



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: REPOTENCIACIÓN DE LA MÁQUINA DE  
ELECTROEROSIÓN DE CORTE POR HILO NC WIRE CUT  
MACHINE J0780 DE LA EMPRESA SIMYM CIA. LTDA.**

**AUTORAS: CARTAGENA OROZCO, ANDREA LISSETTE  
QUIÑONEZ ANGULO, KARLA PAOLA**

**DIRECTOR: SEGURA SANGUCHO, LUIS JAVIER**

**SANGOLQUÍ – ECUADOR**

**2016**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**REPOTENCIACIÓN DE LA MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN DE CORTE POR HILO NC WIRE CUT MACHINE J0780 DE LA EMPRESA SIMYM CIA. LTDA.**”, realizado por las señoritas: **ANDREA LISSETTE CARTAGENA OROZCO** y **KARLA PAOLA QUIÑONEZ ANGULO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a las señoritas antes mencionadas par que lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 23 de agosto del 2016**

**Ing. Luis Javier Segura Sangucho**

**DIRECTOR**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

#### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotras, **ANDREA LISSETTE CARTAGENA OROZCO** con C.I.: 17232531-2 y **KARLA PAOLA QUIÑONEZ ANGULO** con C.I.: 070441838-3, declaramos que este trabajo de titulación “**REPOTENCIACIÓN DE LA MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN DE CORTE POR HILO NC WIRE CUT MACHINE J0780 DE LA EMPRESA SIMYM CIA. LTDA.**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Sangolquí, 23 de agosto del 2016.**

---

**ANDREA LISSETTE CARTAGENA  
OROZCO**

C.I.: 172325312-4

---

**KARLA PAOLA QUIÑONEZ ANGULO**

C.I.: 070441838-3



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

#### AUTORIZACIÓN

Nosotras, **ANDREA LISSETTE CARTAGENA OROZCO** y **KARLA PAOLA QUIÑONEZ ANGULO**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo de titulación **“REPOTENCIACIÓN DE LA MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN DE CORTE POR HILO NC WIRE CUT MACHINE J0780 DE LA EMPRESA SIMYM CIA. LTDA.”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 23 de agosto del 2016.

---

ANDREA LISSETTE CARTAGENA  
OROZCO

C.I.: 172325312-4

---

KARLA PAOLA QUIÑONEZ ANGULO

C.I.: 070441838-3

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres, quienes han sido mis mejores maestros y amigos, brindándome todo su amor y apoyo no solo en mi carrera universitaria, sino a lo largo de mi vida. Los amo mucho.

*Andrea Lissette Cartagena Orozco.*

Dedico este trabajo a mi familia, a mis raíces, de donde vengo, sin su apoyo incondicional, esto no sería posible, sepan que los amo mucho y estoy muy orgullosa de ustedes.

*Karla Paola Quiñonez Angulo*

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres Wilson y Janeth, por no dejarme caer en ningún momento, por abrazar con su vida mis sueños y por enseñarme que puedo llegar a ser tan excelente persona como lo son ellos.

A mis abuelitas queridas: Julia, Olguita y Rosita, y mi abuelito Rafael; sin su cariño y comprensión no podría haber logrado este importante logro. A mi hermana Naíta, por ser mi apoyo y confidente.

A mis amigos: Alejandra A., Alejandra D., Anahí C., Sandra P., Jenny N., Francisco R., Heinerth R. y David O., por ayudarme a sobresalir en tiempos difíciles.

Gracias a todos mis compañeros y profesores que me acompañaron en el día a día de mi carrera universitaria.

*Andrea Lissette Cartagena Orozco*

Agradezco a mis padres, Bella y Martires, quienes me han enseñado a luchar sin desmayar, por alcanzar mis objetivos.

A mis siete hermanos: Marcos, Paúl, Patricio, Carlos A., Carlos X, Byron y Leonardo, quienes me han brindado cariño y apoyo en todo momento.

A mis amigos, que me han acompañado a lo largo de esta ardua pero grata etapa.

A mis profesores, por impartir sus conocimientos.

