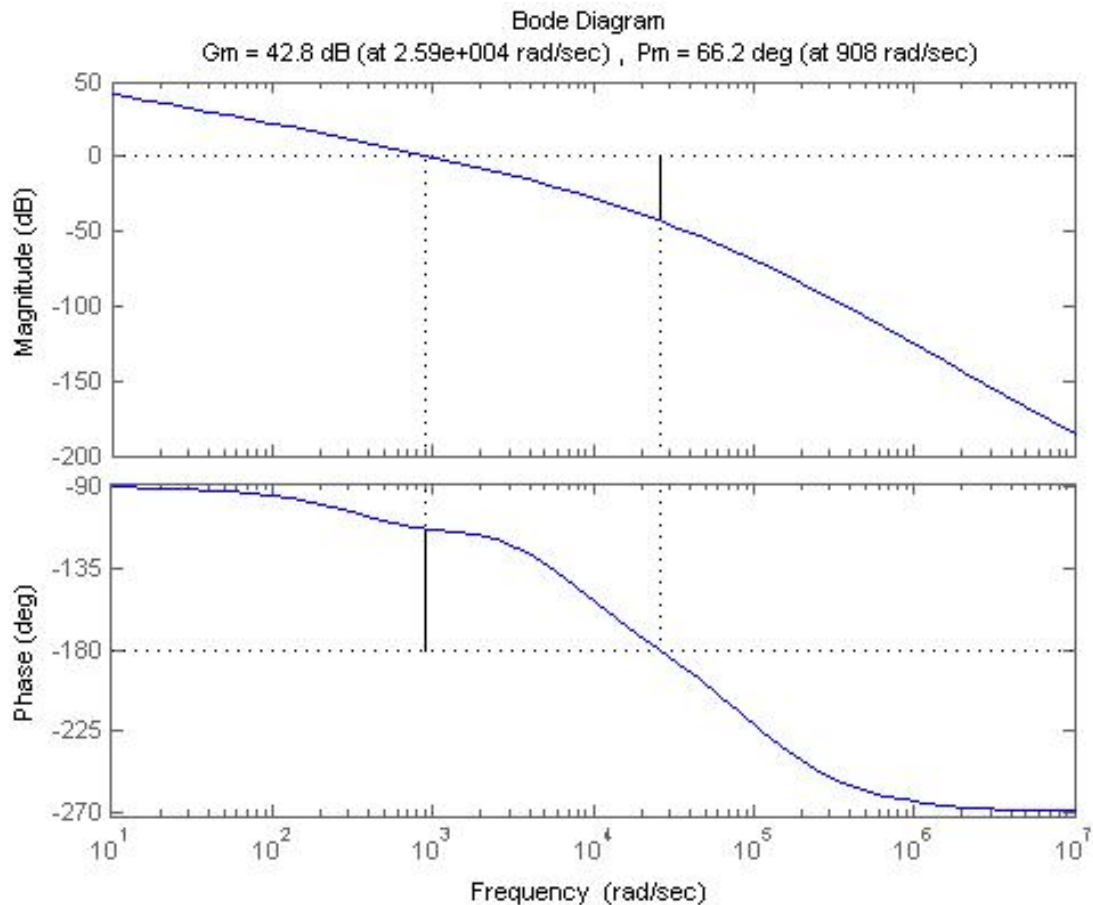
**Figura 4-34.** Diagrama de control de bloques.

La superposición de las respuestas individuales de la fuente y los demás elementos produce la respuesta final del sistema. En la figura 4-35 se muestra la respuesta final del controlador PI.



**Figura 4-35.** Determinación del margen de fase y margen de ganancia para el controlador PI.

La figura 4-36 representa la respuesta global del sistema señalando el margen de fase y el margen de ganancia.



**Figura 4-36.** Determinación del margen de fase y margen de ganancia para el sistema completo.

El cruce de ganancia es el punto donde la curva de magnitud intercepta al eje 0 dB. La frecuencia de cruce de ganancia es  $2.59 \times 10^4$  rad/s. El margen de fase se mide en el cruce de ganancia. El margen de fase se mide desde el eje -180 y es  $66.2^\circ$ . Ya que el margen de fase se mide arriba del eje -180, el margen de fase es positivo y el sistema es estable.

El cruce de fase es el punto donde la curva de fase intercepta al eje -180. La frecuencia de cruce de fase es 908 rad/s. El margen de ganancia se mide en el cruce de fase y es 42.8 dB. Ya que el margen de ganancia se mide por abajo del eje de 0 dB, el margen de ganancia es positivo y el sistema es estable.

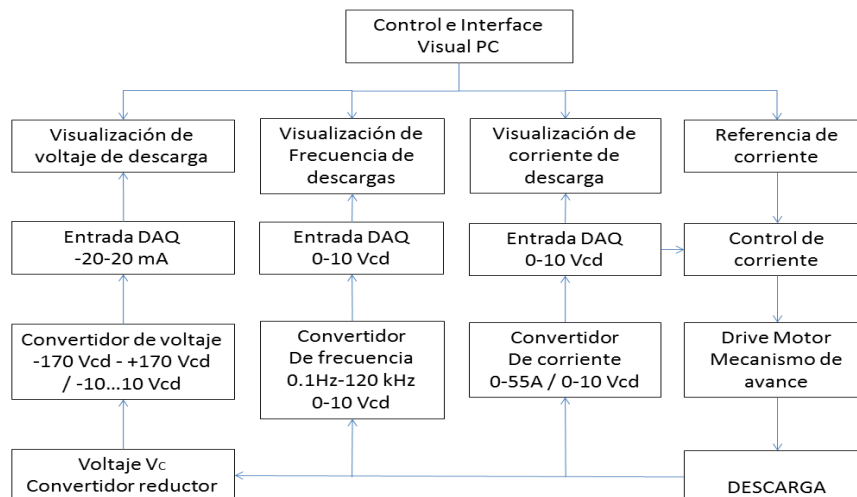
# Capítulo 5

## Desarrollo del sistema de control

En este capítulo se presenta el sistema de control de la máquina. Dentro de las funciones del sistema de control son: medición del voltaje de las descargas, medición de la frecuencia de las descargas, medición y control de la corriente de las descargas a través del control del gap.

### 5.1 Sistema de control

En la figura 5-1 se muestra el esquema de control propuesto para la máquina, donde se utiliza como interface la pantalla de la PC para la visualización del ajuste de las características del maquinado y el control de la corriente de las descargas se realiza mediante una corriente de referencia.



*Figura 5-1. Esquema de control para máquina EDM.*

## 5.2 Adquisición de señales en LabView

Todas las variables son controladas a través de un programa desarrollado en la plataforma LABVIEW® y usando como interface una tarjeta DAQ que recibe las señales análogas de control de 0-10 Vcd. Cada una de estas señales es previamente acondicionada para adecuar la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).

### 5.2.1 Adquisición de nivel de voltaje

Para la adquisición del nivel de voltaje en las descargas, se emplea un convertidor de voltaje modelo: MCR-VDC-UI-B-DC, de la marca Phoenix Contact. Este convertidor admite tensiones de entrada de -120 Vcd hasta +120 Vcd, y lo convierte a una señal de salida de -10 hasta +10 Vcd. Esto es muy conveniente, ya permite hacer la medición del voltaje de las descargas en todo el rango de operación así como contemplar el caso de la inversión de polaridad de las descargas.

Este convertidor realiza la medición del valor efectivo (valor medio cuadrático) el valor efectivo de una corriente alterna equivale al valor continuo resultante de los valores instantáneos de la corriente que genera el mismo trabajo térmico en una resistencia que una corriente continua de la misma magnitud. El valor real efectivo indica únicamente que también es posible registrar corrientes distorsionadas, continuas y mixtas, haciendo al convertidor independiente de la forma de la curva.

### 5.2.2 Adquisición de frecuencia

Para la adquisición de frecuencia de las descargas, se utiliza un convertidor modelo: MCR-F-UI-DC de la marca Phoenix Contact, el cual tiene la función de convertir las señales de frecuencia de las descargas de 3Vcd que se toma del circuito de control de descargas y lo convierte en una señal análoga de 0-10 Vcd para la DAQ.

### 5.2.3 Adquisición de nivel de corriente de las descargas

Por ultimo para la medición de la corriente de las descargas, se utiliza un convertidor modelo: MCR-S-10-50-UI-DCI de la marca Phoenix Contact, que registra corrientes continuas, alternas o distorsionadas con un margen de corriente de 0 a 55 A y las convierte a una señal de salida analógica de 0-10 Vcd, además el convertidor dispone de una salida tipo relé para la activación de una alarma de alta corriente, misma que será usada para la protección por sobre corriente o cortocircuito de la fuente de voltaje de descargas. Este convertidor, emplea un sistema de medición de valor real efectivo, el

cual es independiente del factor de forma de los dispositivos de medición de corriente tradicionales y acepta por lo tanto cualquier forma de onda de las corrientes de descarga. Este método es llamado Registro de valor real efectivo (TRMS) mediante sensores de efecto Hall.

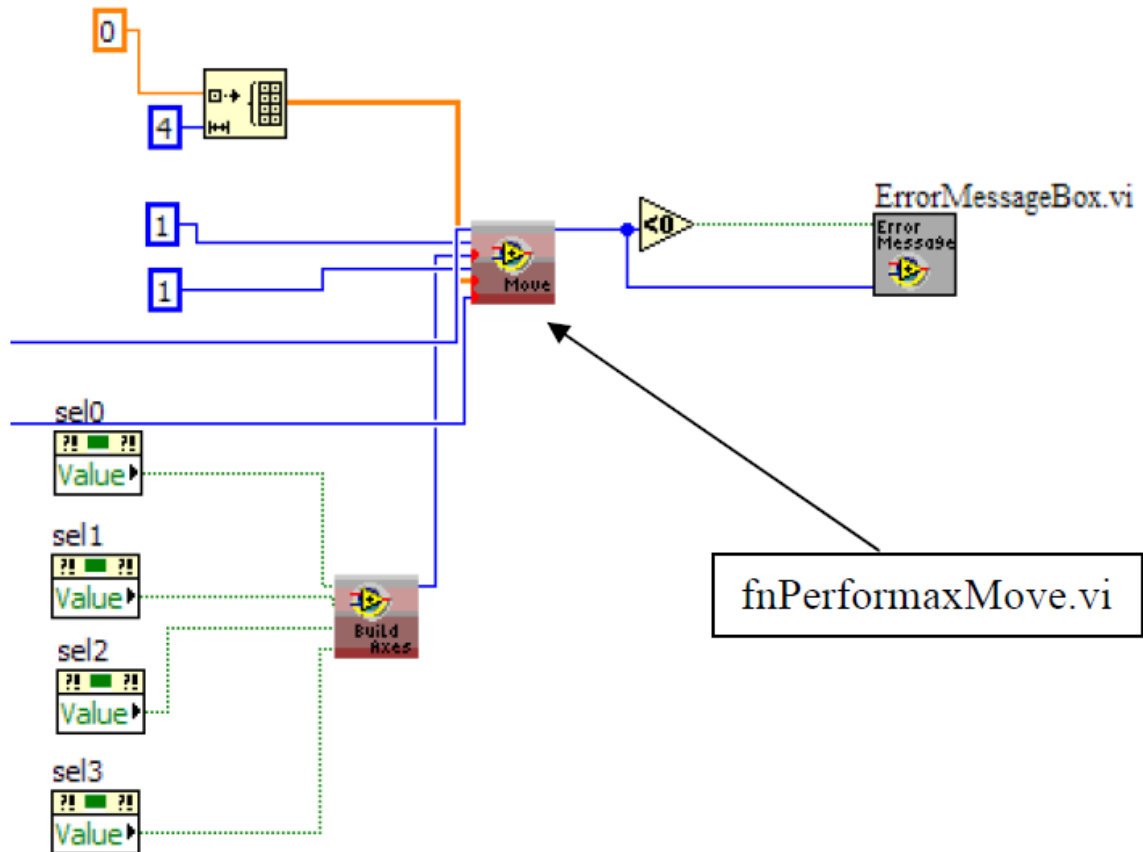
### 5.3 Sistema de control de avance en LabView

Aprovechando la facilidad y los convenientes atributos de comunicación USB para llevar el control de movimiento del motor a pasos es que se decide utilizar LabView. Existen controladores de ejes con varias especificaciones y paquetes de integración. Debido a la popularidad de LabView en la industria de la automatización se propone utilizar API's (application programming interface) y un programa que es totalmente compatible con la plataforma de programación. La comunicación se establece a través de LabVIEW con un VI (Virtual Instrument), que a su vez usa el acceso a la librería de enlace dinámico (DLL) para esta aplicación llamada "PerformaxCom.dll". Esta DLL contiene todas las funciones para el protocolo USB del drive del motor. Los VI's de LabView son los componentes básicos utilizados para la comunicación USB. La tabla 5-1 muestra la lista de los VI's del drive necesarios para el control de avance.