En fin, agradezco a todas aquellas personas que quizás sin saberlo forman parte de este logro.

*Karla Paola Quiñonez Angulo.*

## ÍNDICE GENERAL

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>I</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>I</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>I</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE TABLAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XXII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 GENERALIDADES .....	1
1.2 ANTECEDENTES .....	1
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....	2
1.4 OBJETIVOS .....	3
1.4.1 Objetivo General.....	3
1.4.2 Objetivos Específicos .....	3
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>4</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
2.1 PROCESOS NO TRADICIONALES DE MAQUINADO .....	4
2.1.1 Clasificación .....	4
2.2 Repotenciación de equipos .....	4
2.3 MAQUINADO POR DESCARGA ELÉCTRICA (EDM) .....	5
2.3.1 Historia de la electroerosión .....	6
2.3.2 Tipos de mecanizado por electroerosión .....	8
2.3.3 Equipos de electroerosión de corte por hilo.....	9
2.3.4 Teoría termoeléctrica de la electroerosión .....	11
2.3.5 Electrodo para corte por electroerosión .....	14
2.3.6 Factores que repercuten en la electroerosión .....	15
2.3.7 Ejemplos de piezas cortadas por electroerosión de hilo .....	16
2.4 COMPONENTES MECÁNICOS .....	17



2.4.1	Tren de engranajes .....	17
2.4.2	Rodamientos .....	17
2.4.3	Válvulas de globo .....	18
2.5	COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS.....	18
2.5.1	Motor a pasos.....	18
2.5.2	Motor de corriente alterna (AC) .....	19
2.5.3	Bomba centrífuga.....	19
2.5.4	Contactores .....	20
2.5.5	Variador de frecuencia.....	20
2.5.6	Disyuntor .....	21
2.5.7	Driver motor a pasos.....	21
2.5.8	Control CNC .....	22
2.5.9	Fines de carrera.....	22
<b>CAPÍTULO 3.....</b>		<b>23</b>
<b>LEVANTAMIENTO DEL ESTADO TÉCNICO ACTUAL DE LA MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN DE CORTE POR HILO .....</b>		<b>23</b>
3.1	ANÁLISIS GENERAL DEL ESTADO DE LA MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN .....	23
3.1.1	Ficha técnica de datos y especificaciones de la máquina electroerosionadora.....	23
3.2	EVALUACIÓN DEL ESTADO TÉCNICO DE LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.....	32
3.3	DIAGNÓSTICO DEL ESTADO TÉCNICO GENERAL DE LA MÁQUINA .....	39
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>40</b>
<b>REDISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....</b>		<b>40</b>
4.1	DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO.....	40
4.1.1	Circulación y filtrado del fluido dieléctrico.....	41
4.1.2	Transmisión de movimiento en los ejes X e Y .....	52
4.1.3	Bobinado del hilo de molibdeno.....	74
4.2	DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO, ELECTRÓNICO Y DE CONTROL.....	83
4.2.1	Sistema de control.....	84
4.2.2	Sistema de potencia .....	91
4.2.3	Implementación de los sistemas de control y potencia.....	100