*Tabla 5-1. Instrumentos virtuales VI's en LabView.*

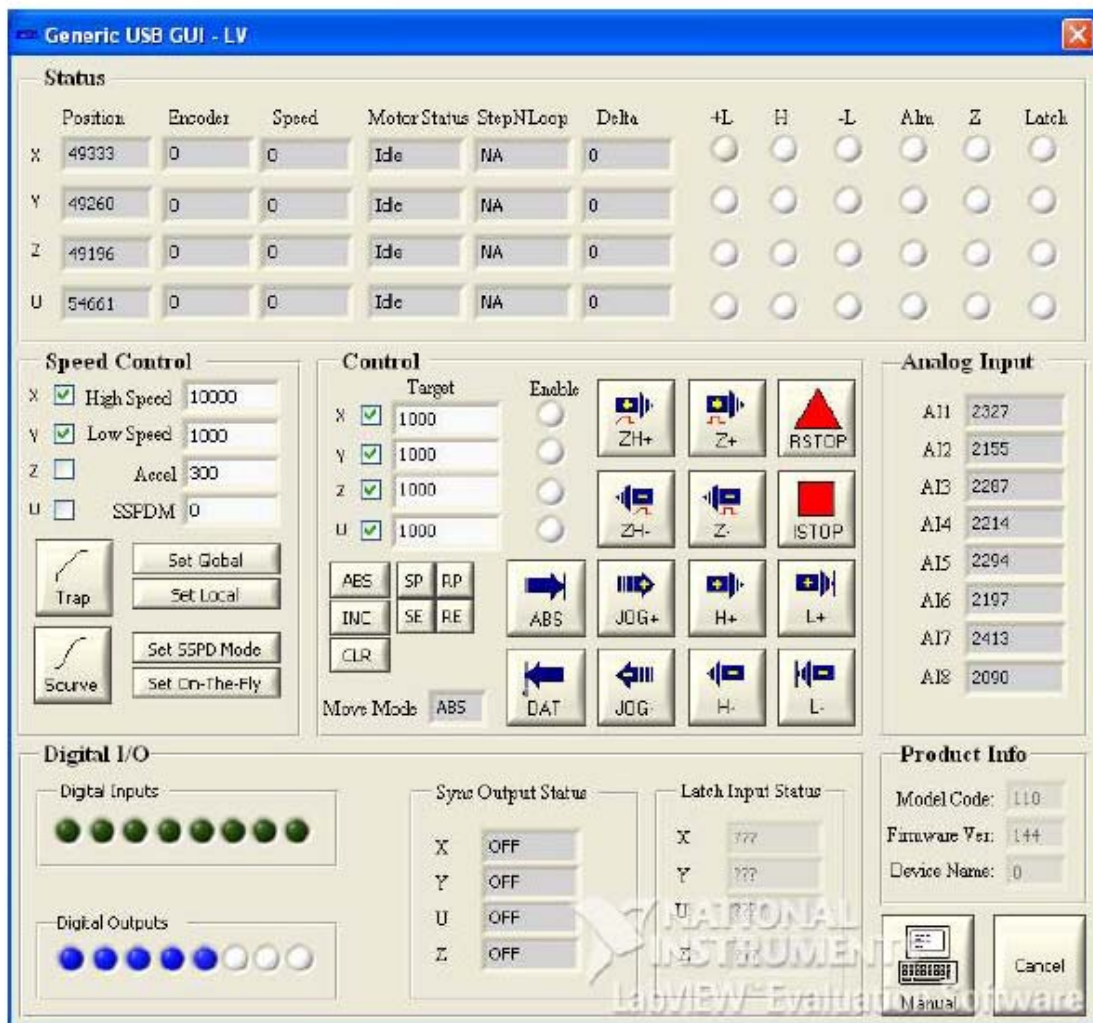
	Nombre	Función
1	move.vi	Mueve el eje.
2	speedaccel.vi	Fija la velocidad y aceleración para el controlador.
3	io.vi	Controla las entradas y salidas.
4	motorstat.vi	Muestra el estatus del motor.
5	general.vi	Fija los parámetros misceláneos.
6	commandreply.vi	Envía y recibe comandos ASCII.
7	comgetnumdevices.vi	Muestra todos los equipos conectados a la PC.
8	comgetproductstring.vi	Esta función se utiliza para obtener las cadenas de los productos Performax.
9	comopen.vi	Abre la comunicación de forma manual.
10	comclose.vi	Cierra la comunicación de forma manual.
11	comsettimeouts.vi	Establece los tiempos de escritura y lectura del motor.

A continuación en la figura 5-2 se muestra una vista de diagrama de bloques de un ejemplo de uso de `fnPerformaxMove.vi`



*Figura 5-2. Ejemplo de VI.*

Usando la interfaz gráfica de usuario, Figura 5-3 (con código fuente) se muestra un ejemplo de cómo se utilizan los VI's USB. Tomando en cuenta que esta interfaz gráfica de usuario se puede utilizar con cualquier motor USB. La conexión USB del software automáticamente determina qué funciones permite y cuáles no, según el modelo del controlador USB. A continuación se muestra una captura de pantalla de la aplicación. Sin embargo es necesario determinar la liga de las variables directamente en la programación de Labview para formar los lazos de control de manera automática.



*Figura 5-3 Interface de usuario.*

A pesar de que los motores a pasos tienen una indiscutible capacidad de rendimiento, el rendimiento final se determina sobre todo por la puesta a punto del lazo del servo en la programación de Labview. Los motores a pasos tienen la capacidad de crear el par en una forma predecible y lineal. Esto los hace atractivo para su uso en sistemas de circuito cerrado. A pesar de la gran cantidad de material teórico sobre los sistemas de retroalimentación y control de lazo cerrado, la sintonización PID de un lazo de servo sigue siendo un arte.

El controlador PID es probablemente uno de los algoritmos de control más utilizados en cualquier sistema de circuito cerrado (no sólo para el movimiento, sino



también en el control de procesos, control de temperatura etc.). El controlador PID deriva su nombre de los 3 componentes que conforman este algoritmo:

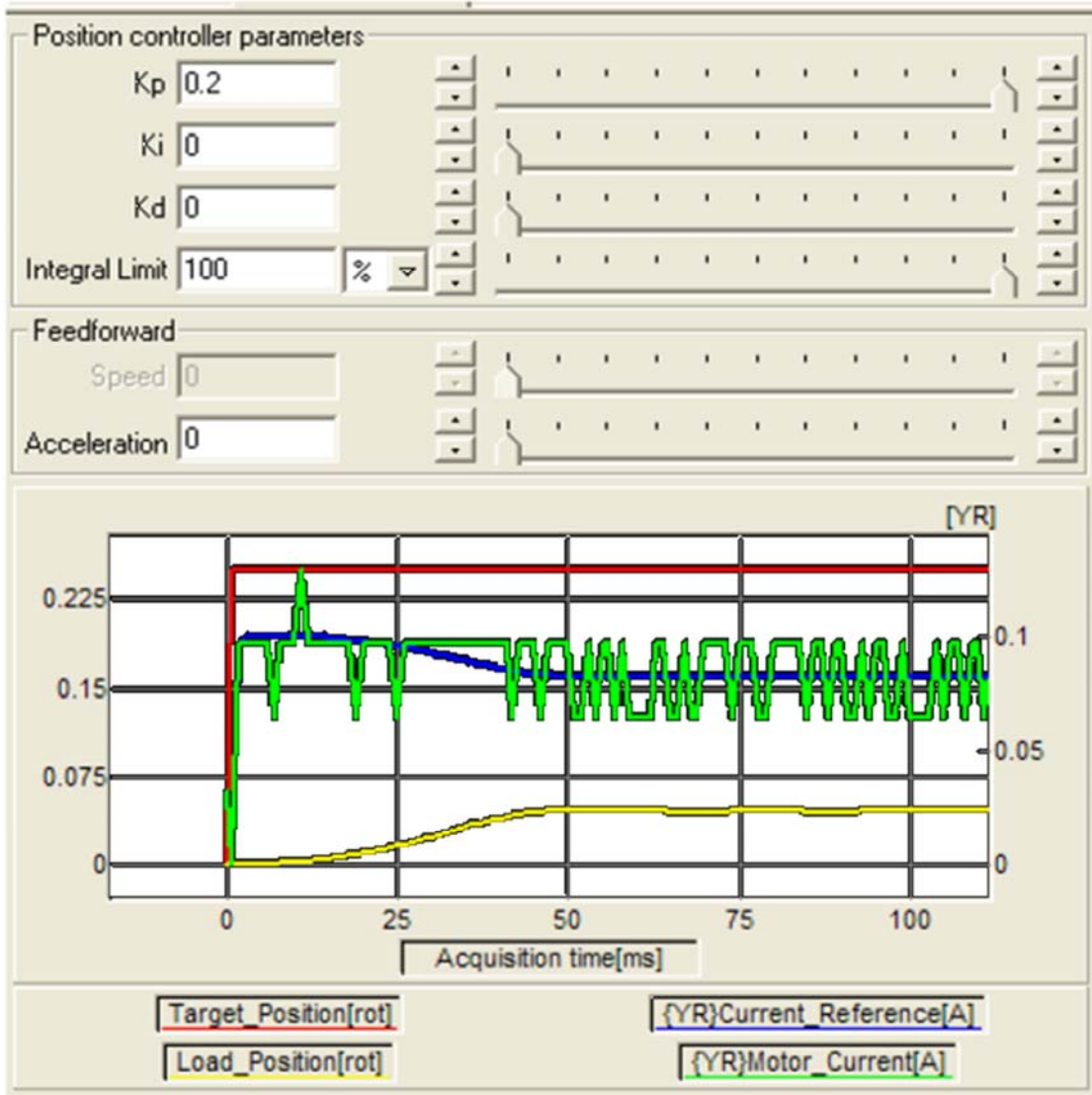
- P: término proporcional. Este da lugar a una señal de salida que es proporcional a la entrada.
- I: término integral. Esto da lugar a una señal de salida que es la suma es decir, integral (con el tiempo) de la señal de entrada.
- D: término derivado. Esto da lugar a una señal de salida que es la derivada de la señal de entrada.

En general, estos tres términos actúan de forma independiente uno del otro y sus resultados se suman para crear una sola señal de salida PID. Sin embargo, son posibles otras configuraciones. Por ejemplo, el término proporcional puede ser en serie con un término proporcional fijo y en paralelo con un término integral. O el término derivativo puede actuar solamente sobre la señal de realimentación, y no sobre la señal de error.

### 5.3.1 Efectos de los términos PID en el control de avance

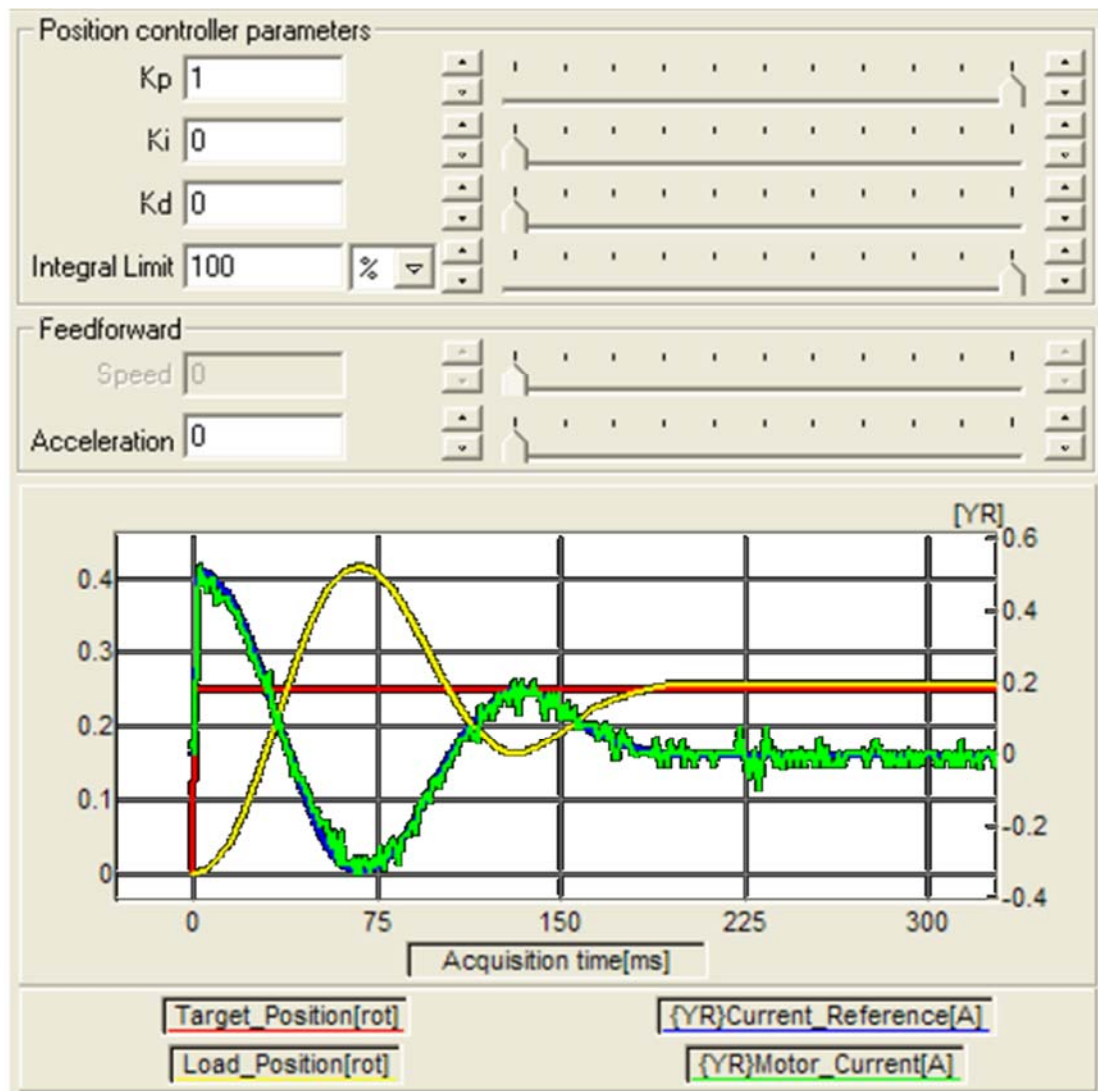
En lugar de discutir la teoría del control y los modelos matemáticos, se recomienda realizar ejercicios prácticos de sintonía [46], revisando más de cerca el verdadero impacto de los diversos beneficios. Utilizando una unidad servo digital y el motor con realimentación por encoder aunque para nuestro caso la velocidad será controlada a través de la retroalimentación de la corriente de descarga. Para ilustrar los efectos de las ganancias, así como ofrecer algunas orientaciones prácticas. Una de las mejores maneras de evaluar la sintonía de un PID, es observando la respuesta al impulso del sistema. Con el fin de asegurarnos de que no se satura el sistema (y por tanto, evitar las no linealidades), utilizando pequeñas características de la respuesta a la señal. Además de buscar la respuesta en la posición, también se examina el par como una medida de "lo difícil que estamos tratando".

A continuación se muestra una imagen, Figura 5-4, de la respuesta con sólo un valor pequeño de ganancia proporcional. Las ganancias integral y derivativa se ponen en cero.