4.2.4 Circuito de la chispa .....	100
4.2.5 Panel de control principal .....	113
4.2.6 Implementación total de la máquina de electroerosión de corte por hilo.....	114
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>115</b>
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>	<b>115</b>
5.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....	115
5.1.1 Pruebas del Sistema de bobinado de Hilo de molibdeno.....	115
5.1.2 Pruebas del Sistema de Circulación y Filtrado de fluido dieléctrico.	117
5.1.3 Pruebas del Sistema de Transmisión de Movimiento en los ejes X e Y.....	119
5.1.7 Pruebas del Sistema de Circuito de la Chispa.....	120
5.1.8 Pruebas del Tablero de Control .....	125
5.1.9 Pruebas de Corte .....	127
5.1.10 Resultados.....	131
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>133</b>
<b>ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO .....</b>	<b>133</b>
6.1 ANÁLISIS FINANCIERO .....	133
6.2 ANÁLISIS ECONÓMICO .....	139
<b>CAPÍTULO 7.....</b>	<b>140</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>140</b>
7.1 CONCLUSIONES .....	140
7.2 RECOMENDACIONES.....	142
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>143</b>
<b>REFERENCIAS EXTERNAS .....</b>	<b>143</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>149</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los procesos no tradicionales de maquinado. ....	5
Figura 2. Esquema de electroerosión por hilo .....	6
Figura 3. Primera máquina ONA de electroerosión. ....	7
Figura 4. Circuito generador de relajación. ....	7
Figura 5. Circuito generador transistorizado. ....	8
Figura 6. Esquema de la electroerosión por penetración. ....	8
Figura 7. Esquema de la electroerosión por hilo. ....	9
Figura 8. Rectificado por electroerosión.....	9
Figura 9. Componentes de la máquina de corte por hilo. ....	10
Figura 10. Fases del desarrollo de las descargas eléctricas. ....	11
Figura 11. Terminología eléctrica.....	13
Figura 12. Características para la selección de electrodos.....	14
Figura 13. Condiciones operacionales de la máquina de electroerosión. ....	16
Figura 14. Piezas mecanizadas por el proceso Wire EDM.....	16
Figura 15. Tren de engranajes.....	17
Figura 16 Montaje de cojinetes.....	17
Figura 17 Válvula de globo. ....	18
Figura 18 Motor a pasos NEMA 34. ....	18
Figura 19 Motor LAFERT ½ HP.....	19
Figura 20 Bomba centrífuga Pedrollo ½ HP. ....	19
Figura 21 Contactor CHNT. ....	20
Figura 22 Variador de frecuencia ABB. ....	20
Figura 23 Disyuntor Kopp. ....	21
Figura 24 Driver 5A.....	21
Figura 25 Flame/Plasma CNC Cutting System. ....	22
Figura 26 Interruptor final de carrera con palanca. ....	22
Figura 27 Esquema de la máquina de electroerosión de corte por hilo. ....	24
Figura 28 Máquina electroerosionadora. ....	24

Figura 29 Armario de Control .....	24
Figura 30 Motor 100 VDC. ....	27
Figura 31 Bobinado de hilo. a) Rodete con hilo. b) Tornillo sinfín. c) Engranajes. ....	27
Figura 32 Mangueras de desfogue. ....	28
Figura 33 a) Acoples de mangueras a la máquina. b) Reductores. ....	28
Figura 34 a) Motor a pasos Eje X. b) Motor a pasos Eje Y. ....	29
Figura 35 Caja reductora de engranajes y tornillo sinfín. ....	29
Figura 36 Sistema de circuito de la chispa. ....	30
Figura 37 Tablero y circuitos de control. ....	31
Figura 38 Estado técnico .....	33
Figura 39 Estado técnico .....	34
Figura 40 Estado técnico .....	35
Figura 41 Estado técnico .....	36
Figura 42 Estado técnico .....	37
Figura 43 Estado técnico .....	38
Figura 44 Máquina de electroerosión NC WIRE CUT MACHINE J0780 .....	40
Figura 45 Agua destilada. ....	41
Figura 46 Curva altura manométrica/caudal. ....	42
Figura 47 Bomba Pedrollo PKm60. ....	43
Figura 48 Tanque, base y bomba hidráulica. ....	45
Figura 49 Filtro Kuboshi. ....	46
Figura 50 Ubicación de la tubería en el tanque. ....	47
Figura 51 Tubería de entrada de fluido dieléctrico a la bomba hidráulica. ....	48
Figura 52 Tubería de salida y desfogue al tanque de fluido dieléctrico. ....	49
Figura 53 Tubería de entrada de fluido dieléctrico al filtro. ....	49
Figura 54 Indicador de nivel de dieléctrico en el tanque. ....	50
Figura 55 Diseño CAD del sistema de circulación y filtrado de fluido dieléctrico. ....	51
Figura 56 Sistema construido de circulación y filtrado de fluido dieléctrico. ....	51
Figura 57 Espacio de trabajo. a) Mangueras de 6mm. b) Reguladores de caudal. ...	51
Figura 58 Sistema de aspersión o flushing de fluido dieléctrico. ....	52
Figura 59 Factores de Geometría de la AGMA. ....	57
Figura 60 Factor de ciclos de esfuerzo de resistencia a la flexión. ....	59