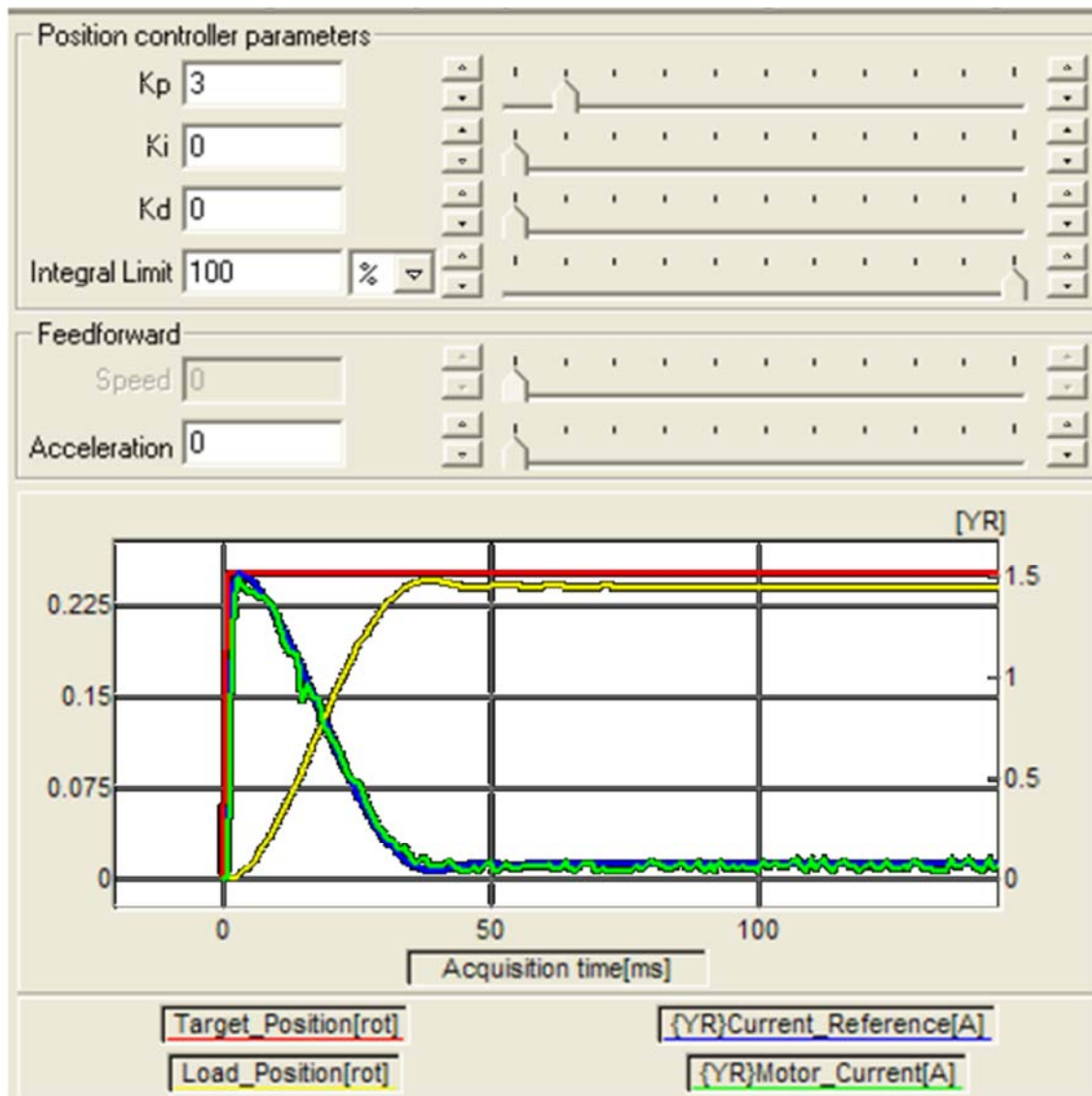
**Figura 5-4.** Respuesta del servo con ganancia proporcional.

La línea roja es la referencia del pulso. La línea amarilla es la posición de retroalimentación. Las curvas azules y verdes hacen referencia a la corriente actual, respectivamente (son proporcionales al esfuerzo de torsión). Claramente, la respuesta es muy lenta. Después de aumentar la ganancia proporcional un par de veces, podemos llegar al siguiente resultado de la figura 5-5.



*Figura 5-5. Respuesta con incremento de ganancia proporcional.*

Este sistema en particular no tiene casi ninguna fricción, por ello se observa el gran aumento, aunque la ganancia es relativamente pequeña. Si añadimos fricción mecánica debido al mecanismo, después de aumentar la ganancia proporcional se obtienen el comportamiento descrito en la figura 5-6.



*Figura 5-6. Sistema con fricción.*

La fricción adicional ayuda a disminuir la respuesta, pero por supuesto es necesario un valor de ganancia más grande. Se observa también que el objetivo final no es del todo alcanzado (es decir, hay un pequeño error en estado estacionario). Esto siempre debe ser el primer paso en la afinación del lazo del servo. Comenzando con una ganancia proporcional y observando a la respuesta. Si el sistema tiene una tendencia a dispararse rápidamente, incluso con una ganancia pequeña, es probable que la fricción sea baja. Si otro aumento es necesario para obtener la respuesta, y la respuesta es lenta, el sistema tiene una fricción considerable.

Dado que nuestro sistema cuenta con una elevada fricción, una velocidad de operación baja y una resolución elevada de encoder, es posible realizar el lazo de control PID solamente por la sintonización del sistema variando los parámetros del PID.

La sintonización de lazos de control no es una tarea sin importancia. No se puede negar que la experiencia práctica es muy valiosa. Aunque el comportamiento del algoritmo PID se entiende bien, hay muchos detalles de aplicación y parámetros del sistema que influyen en la respuesta. Al utilizar un enfoque sistemático para aumentar las ganancias progresivamente con la adecuada vigilancia de la respuesta, el comportamiento estable es obtenido más rápidamente. Al mismo tiempo que se observan los valores de corriente y el par para determinar cuánta energía se aplica, o simplemente para evitar la saturación. Si el sistema es marginalmente dimensionado, puede ser necesario ajustar las expectativas de desempeño. Por último, se deben tener las herramientas adecuadas para realizar este ejercicio. Por lo que es imperativo obtener esta configuración de manera práctica con la realización de pruebas que cumplan con el siguiente algoritmo de funcionamiento específico de la máquina EDM.

# Capítulo 6

## Análisis y discusión de resultados

De acuerdo la información presentada se observa que en general los estudios realizados sobre el maquinado EDM son pocos en comparación con otras tecnologías de maquinado, además son investigaciones que utilizan equipos complejos y materiales no muy comunes, por lo tanto costosos. En el caso particular del maquinado EDM en agua, los trabajos de investigación que existen están enfocados hacia evaluar la factibilidad de llevar a cabo el EDM en agua. Estos estudios han demostrado que el maquinado EDM en agua es factible y que además tiene algunas ventajas con respecto al maquinado EDM convencional en aceite. Por lo anterior, se observa que el EDM en agua puede ser utilizado en el diseño de equipo EDM de bajo costo de operación. Sin embargo, surge la necesidad de un estudio más profundo de las variables involucradas en el maquinado EDM en agua con el objeto de caracterizar este proceso e identificar las condiciones óptimas de operación. Además de que resulta indispensable conocer los parámetros de operación y su efecto en el proceso y de esta manera definir los rangos de operación y exigencias que deben cumplir las máquinas EDM en agua.

Realizando un resumen del proceso para el diseño conceptual y aplicando sus diferentes herramientas, métodos y técnicas que apoyan el diseño se dio uso a las diferentes herramientas de la metodología de diseño. Realizando una síntesis de los fundamentos teóricos de la metodología y su aplicación al diseño particular del sistema EDM. En conclusión, en cada una de las etapas del modelo propuesto se utilizaron las diferentes herramientas de diseño desarrolladas más a detalle en el desarrollo específico de cada uno de los sistemas. Identificando los puntos importantes como son:

- Identificación de la necesidad de desarrollar un sistema EDM en agua, lo que resulta en el establecimiento de un grupo de especificaciones,

características de calidad, requerimientos funcionales y restricciones para el sistema que se quiere crear.

- Formulación del problema mediante una descripción funcional del sistema en desarrollo, lo que resulta en la definición de las direcciones de diseño. En esta etapa se integran la técnica del Análisis Funcional.
- Generación de ideas como conceptos de solución para el desarrollo del sistema, mediante un proceso creativo que incluye el análisis y la evaluación de los conceptos propuestos.

El mecanismo de avance fue desarrollado usando los materiales disponibles y buscando un diseño simple pero funcional a partir de un mecanismo sencillo de tornillo y tuerca. Este tipo de mecanismos se pueden conseguir de manera comercial, pero son costosos, la única complicación que se tuvo durante su fabricación fue el tornillo de M12 x 1mm, ya que es demasiado largo para ser maquinado de forma tradicional por lo que se recurrió a un maquinado por laminado, aun así el mecanismo presenta un ligero problema de atascamiento debido al pandeo del tornillo.

Todo el diseño mecánico fue desarrollado buscando la optimización de los materiales y recursos, lo que afectó sus dimensiones, así como la utilización de los materiales y equipos disponibles, es por ello que se presentan componentes sobredimensionados como es el caso de la bomba y el servomotor a pasos. Sin embargo esto no afecta el objetivo del diseño de este sistema, ya que no se pretende que se eficiente, si no que cumpla con los requisitos de operación que permitirán hacer los estudios posteriores para el maquinado por descarga eléctrica en agua.

El uso de perfiles IPS mejora en gran medida el proceso de diseño en software CAE y fabricación gracias a la eliminación de variados procesos de manufactura típicos del desarrollo de máquinas o celdas de manufactura, además de que se aprovechan las propiedades antioxidantes del aluminio. Y se obtiene una máquina de peso relativamente bajo (74 kg) con una facilidad extraordinaria de adaptación o modificación de la estructura y montaje de los subsistemas. Estas últimas características fueron de gran utilidad durante la fabricación de la máquina, ya que permitieron realizar las modificaciones necesarias a fin de obtener un sistema más funcional y adaptable a los componentes disponibles.

Se obtuvieron excelentes resultados del diseño de la fuente tipo convertidor reductor para las descargas de la máquina EDM. Este tipo de fuente es ideal para el propósito de operación de la máquina, aunque existen otro tipo de fuentes más eficientes o compactas, no permiten operar en todo el rango de diseño.

La adición del lazo de control y la realimentación de control en modo corriente, dieron la estabilidad necesaria en la regulación del voltaje y en la mejora de la respuesta dinámica de la regulación ante la perturbación inicial originada por el inicio de las descargas.

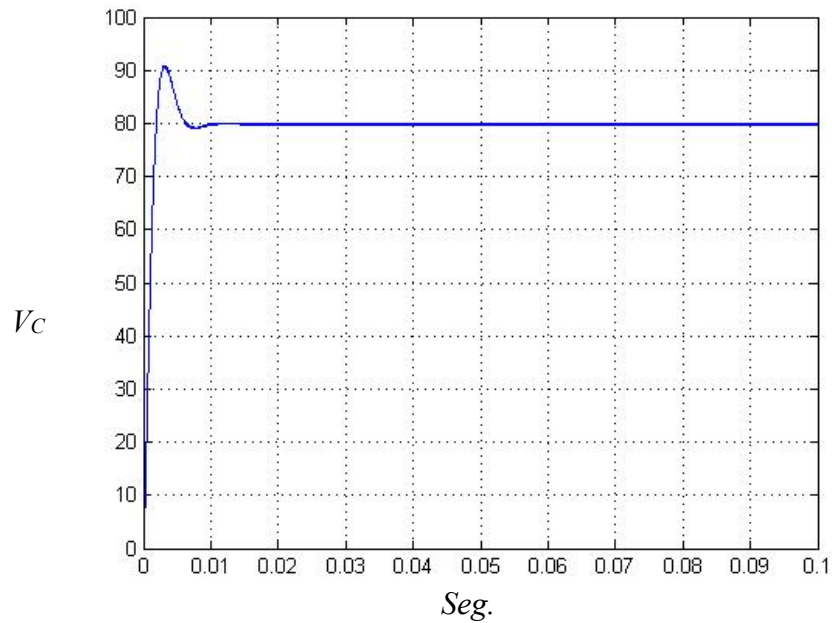
El uso de una resistencia en paralelo que permita la conducción de la fuente aun sin carga de trabajo, garantiza que la fuente siempre opera en modo de conducción continua.

Para comprobar el diseño del circuito se realizó una serie de simulaciones en el laboratorio de circuitos eléctricos del posgrado tomando casos con variaciones en nivel de voltaje, frecuencia de las descargas, y ciclo de trabajo con resistencia de carga constante. En estas simulaciones solo es posible analizar el comportamiento inicial de la fuente de potencia debido a que la resistencia de carga se consideró constante. Cabe hacer mención que el comportamiento real de la máquina está fuera del alcance del trabajo, pero se puede lograr al tomar en cuenta que la resistencia de carga es variable, teniendo un valor superior antes de vencer la resistencia del dieléctrico (que depende de la rigidez dieléctrica del agua, y del gap entre la herramienta y la pieza de trabajo), y una vez iniciada la descarga el valor de la resistencia es mucho menor; además, el comportamiento no es lineal pues ocurren fenómenos termodinámicos más complejos durante el proceso. Pese a lo anterior, debido a que se pretende evaluar la capacidad de respuesta de la fuente y garantizar la regulación de voltaje, los resultados de las simulaciones con resistencia de carga constante tienen validez para efectos de diseño y validación de la fuente.

CASO 1: 80 V de voltaje de salida con una resistencia simulada de trabajo de  $1.6\Omega$  un ciclo de trabajo del 70% a una frecuencia de las descargas de 10 kHz.

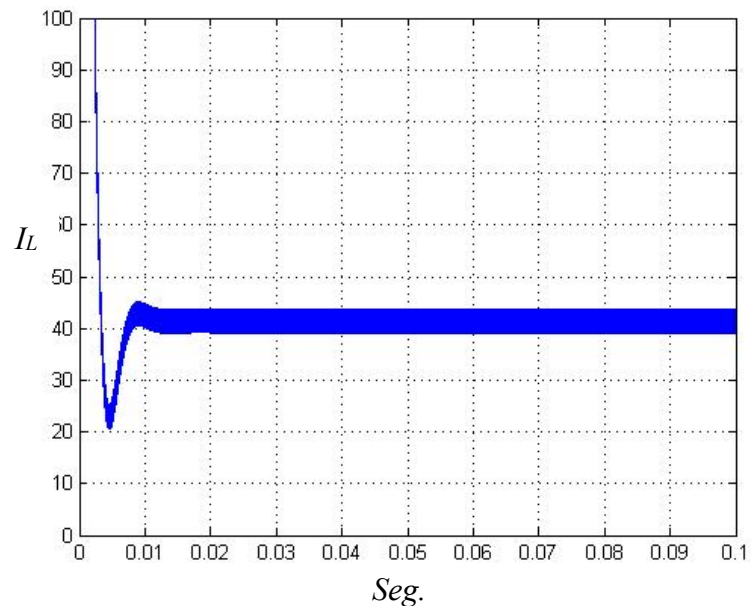
En la gráfica de voltaje de salida  $V_C$  figura 6-1, se observa un sobrepaso de voltaje al inicio, causado por la carga del capacitor, pero después de esto, el voltaje se mantiene regulado durante todo el proceso. Este sobrepaso, es mayor conforme se reduce el nivel de voltaje de las descargas.





**Figura 6-1.** Voltaje de capacitor para el CASO 1.

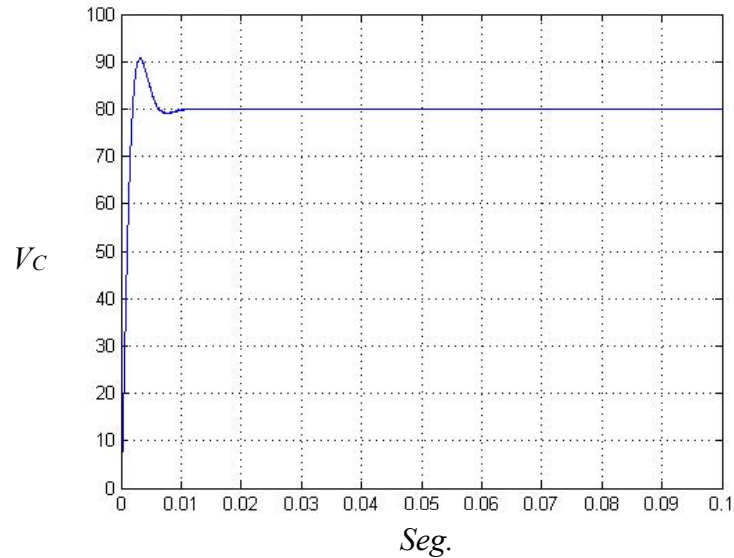
Para el caso de la corriente en el inductor  $I_L$ . Tiene una baja al inicio, aunque nunca llega a ser cero aun trabajando sin carga como se discute adelante, y se comporta de manera estable durante las descargas.



**Figura 6-2.** Corriente del inductor CASO 1.

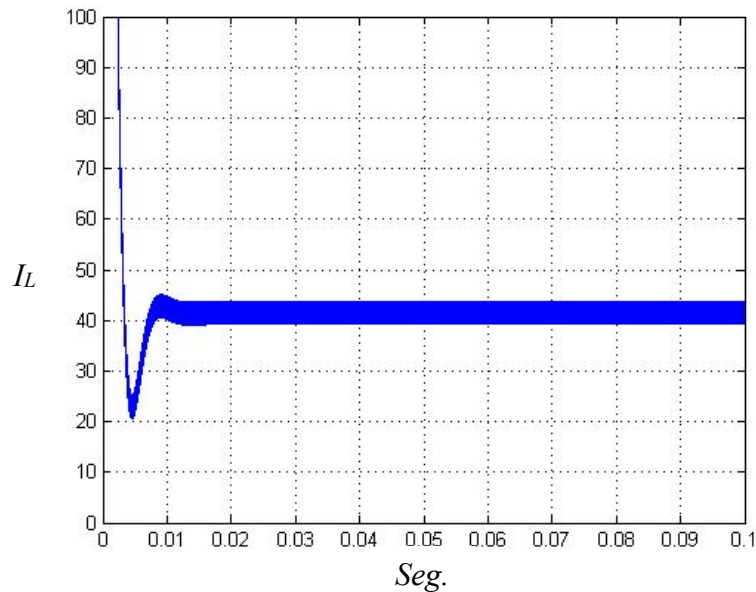
CASO 2: 80 V de voltaje de salida con una resistencia simulada de trabajo de  $1.6 \Omega$ , un ciclo de trabajo del 70% a una frecuencia de las descargas de 30 kHz.

En la figura 6-3 se observa que un aumento considerable en la frecuencia de las descargas no causa ninguna variación significativa en la regulación del voltaje.



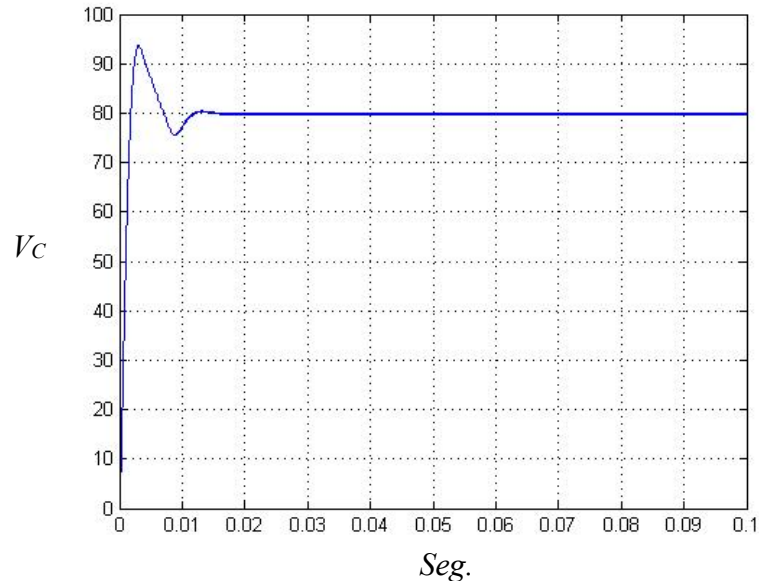
**Figura 6-3.** Voltaje de capacitor para el CASO 2.

Lo mismo sucede para la corriente del inductor la cual no se afecta con el incremento de la frecuencia tal como se muestra en la figura 6-4.



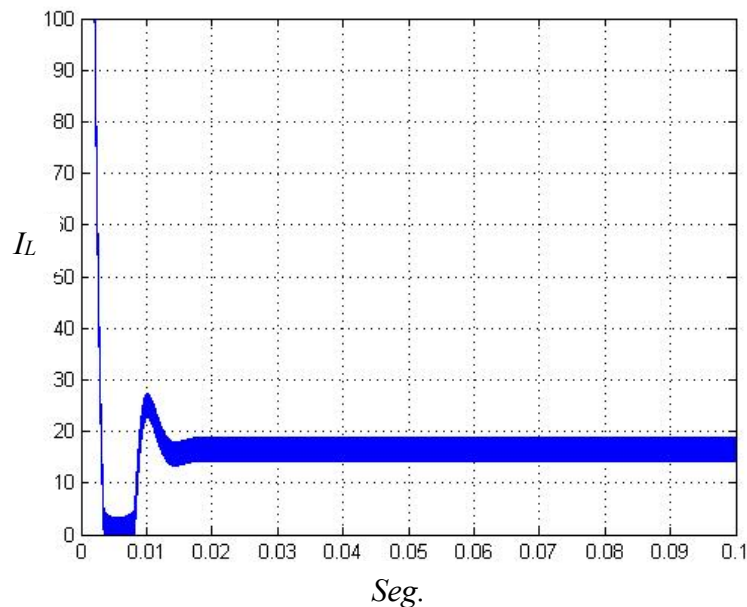
**Figura 6-4.** Corriente en el inductor CASO 2.

CASO 3: 80 V de voltaje de salida con una resistencia simulada de trabajo de  $4.2 \Omega$  un ciclo de trabajo del 70% a una frecuencia de las descargas de 30 kHz. Al aumentar la resistencia de las descargas, lo que se interpreta como un aumento del gap o del área de trabajo de la herramienta. El voltaje se estabiliza más rápidamente. Ver figura 6-5.



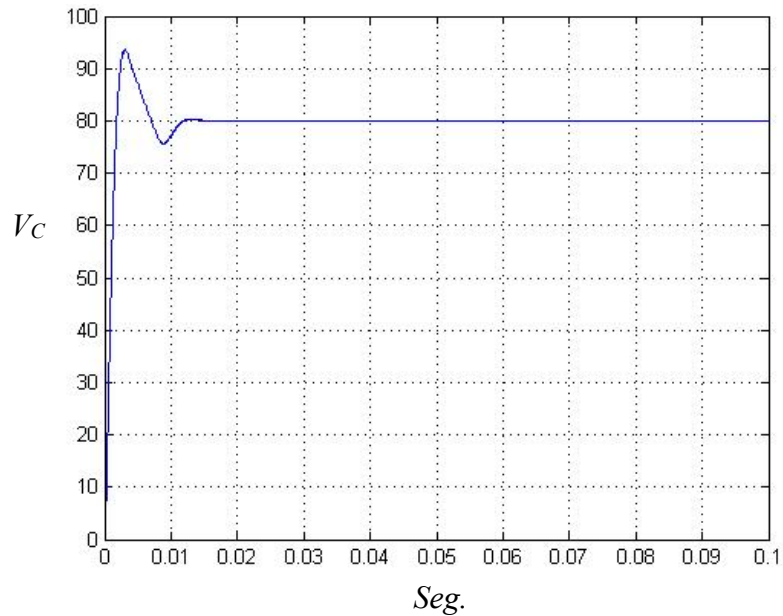
**Figura 6-5.** Voltaje de capacitor para el CASO 3.

Sin embargo la corriente presenta un mayor tiempo en el transitorio para su estabilización. Aunque nunca llega a cero. Como se muestra en la figura 6-6.

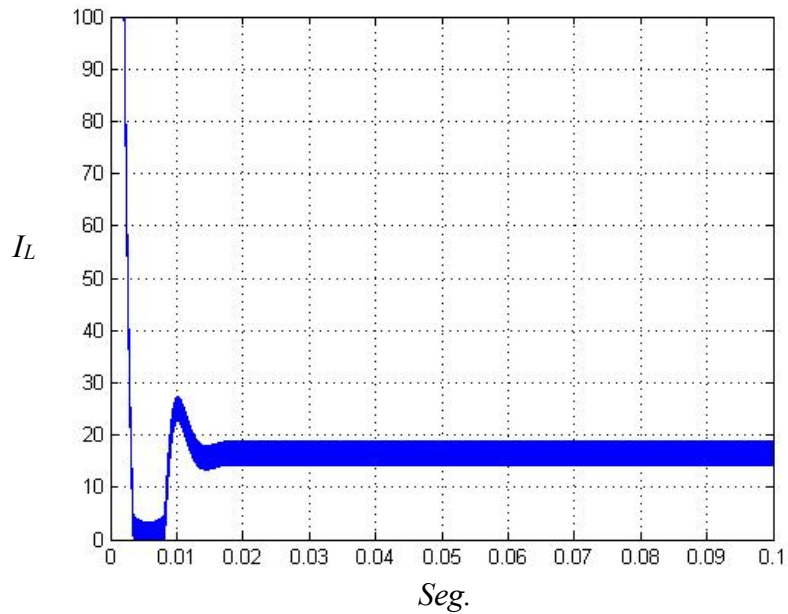


**Figura 6-6.** Corriente en el inductor CASO 3.

CASO 4: 80 V de voltaje de salida con una resistencia simulada de trabajo de  $4.2 \Omega$  un ciclo de trabajo del 25% a una frecuencia de las descargas de 30 kHz. La variación del ciclo de trabajo no muestra ninguna variación en el voltaje de salida o la corriente del inductor como se muestra en la figura 6-7 para el voltaje y 6-8 para la corriente.



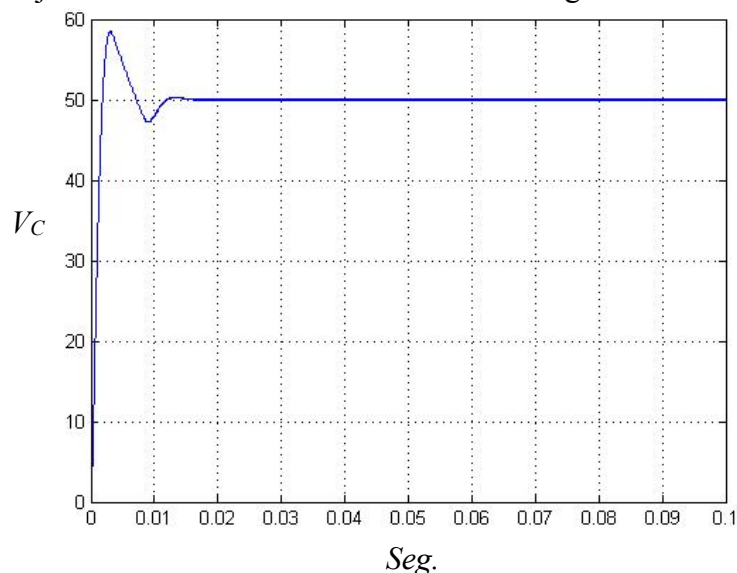
**Figura 6-7.** Voltaje de capacitor para el CASO 4.