Figura 61 Factor de ciclos de esfuerzo de resistencia a la picadura .....	61
Figura 62 Torque en el eje a .....	64
Figura 63 Plano de la disposición X-Y del eje a .....	65
Figura 64 Diagrama de fuerzas cortantes plano X-Y. ....	65
Figura 65. Diagrama de momento flector plano X-Y.....	66
Figura 66. Plano de la disposición X-Z del eje a.....	66
Figura 67. Diagrama de fuerzas cortantes plano X-Z.....	67
Figura 68. Diagrama de momento flector plano X-Z. ....	67
Figura 69. Eje redondo con filete en el hombro en tensión .....	70
Figura 70. Eje redondo con filete en el hombro en torsión .....	71
Figura 71. Sensibilidad a la muesca en el caso de aceros y aleaciones de aluminio.....	71
Figura 72. Sensibilidad a la muesca de materiales sometidos a torsión inversa.....	72
Figura 73 Mecanismo de transmisión para el eje Y .....	74
Figura 74 Diseño CAD para el mecanismo de transmisión del eje Y .....	74
Figura 75 Mecanismo de transmisión para el eje X .....	74
Figura 76 Diseño CAD para el mecanismo de transmisión del eje X .....	74
Figura 77 Tabla de dimensiones del eje. ....	75
Figura 78 Motor LAFERT AM 71Z BA4 IEC60034.....	76
Figura 79 Acople matrimonio.....	76
Figura 80 Acople para motor LAFERT (matrimonio) .....	77
Figura 81 Diseño CAD del sistema de bobinado del hilo de molibdeno.....	77
Figura 82 Sistema construido de bobinado del hilo de molibdeno.....	77
Figura 83 Variador de frecuencia ABB. ....	78
Figura 84 Ingreso del hilo a las poleas. ....	79
Figura 85 Recorrido del hilo de polea a polea. ....	79
Figura 86 Tensión del hilo entre las poleas principales.....	79
Figura 87 Sistema de Bobinado de hilo de molibdeno. ....	80
Figura 88 Controlador numérico MICROSTEP SH-2200H.....	81
Figura 89 Diseño CAD del soporte para el controlador .....	82
Figura 90 Soporte del controlador acoplado en la máquina .....	82
Figura 91 Diagrama de bloques del sistema eléctrico, electrónico y de potencia. ..	83
Figura 92 Entradas y Salidas del controlador numérico.....	84

Figura 93 Entradas – Finales de carrera.....	85
Figura 94 Circuito de los pines de entrada al controlador numérico. ....	85
Figura 95 Circuito del paro de emergencia.....	86
Figura 96. Conector DB9.....	86
Figura 97 Salidas a relés. ....	87
Figura 98 Control de bobinado de hilo de molibdeno. ....	88
Figura 99 Circuito de control de Circulación y filtrado de fluido dieléctrico .....	89
Figura 100 Circuito de encendido del circuito de la chispa.....	90
Figura 101 Ventilador 110 VAC. ....	91
Figura 102 Circuito del contactor KM1.....	92
Figura 103 Circuito del contactor KM2.....	93
Figura 104 Fusibles circuito de bobinado de hilo.....	95
Figura 105 Fusibles circuito de circulación de dieléctrico. ....	95
Figura 106 Fusibles circuito de la chispa. ....	96
Figura 107 Disyuntor para 40 A. ....	97
Figura 108 Fuentes de alimentación y drivers para los motores a paso. ....	100
Figura 109 Parte delantera del Tablero de control.....	100
Figura 110 Parte de atrás del Tablero de control. ....	100
Figura 111 Alimentación del circuito de la chispa. ....	102
Figura 112 NTE 5324. ....	103
Figura 113 Etapa de rectificación y filtrado. ....	103
Figura 114 Circuito para la obtención de 5 Voltios.....	104
Figura 115 Circuito para la obtención de 12 Voltios.....	104
Figura 116 Frecuencia de corte.....	105
Figura 117 ATMEGA 328P.....	107
Figura 118 Circuito del Panel de control de PWM.....	108
Figura 119 Implementación del Panel de control de PWM.....	108
Figura 120 Pantalla de inicio del control de PWM.....	108
Figura 121 Pantalla de seteo de control de PWM.....	109
Figura 122 Pantalla de Disparo de control de PWM. ....	109
Figura 123 Disparo del MOSFET.....	109
Figura 124 IRFP460 .....	110

Figura 125 Circuito de potencia. ....	110
Figura 126 Polaridad del corte de trabajo. ....	111
Figura 127 Polaridad positiva. ....	111
Figura 128 Polaridad negativa. ....	112
Figura 129 Placas electrónicas del circuito de la chispa. ....	112
Figura 130 Ubicación y cableado de las placas electrónicas de la chispa. ....	112
Figura 131 Panel de control. ....	113
Figura 132 Máquina electroerosionadora repotenciada. ....	114
Figura 133 Movimiento del rodete de hilo y fines de carrera. ....	115
Figura 134 Trabajo de los fines de carrera. ....	115
Figura 135 Prueba de la bomba electrohidráulica y los reguladores de caudal. ....	117
Figura 136 Prueba de mangueras endurecidas y reguladores de caudal. ....	117
Figura 137 Prueba con mangueras flexibles. ....	118
Figura 138 Prueba del indicador de nivel. ....	118
Figura 139 Funcionamiento correcto del sistema flushing. ....	118
Figura 140 Tiempo en alto y bajo en el rango 1. ....	121
Figura 141 Tiempo en alto y bajo en el rango 2. ....	121
Figura 142 Tiempo en alto y bajo en el rango 3. ....	121
Figura 143 Tiempo en alto y bajo en el rango 4. ....	122
Figura 144 Tiempo en alto y bajo en el rango 5. ....	122
Figura 145 Disparo del TIP 41C. ....	123
Figura 146 Circuito de la chispa en vacío, sin carga. ....	123
Figura 147 Circuito de la chispa, con carga. ....	124
Figura 148 Factores de voltaje y corriente de corte. ....	127
Figura 149 Proceso de corte de placa de 2mm de espesor. ....	128
Figura 150 Proceso de corte de placa de 6mm de espesor. ....	128
Figura 151 Proceso de corte de placa de 2mm de espesor. ....	130
Figura 152 Proceso de corte de placa de 78 mm de espesor. ....	130
Figura 153 Pieza cortada N° 1. ....	132
Figura 154 Pieza cortada N° 2. ....	132
Figura 155 Pieza cortada N° 3. ....	132
Figura 156 Pieza cortada N° 4. ....	132

Figura 157 Pieza cortada N° 5.....	132
Figura 158 Pieza cortada N° 6.....	132



## ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Tipos de alambre para el corte por electroerosión.....	15
Tabla 2. Ficha técnica de datos generales de la máquina de electroerosión .....	24
Tabla 3. Ficha técnica de datos del Sistema de bobinado de hilo.....	26
Tabla 4. Ficha técnica de datos del Sistema de Circulación y fluido dieléctrico. ...	28
Tabla 5. Ficha técnica de datos del Sistema de transmisión de movimiento.....	29
Tabla 6. Ficha técnica de datos del Sistema de Circuito de la chispa.....	30
Tabla 7. Ficha técnica de datos del Tablero y circuitos de control.....	31
Tabla 8. Estado técnico de los elementos de la máquina.....	32
Tabla 9. Evaluación del estado general de la máquina elctroerosionadora.....	33
Tabla 10. Evaluación del Sistema de bobinado de hilo .....	34
Tabla 11. Evaluación del Sistema de circulación y fluido dieléctrico.....	35
Tabla 12. Evaluación del Sistema de transmisión de movimiento en el eje X e Y .	36
Tabla 13. Evaluación del Sistema de circuito de la chispa.....	37
Tabla 14. Evaluación del Tablero y circuitos de control .....	38
Tabla 15. Especificaciones técnicas del agua destilada.....	41
Tabla 16. Especificaciones técnicas de la bomba centrífuga.....	43
Tabla 17. Propiedades del acero estructural ASTM A36.....	44
Tabla 18. Espesores y aplicaciones del acero estructural ASTM A36.....	44
Tabla 19. Tubería de entrada de fluido dieléctrico a la bomba hidráulica .....	48