**Figura 6-8.** Corriente en el inductor CASO 4.

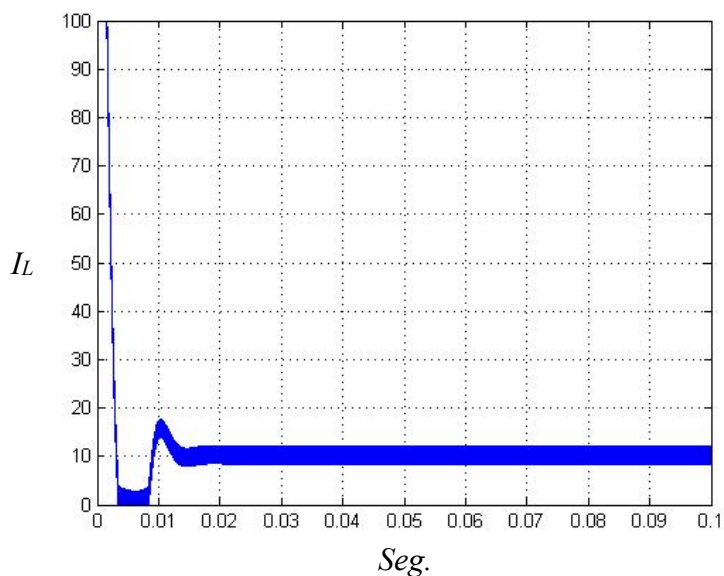
Las figuras de la 6-9 a la 6-10 muestran el comportamiento de la fuente bajo las mismas condiciones que las anteriores con la diferencia de que el voltaje de la fuente se reguló a 50 V pero no se aprecia ninguna diferencia en la capacidad de regulación de la fuente y en su estabilidad.

CASO 5: 50 V de voltaje de salida con una resistencia simulada de trabajo de  $4.2 \Omega$  un ciclo de trabajo del 25% a una frecuencia de las descargas de 30 kHz.



Seg.

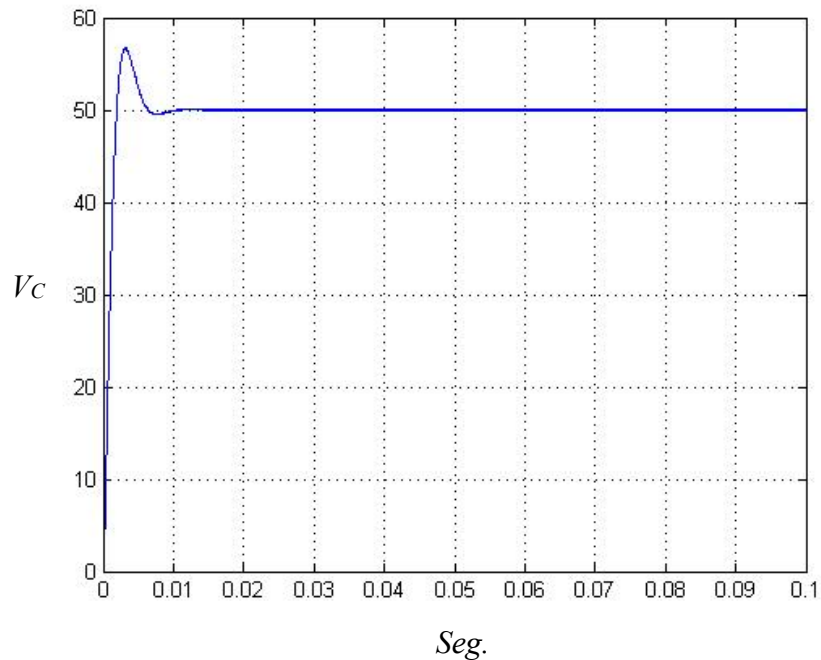
**Figura 6-9.** Voltaje de capacitor para el CASO 5.



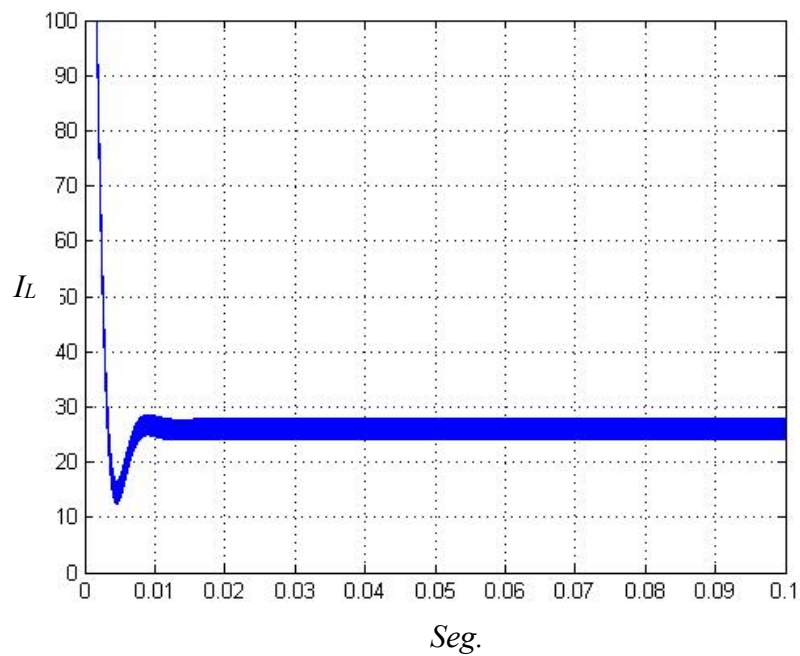
Seg.

**Figura 6-10.** Corriente en el inductor CASO 5.

CASO 6: 50 V de voltaje de salida con una resistencia simulada de trabajo de  $1.2 \Omega$  un ciclo de trabajo del 25% a una frecuencia de las descargas de 30 kHz.

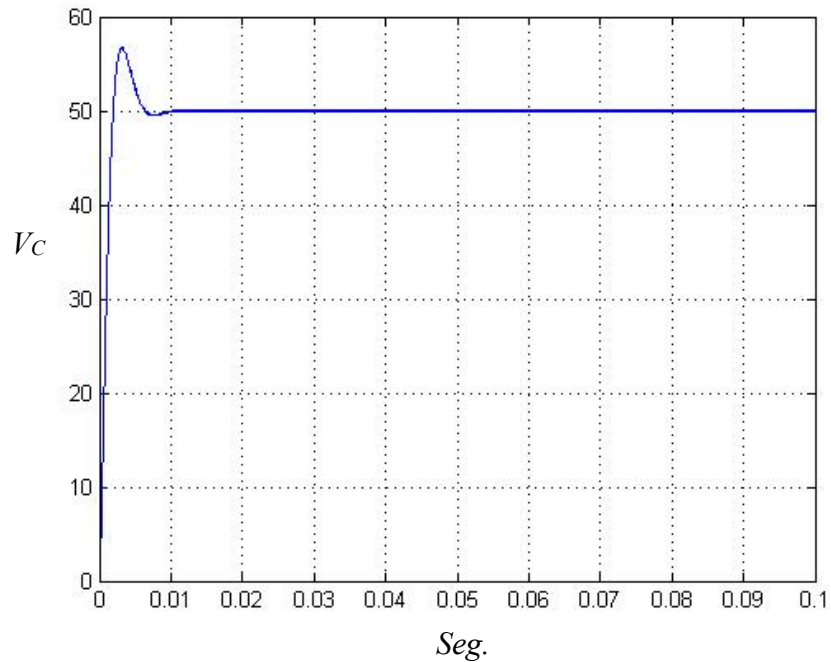


**Figura 6-11.** Voltaje de capacitor para el CASO 6.

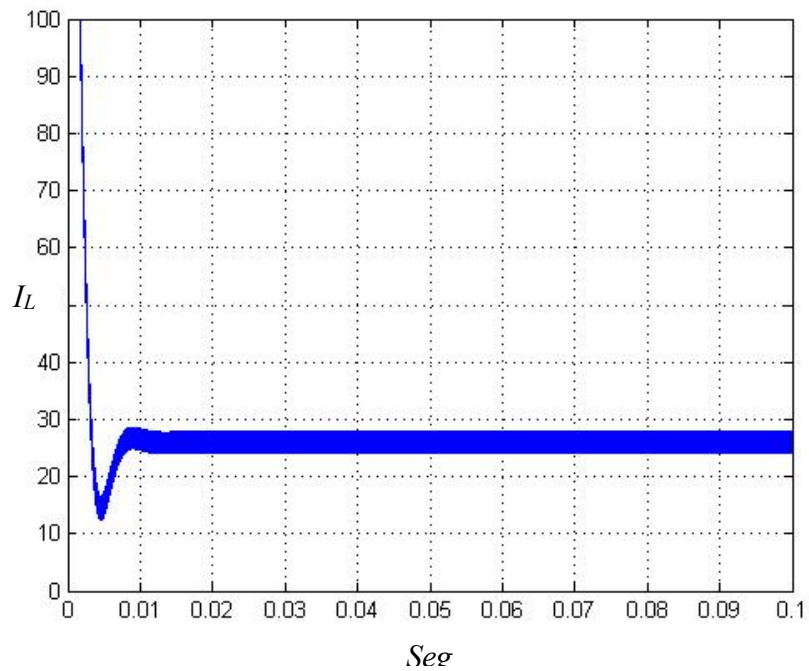


**Figura 6-12.** Corriente en el inductor CASO 6.

CASO 7: 50 V de voltaje de salida con una resistencia simulada de trabajo de 1.2  $\Omega$  un ciclo de trabajo del 75% a una frecuencia de las descargas de 30 kHz.

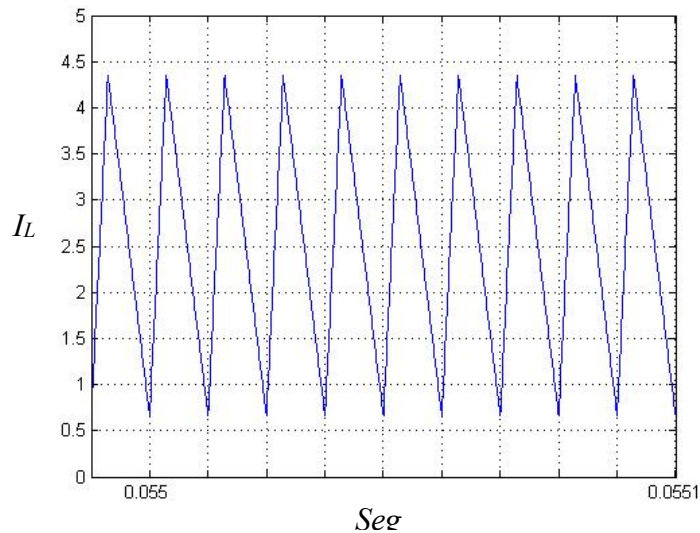


*Figura 6-13. Voltaje de capacitor para el CASO 7.*



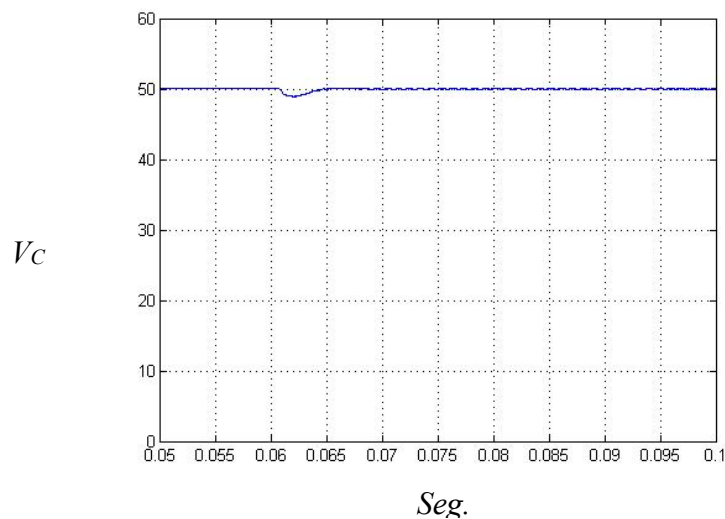
*Figura 6-14. Corriente en el inductor CASO 7.*

Como se observa en los resultados de las simulaciones, únicamente se afecta el funcionamiento de la fuente al inicio, debido al transitorio en la carga del capacitor. Sin embargo, esto no afecta el funcionamiento de la máquina puesto que este transitorio se elimina si antes de iniciar las descargas, se enciende la fuente, esto es posible gracias a la consideración de la resistencia mínima realizada durante el diseño del convertidor reductor, esta resistencia de  $25\Omega$  garantiza que la fuente opera en modo de conducción continua aun cuando no se encuentra realizando electroerosión, figura 6-15.



**Figura 6-15.** Corriente del inductor en modo de conducción continua, sin carga.

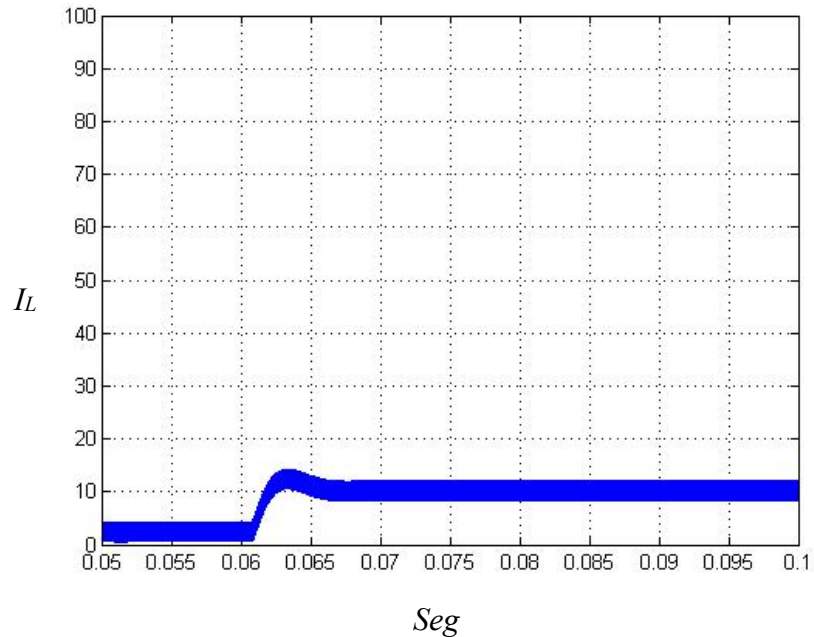
En la figura 6-16 se muestra el comportamiento del voltaje una vez que la fuente es estable y se inician las descargas, lo que causa una mínima perturbación en la regulación.



**Figura 6-16.** Perturbación en el voltaje originada por el inicio de las descargas.



De la misma forma, la corriente se estabiliza rápidamente, figura 6-17.



**Figura 6-17.** Corriente del inductor en modo de conducción continua, sin carga.

En las pruebas realizadas con la variación de los parámetros de ciclo de trabajo (en EDM tiempo de duración de las descargas) la frecuencia de las descargas, el nivel de voltaje de las descargas, y las resistencias propuestas para simular el gap y condiciones del maquinado, se observó una excelente regulación para todos los casos.

La implementación del control en la plataforma LabView ofrece grandes ventajas ya que se tiene una interface visual amigable que permite visualizar la modificación de los parámetros de manera simple. La utilización de componentes comerciales para la etapa del acondicionamiento de las señales elimina los posibles problemas de compatibilidad y tiempo de desarrollo para la adición de estos parámetros en la DAQ.

Aunque la implementación del control de avance puede parecer simple, esta programación involucra un tiempo de desarrollo relativamente largo, ya que es necesaria la utilización de los VI que hacen referencia a las señales de entrada y al control del drive, y el desarrollo de estos VI's, requieren de un mayor dominio de la programación en LabView.

El desarrollo del algoritmo de control necesita de datos adicionales que se obtiene a partir de las pruebas de maquinado que determinaran los niveles de corriente

que corresponde a los niveles de voltaje regulados para ciertas características de maquinado.

# Conclusiones

Con el desarrollo del presente trabajo de tesis se logró desarrollar un sistema mecatrónico de maquinado por descarga eléctrica en agua para uso en laboratorio e investigación.

El uso de una metodología de diseño conceptual de aplicaciones generales enfocada al desarrollo de la máquina y fundamentada en el cumplimiento de los requisitos principales y los datos de funcionamiento, dio como resultado un desarrollo exitoso. Se logró un diseño mecánico sencillo, útil, económico, fácil de fabricar e incluso de adaptar o modificar, por lo que en caso de requerir nuevos dispositivos o configuraciones de la máquina EDM no se tendrán mayores complicaciones.

En el caso del sistema de potencia, que es una de las partes vitales para la funcionalidad de la máquina, se logró un diseño convencional robusto que garantiza el cumplimiento de las necesidades del proceso EDM, permitiendo la caracterización del mismo. Además el diseño propuesto ofrece un amplio rango de operación, y en conjunto con el sistema de control propuesto se asegura el nivel de voltaje de descarga mediante la retroalimentación de un sensor de voltaje. Sin embargo, debido a la complejidad y alcance del proyecto el sistema de potencia propuesto no fue construido, y solo se realizaron simulaciones numéricas de su comportamiento inicial.

La implementación y prueba del controlador de la fuente se llevó a cabo mediante simulaciones numéricas. A partir de las simulaciones realizadas se verificó el rechazo a perturbaciones por variaciones en la frecuencia de descarga, el tiempo de descarga para diferentes niveles de voltaje, y las variaciones de la carga debidas a la naturaleza del proceso EDM; demostrándose que el controlador propuesto tiene buenas características de regulación del voltaje. Sin embargo, será durante las pruebas iniciales del prototipo de la fuente cuando se verifique el comportamiento real con la resistencia variable de la carga debido al comportamiento del fluido dieléctrico (agua).

Por último, el control de avance propuesto aprovecha la flexibilidad y ambiente amigable de LabView, permitiendo controlar de una manera adecuada la distancia entre la herramienta y la pieza de trabajo. La inclusión de una etapa de acondicionamiento de las señales de voltaje, frecuencia y corriente hacen posible la visualización en la interface visual de la PC.

El presente trabajo contribuye a sentar las bases para el desarrollo de sistemas EDM en agua mediante el uso adecuado de herramientas de diseño aplicadas a las diferentes disciplinas dentro de la mecatrónica, sus subsistemas y las variables del proceso y sus efectos. Todo lo anterior permitirá realizar estudios más avanzados en la caracterización del EDM en agua al contar con una máquina de laboratorio de amplio rango de operación y facilidad de adaptación o modificación.

Como trabajo futuro se considera la construcción y prueba de la fuente de potencia y sistema de control propuestos, así como su integración a la máquina EDM para continuar con el estudio y caracterización del proceso EDM en agua. También se contempla el desarrollo de otros mecanismos de avance que permitan operar en los tres ejes o con aditamentos como la vibración para evaluar sus efectos en maquinado EDM en agua. Adicionalmente se considera el desarrollo de nuevas fuentes resonantes para otros tipos de aplicaciones como micro maquinado o equipos de aplicaciones específicas de menores dimensiones.

## Bibliografía

- [1] El menos convencional de los mecanizados, Mayo 2006. <http://www.metalunivers.com/Tecnica/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=12068>.
- [2] D.F. Dauw. Et al., Surface topography investigations by fractal analysis of spark eroded electrically conductive ceramics, Ann. CIRP 39 (1) (1990) pp. 161-165
- [3] D. Brink, EDM: Principles of Operation, EDM technology Transfer. <http://www.edmtt.com>
- [4] P.S. Mathews, P.K. Phillip, Effect of manufacturing variables on EDM process stability while using pm electrodes, J. Inst. Eng. (India)-PR78 (1997) pp. 39-43.
- [5] H.C. Tsai, B.H. Yan, F.Y. Huang, EDM performance of Cr/Cu-based composited electrodes, Int. J. Mach. Tools Manuf. 43 (3) (2003), pp. 245-252.
- [6] E.I. Shobert, What happens in EDM, in: E.C. Jameson (Ed.), EDM: Tooling, Methods and Applications, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1993, pp. 3-4.
- [7] G. Boothroyd, A.K. Winston, Non-conventional machining processes, in: Fundamentals of Machining and Machine, Tools, Marcel Dekker, New York, 1989, p.491.
- [8] J.A. McGeough, Electro-discharge machining, in: Advanced Methods of Machining, Chapman & Hall, London, 1998, p. 130.
- [9] K.H. Ho, S.T. Newman, State of the art electrical discharge machining (EDM), Int. J. Mach. Tools Manuf. 43 (2003), pp. 1287-1300.
- [10] Herbert W. Yankee, Manufacturing Processes, Prentice Hall, 1979.
- [11] C. H. Kahng, K. P. Rajurkar, Surface characteristics behavior due to rough and fine cutting by EDM, Ann. CIRP 26 (1) (1977), p.77.
- [12] S. Singh, S. Maheshwari, P. C. Pandey, Some investigations into electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials, Journal of Materials Processing Technology 149 (2004), pp. 272-277.

- [13] Chiles, Black, Lissaman, Martin, Principios de ingeniería de manufactura, CECSA, 1999.
- [14] M.S. Shunmugam, P. K. Philip. Improvement of wear resistance by EDM with tungsten carbide P/M electrode, *Wear* 171 (1994), pp. 1-5.
- [15] N. Mohri, Saito, Y. Tsunekawa, Metal surface modification by EDM with composite electrode, *Annals for the CIRP* 42 (1993), pp. 219-222.
- [16] J. Simao, H.G. Lee, D.K. Aspinwall, R.C. Dewes, E.M. Aspinwall, Workpiece surface modification using EDM. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (2003), pp. 121-128.
- [17] M.R. Chen, Q.A. Xu, Amorphous carbon nitride thin films deposited by electrolysis and metanol and urea organic solution, *Journal of Material Science Letters* 18 (1999), pp. 317-319.
- [18] Ayala Gloria Federico, Fundamentos de mecanizado por electroerosión y sus ventajas en la fabricación de troqueles y moldes, Trabajo recepcional, UASLP, (1986).
- [19] P.S. Mathews, P.K. Phillip, Effect of manufacturing variables on EDM process stability while using pm electrodes, *J. Inst. Eng. (India)-PR78* (1997) pp. 39-43.
- [20] B.H. Yan, S.L. Chen, Effect of dielectric with suspended aluminum powder on EDM, *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series C/ Chung-Kuo Chi Hsueh Kung Ch'eng Hsuebo Pao* 14 (1993), pp. 307-312.
- [21] F.L. Zhao, Z.Z. Lu, H. Huang, Z. Q. Quian, Research on effecting mechanism of particles in powder mixer EDM, *Dalian Ligong Daxue Xuebao/Journal of Dalian University of Technology* 45 (2005), pp. 668-671.
- [22] Y.F. Tzeng, C.Y. Lee, Effect on powder characteristics on electro dischargemachining efficiency, *International Journal of Advanced Technology* 17 (2001), pp. 586-592.
- [23] H.K. Kansal, S. Singh, P. Kumar, application of Taguchi method for optimization of powder mixed electrical discharge machining, *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 7 (2005), pp. 329-341.
- [24] K.H. Ho, S.T. Newman, State of the art electrical discharge machining (EDM), *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 43 (2003), pp. 1287-1300.

- [25] J.S. Soni, G. Chakraverti, Effect of Electrode material properties on surface roughness and dimensional accuracy in electro-discharge machining of high carbon high chromium die steel, *J. Inst. Eng. (India)-PR* 76 (1995), pp. 46-51.
- [26] M.L.Jeswani, Electrical discharge machining in distilled water, *Wear* 72 (1981), pp. 81-88.
- [27] S. Tariq Jilani, P.C. Pandey, Experimental investigations into the performance of water as dielectric in EDM, *International Journal of Machine Tool Design and Research* 24 (1984), pp. 31-43.
- [28] R. Casanueva, F.J. Azcondo, C. Brañas, S. Bracho, Analysis design and experimental results of a high frequency power supply for spark erosion, *IEEE Transactions on Power Electronics* (20) (2005), pp. 361-369.
- [29] S.H. Kang, D.E. Kim, Effect of Electrical discharge machining process on crack susceptibility of nickel based heat resistant alloy, *Material Science and Technology* 21 (2005), pp. 817-823.
- [30] W. Koenig, L. Joerres, A aqueous solutions of organic compounds as dielectric for EDM sinking, *CIRP Annals- Manufacturing Technology* 36 (1987), pp. 105-109.
- [31] W. Konig, F.J. Siebers, Influence of the working medium o the removal process in EDM sinking, *American Society of Mechanical Engineers, Production Engineering Division (Publication) PED* 64 (1993), pp. 649-658.
- [32] S.L. Chen, B.H. Chan, F.Y. Huang, Influence of kerosene and distilled water as dielectric on the electrical discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V, *Journal of Materials Processing Technology* 87 (1999), pp. 107-111.
- [33] F.N. Leao, I.R. Pashby, a review on the use of environmentally friendly dielectric fluids in electrical discharge machining, *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004), pp. 341-346.
- [34] Hugo Medellín, Aarón Flores, Jorge Morales, Caracterización Experimental del Maquinado por Descarga Eléctrica en Agua, *Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 17 al 19 de septiembre, 2008, Puebla, México.
- [35] H. Medellín, A. Flores, J. Morales, A. de la Garza, Analysis of electrical discharge machining using water as dielectric and diverse electrode materials, *Proceedings of the ASME 2008 IDETC/CIE 2008*, August 3-6, 2008, Brooklyn, New York, USA.

- [36] Paul Acarnley, STEPPING MOTORS a guide to theory and practice, 4th edition The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2002.
- [37] H. Obara, T. Ohsumi, M. Hatano, Development of twin-type resistor less power supply for EDM, in: Proc. Of the ISEM XIII, 2001, pp. 153-160.
- [38] G. Wollenberg, F. Luhn, A. Gorisch, Pulsed EDM generators as sources of electromagnetic emission, in: Proc. Of the ISEM XII, 1998, pp. 229-308.
- [39] M.K. Kazimierczuk, D. Czarkowski, Resonant Power Converters, Wiley/Interscience, New York, 1995.
- [40] R.L. Steigerwald, A comparison of half-bridge resonant converter topologies, IEEE Trans. Power Electron, 3 (2) (1998), pp. 174-182.
- [41] Wachi S, Han F, Kuneida M. Shortening of pulse duration using transistor type pulse generator micro-EDM. In: Proceedings of the Japan Society for Precision Engineering Autumn Conference; 2001, pp. 99 (in Japanese).
- [42] Hara S. Method of Shortening discharge duration for fet TYPE pulse generator in micro-EDM Proceedings of the Japan Society for Precision Engineering Spring Conference; 2002, p. 624 (in Japanese).
- [43] Masuzawa T. Micro-EDM, In: Proceedings of the 13th International Symposium for Electromachining; 2001. pp. 13-19.
- [44] Koch O, Ehrfeld W, Michel F, Gruber HP. Recent process in micro-electro discharge machining. In: Proceedings of the 13th International Symposium for Electromachining; 2001. pp. 737-45.
- [45] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robins. POWER ELECTRONIC converters, applications and design. John Wiley and Sons. 1989. Pp. 66-101.
- [46] Muhammad H. Rashid. Electrónica de potencia circuitos, dispositivos y aplicaciones. Pearson Educación, México 2004. Pp. 186-189.
- [47] Donald Schelle and Jorge Castorena, Buck converter desing demystified. Power electronics technology Junio 2006.
- [48] Clausing, Don, Total Quality Development: A Step by Step Guide to World Class Concurrent Engineering, New York: ASME Press, 1993.



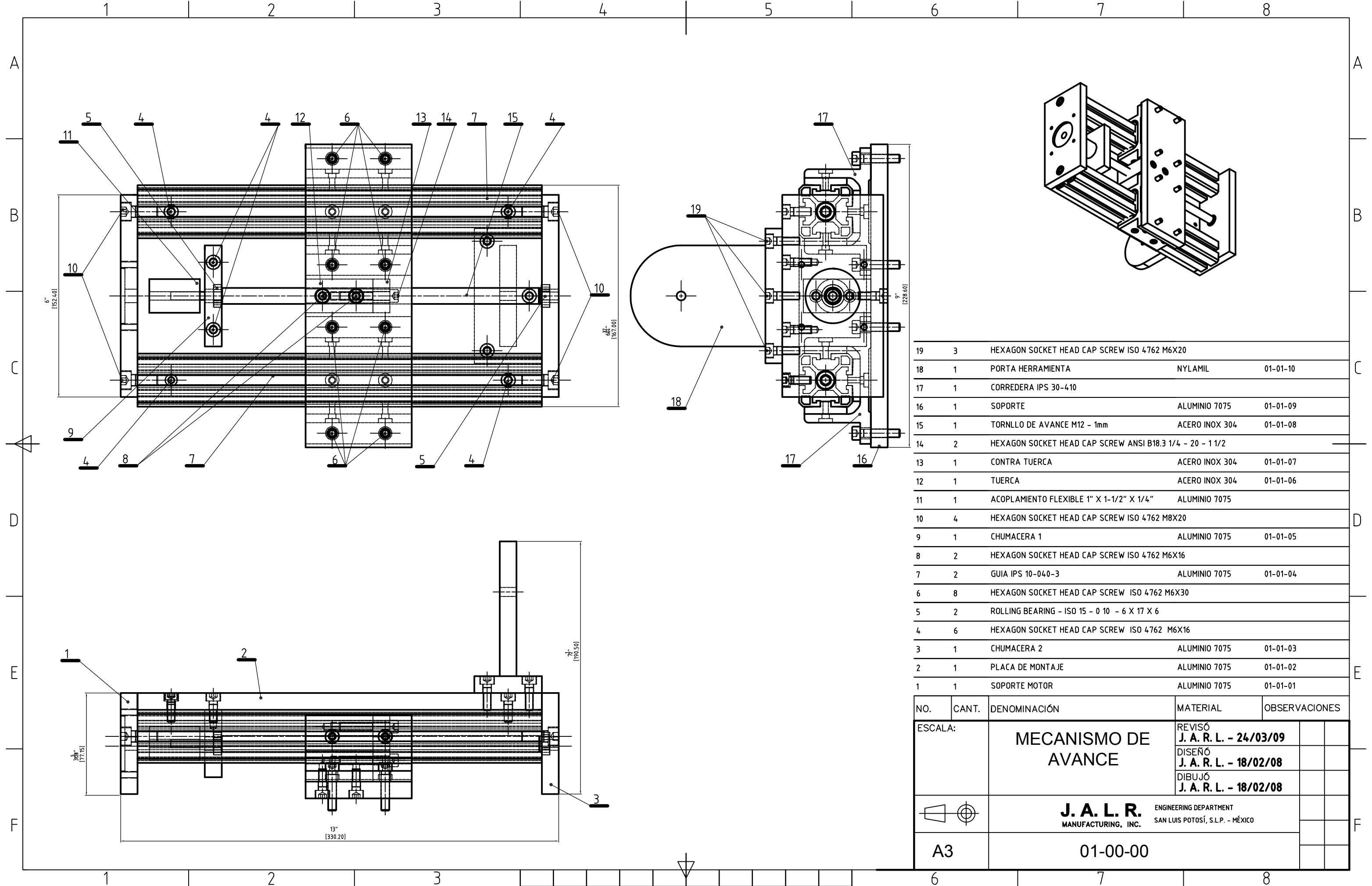
- [49] Pahl, G., Beitz, W., Engineering Design: A Sistematic Approach, Springer Verlag, 1996.
- [50] Yongfeng Guo, Zebin Ling, Xiaoyou Zhang, A novel PWM power amplifier of magnetic suspension spindle control system for micro EDM, Int J Adv Manuf Technol, 2016
- [51] Kapil Gupta, N. K. Jain, R. F. Laubscher, Spark erosion machining of miniature gears: a critical review, Int J Adv Manuf Technol, 2015
- [52] M. Munza , M. Ristob , R. Haasb, The phenomenon of polarity in EDM drilling process using water based dielectrics, ScienceDirect, 2016



# Apéndice A

## Diagramas Mecánicos





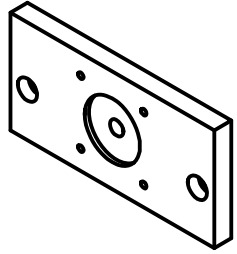
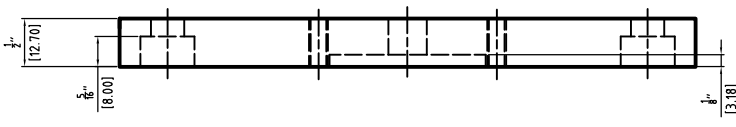
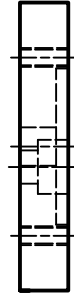
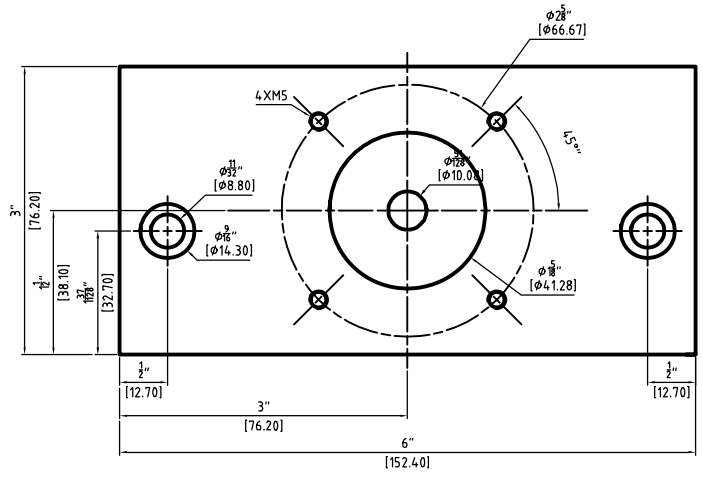
19	3	HEXAGON SOCKET HEAD CAP SCREW ISO 4762 M6X20		
18	1	PORTA HERRAMIENTA	NYLAMIL	01-01-10
17	1	CORREDERA IPS 30-410		
16	1	SOPORTE	ALUMINIO 7075	01-01-09
15	1	TORNILLO DE AVANCE M12 - 1mm	ACERO INOX 304	01-01-08
14	2	HEXAGON SOCKET HEAD CAP SCREW ANSI B18.3 1/4 - 20 - 1 1/2		
13	1	CONTRA TUERCA	ACERO INOX 304	01-01-07
12	1	TUERCA	ACERO INOX 304	01-01-06
11	1	ACOPLAMIENTO FLEXIBLE 1" X 1-1/2" X 1/4"	ALUMINIO 7075	
10	4	HEXAGON SOCKET HEAD CAP SCREW ISO 4762 M8X20		
9	1	CHUMACERA 1	ALUMINIO 7075	01-01-05
8	2	HEXAGON SOCKET HEAD CAP SCREW ISO 4762 M6X16		
7	2	GUIA IPS 10-040-3	ALUMINIO 7075	01-01-04
6	8	HEXAGON SOCKET HEAD CAP SCREW ISO 4762 M6X30		
5	2	ROLLING BEARING - ISO 15 - 0 10 - 6 X 17 X 6		
4	6	HEXAGON SOCKET HEAD CAP SCREW ISO 4762 M6X16		
3	1	CHUMACERA 2	ALUMINIO 7075	01-01-03
2	1	PLACA DE MONTAJE	ALUMINIO 7075	01-01-02
1	1	SOPORTE MOTOR	ALUMINIO 7075	01-01-01

NO.	CANT.	DENOMINACIÓN	MATERIAL	OBSERVACIONES
ESCALA:		<b>MECANISMO DE AVANCE</b>	REVISÓ	
			<b>J. A. R. L. - 24/03/09</b>	
			DISEÑO	
		<b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
		DIBUJÓ		
		<b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
		<b>J. A. L. R.</b> ENGINEERING DEPARTMENT MANUFACTURING, INC. SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. - MÉXICO		
<b>A3</b>		<b>01-00-00</b>		

1 2 3 4

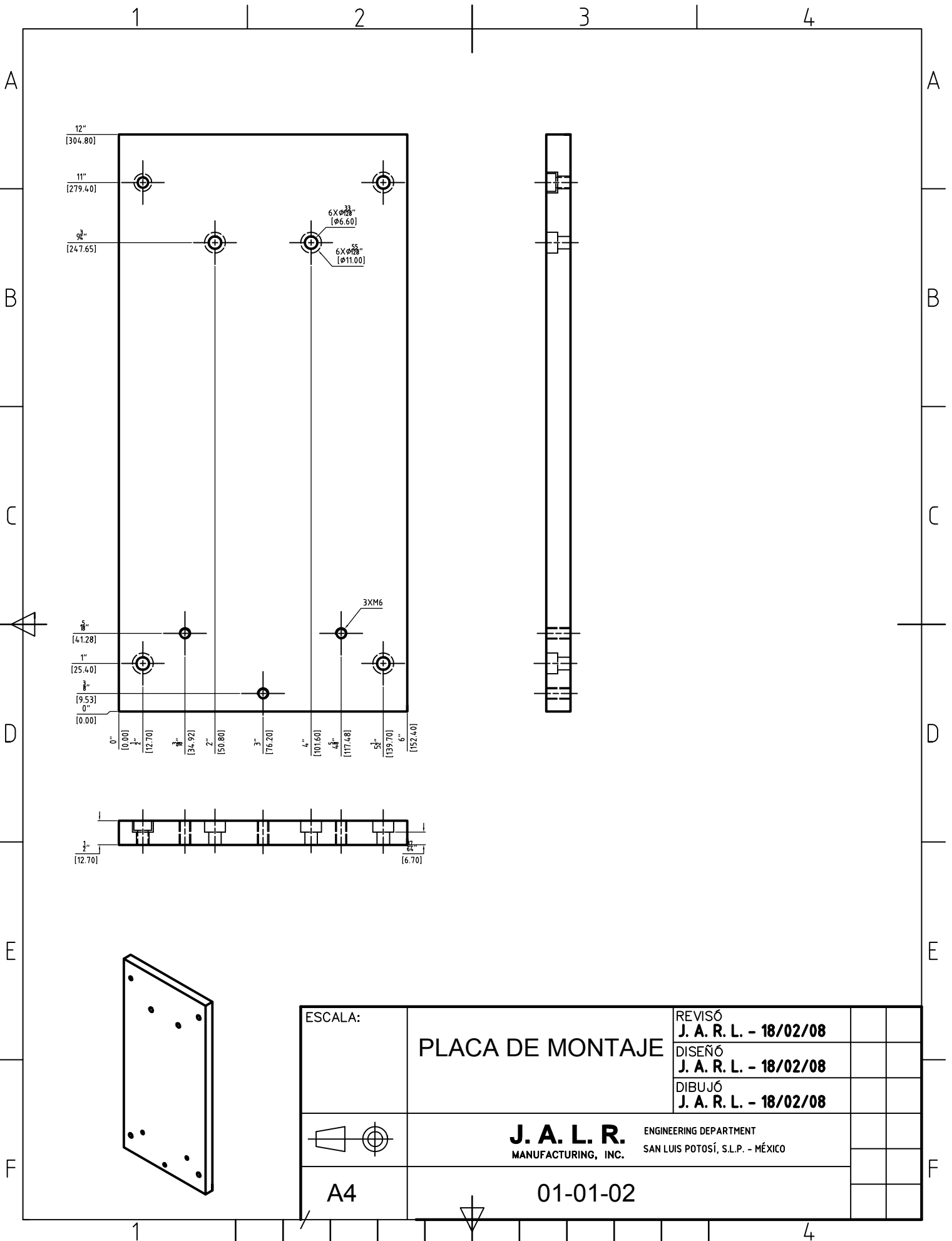
A  
B  
C  
D  
E  
F

A  
B  
C  
D  
E  
F



ESCALA:	<b>SOPORTE MOTOR</b>	REVISÓ <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
		DISEÑO <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
		DIBUJÓ <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
	<b>J. A. L. R.</b> MANUFACTURING, INC.	ENGINEERING DEPARTMENT SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. - MÉXICO		
<b>A4</b>	<b>01-01-01</b>			

1 4



ESCALA:	<b>PLACA DE MONTAJE</b>	REVISÓ <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
		DISEÑO <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
		DIBUJÓ <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
<b>A4</b>	<b>J. A. L. R.</b> ENGINEERING DEPARTMENT MANUFACTURING, INC. SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. - MÉXICO			
	<b>01-01-02</b>			

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

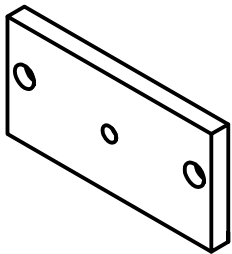
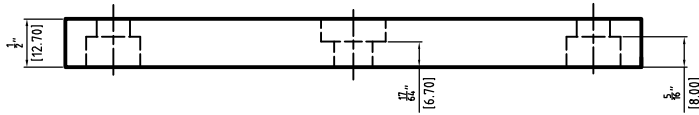
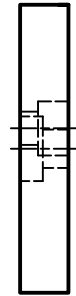
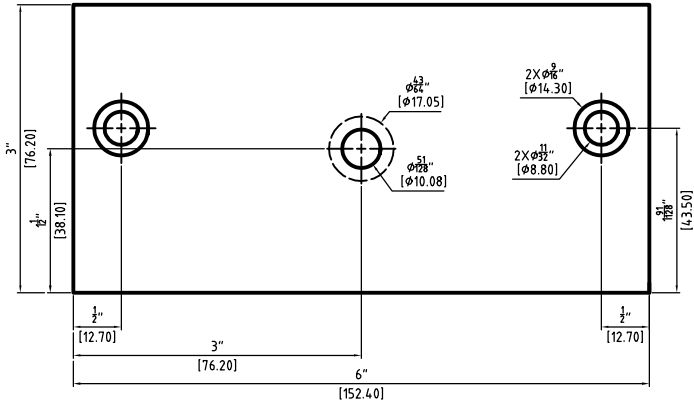
D

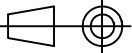
E

E

F

F



ESCALA:	<b>CHUMACERA 2</b>	REVISÓ <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
		DISEÑO <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
		DIBUJÓ <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
	<b>J. A. L. R.</b> ENGINEERING DEPARTMENT MANUFACTURING, INC.	ENGINEERING DEPARTMENT SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. - MÉXICO		
<b>A4</b>	<b>01-01-03</b>			

1

4



1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

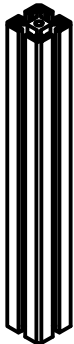
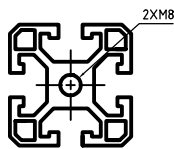
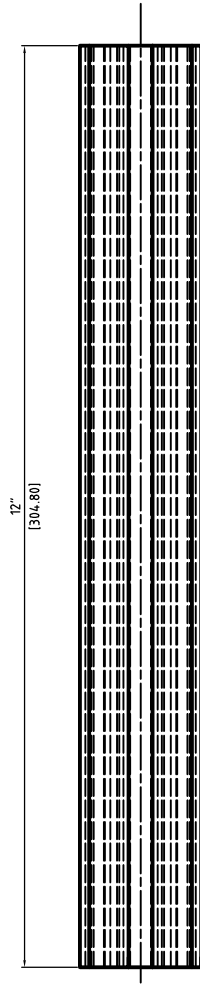
D

E

E

F

F



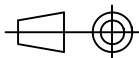
ESCALA:

GUIA

REVISÓ  
J. A. R. L. - 18/02/08

DISEÑO  
J. A. R. L. - 18/02/08

DIBUJÓ  
J. A. R. L. - 18/02/08



**J. A. L. R.**  
MANUFACTURING, INC.

ENGINEERING DEPARTMENT  
SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. - MÉXICO

A4

01-01-04

1

4

1 2 3 4

A

A

B

B

C

C

D

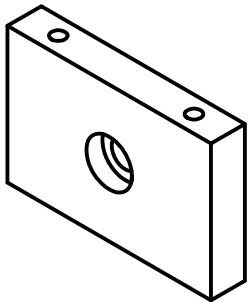
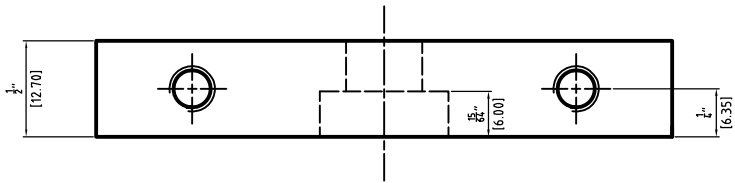
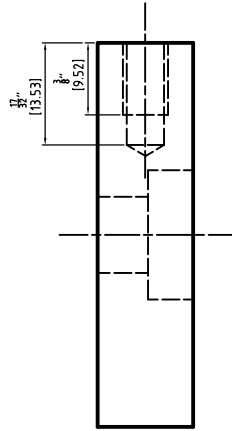
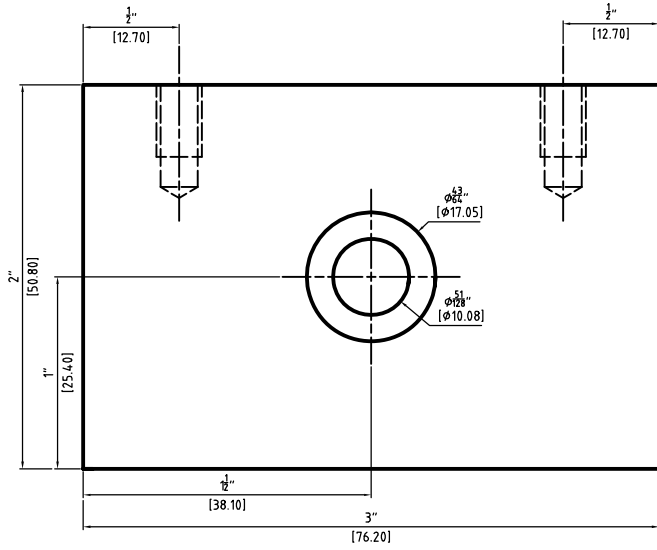
D

E

E

F

F



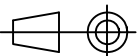
ESCALA:

# MECANISMO DE AVANCE

REVISÓ  
J. A. R. L. - 18/02/08

DISEÑO  
J. A. R. L. - 18/02/08

DIBUJÓ  
J. A. R. L. - 18/02/08



**J. A. L. R.**  
MANUFACTURING, INC.

ENGINEERING DEPARTMENT  
SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. - MÉXICO

A4

01-00-00

1

4

1 2 3 4

A

A

B

B

C

C

D

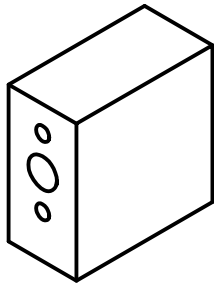
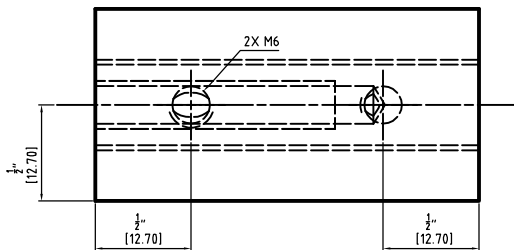
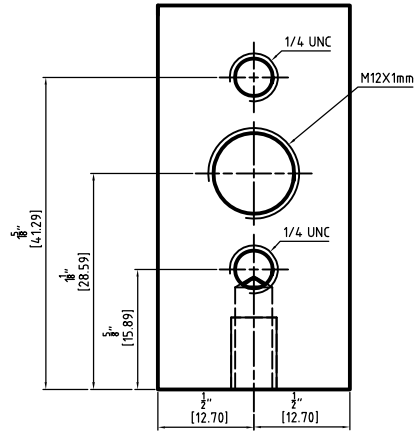
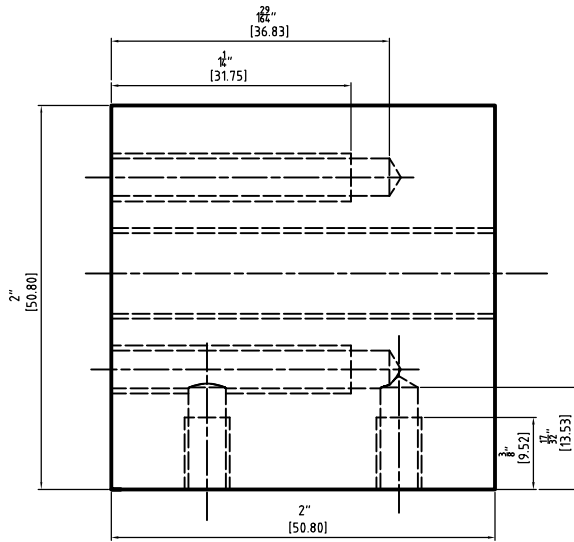
D

E

E

F

F



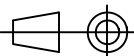
ESCALA:

TUERCA

REVISÓ  
J. A. R. L. - 18/02/08

DISEÑO  
J. A. R. L. - 18/02/08

DIBUJÓ  
J. A. R. L. - 18/02/08



**J. A. L. R.**  
MANUFACTURING, INC.

ENGINEERING DEPARTMENT  
SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. - MÉXICO

A3

01-01-06

1

4

1 2 3 4

A

A

B

B

C

C

D

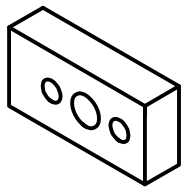
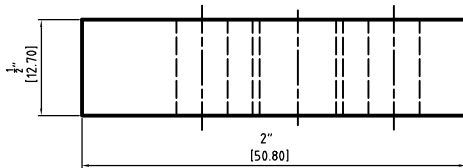
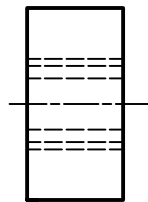
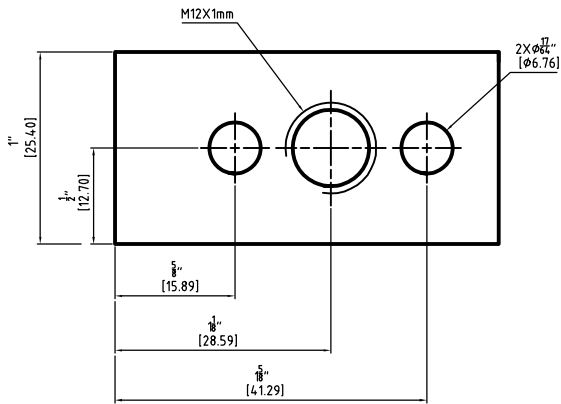
D

E

E

F

F



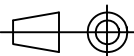
ESCALA:

CONTRA TUERCA

REVISÓ  
J. A. R. L. - 18/02/08

DISEÑO  
J. A. R. L. - 18/02/08

DIBUJÓ  
J. A. R. L. - 18/02/08



**J. A. L. R.**  
MANUFACTURING, INC.

ENGINEERING DEPARTMENT  
SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. - MÉXICO

A3

01-01-07

1

4

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

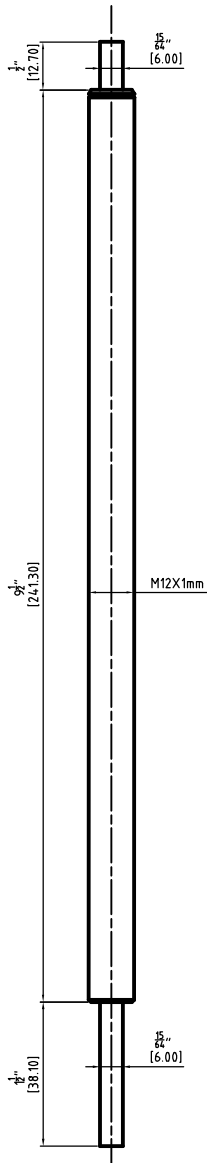
D

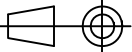
E

E

F

F



ESCALA:	<b>TORNILLO DE AVANCE</b>	REVISÓ <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
		DISEÑO <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
<b>A3</b>		DIBUJÓ <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
	<b>J. A. L. R.</b> MANUFACTURING, INC.	ENGINEERING DEPARTMENT SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. - MÉXICO		
	<b>01-01-08</b>			

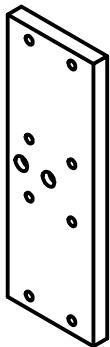
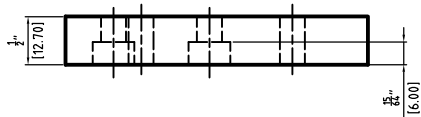
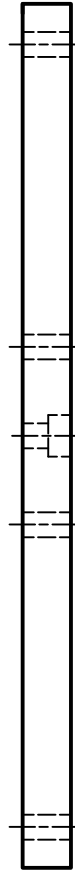
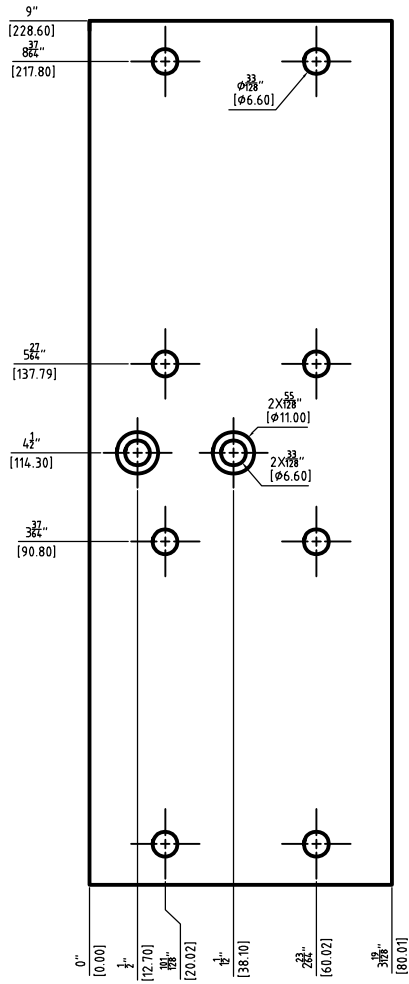
1

4

1 2 3 4

A  
B  
C  
D  
E  
F

A  
B  
C  
D  
E  
F



ESCALA:	<b>SOPORTE</b>	REVISÓ <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
		DISEÑO <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
		DIBUJÓ <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
<b>A3</b>	<b>J. A. L. R.</b> ENGINEERING DEPARTMENT MANUFACTURING, INC. SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. - MÉXICO			
	<b>01-01-09</b>			

1 4

1 2 3 4

A

A

B

B

C

C

D

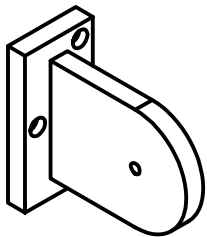
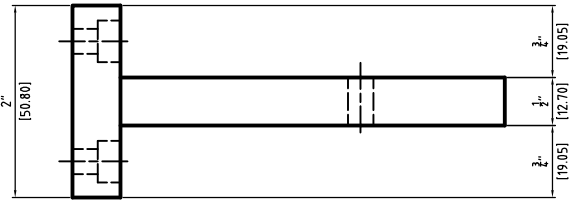
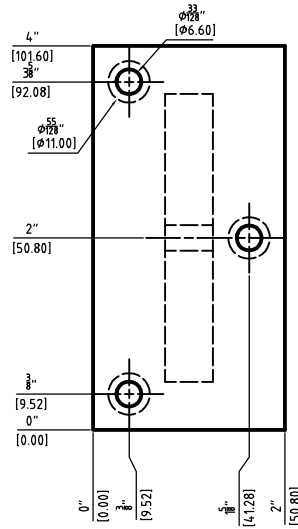
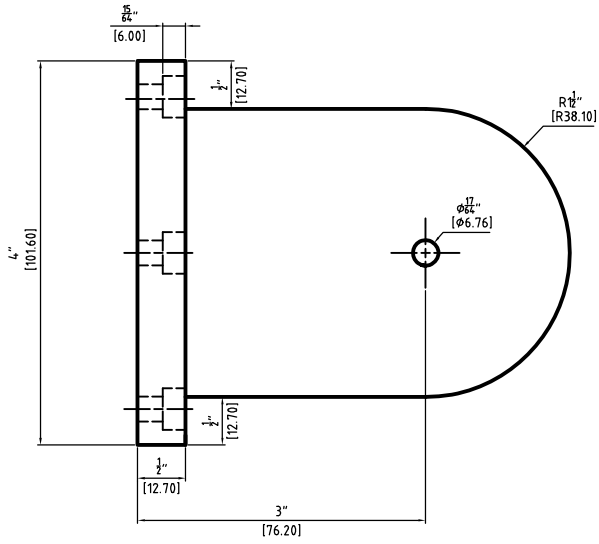
D

E

E

F

F



ESCALA:	<b>PORTA HERRAMIENTA</b>	REVISÓ <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
		DISEÑO <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
<b>A3</b>		DIBUJÓ <b>J. A. R. L. - 18/02/08</b>		
	<b>J. A. L. R.</b> ENGINEERING DEPARTMENT SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. - MÉXICO			
	<b>01-01-10</b>			

1

4