Tabla 20. Tubería de salida y desfogue al tanque de fluido dieléctrico.....	48
Tabla 21. Tubería de entrada de fluido dieléctrico al filtro .....	49
Tabla 22. Indicador de nivel de dieléctrico en el tanque.....	50
Tabla 23. Diseño del sistema de circulación y filtrado de fluido dieléctrico.....	51
Tabla 24. Especificaciones técnicas del motor 75BF006A .....	52
Tabla 25. Especificaciones técnicas del motor NEMA 34 .....	53
Tabla 26. Especificaciones técnicas del controlador DQ860MA .....	53
Tabla 27. Factor de forma de Lewis .....	56
Tabla 28. Constantes empíricas A, B y C.....	57
Tabla 29. Factores de sobrecarga $K_o$ .....	58
Tabla 30. Propiedades de varios aceros nitrurizados.....	58
Tabla 31. Factores de confiabilidad.....	60
Tabla 32. Coeficiente elástico $C_P (Z_E)$ .....	60
Tabla 33. Resumen de las especificaciones de los engranajes para el eje Y .....	62
Tabla 34. Resumen de las especificaciones de los engranajes para el eje X.....	63
Tabla 35. Propiedades de varios aceros laminados .....	63
Tabla 36. Parámetros del factor de modificación superficial de Marin.....	68
Tabla 37. Factores de confiabilidad $k_e$ .....	69
Tabla 38. Tabla resumen de las especificaciones de los ejes X e Y.....	96
Tabla 39. Transmisión de movimiento en el eje Y.....	74
Tabla 40. Transmisión de movimiento en el eje X.....	74

Tabla 41. Características Motor LAFERT.....	76
Tabla 42. Diseño de bobinado del hilo de molibdeno .....	77
Tabla 43. Variador de Frecuencia ABB y sus características.....	78
Tabla 44. Recorrido del hilo de molibdeno.....	79
Tabla 45. Diseño del sistema de circulación y filtrado de dieléctrico. ....	81
Tabla 46. Descripción de los fines de carrera.....	84
Tabla 47. Descripción del circuito.....	87
Tabla 48. Elementos de control de bobinado de hilo de molibdeno.....	88
Tabla 49. Elementos de control de Circulación y filtrado de fluido dieléctrico.....	89
Tabla 50. Elementos de encendido del circuito de la chispa.....	90
Tabla 51. Dimensionamiento del Contactor KM1.....	92
Tabla 52. Dimensionamiento del Contactor KM2.....	93
Tabla 53. Resumen de dimensionamiento de contactores.....	93
Tabla 54. Dimensionamiento de las fuentes.....	94
Tabla 55. Resumen de dimensionamiento de fuentes.....	94
Tabla 56. Dimensionamiento de los fusibles.....	95
Tabla 57. Resumen de dimensionamiento de fusibles.....	96
Tabla 58. Potencia eléctrica.....	97
Tabla 59. Dimensionamiento de cables.....	98
Tabla 60. Resumen de dimensionamiento de cableado de toda la máquina.....	98
Tabla 61. Implementación de los sistemas de control y potencia.....	100
Tabla 62. Rangos de trabajo del circuito de la chispa .....	101
Tabla 63. Transformador multietapas .....	102

Tabla 64. Puente rectificador.....	103
Tabla 65. Etapas rectificadas.....	103
Tabla 66. Características de las frecuencias en WEDM.....	106
Tabla 67. Rango de frecuencias de trabajo.....	106
Tabla 68. Ciclo de trabajo.....	107
Tabla 69. Panel de control de PWM.....	108
Tabla 70. Funciones de las pantallas de servicio de control de PWM .....	108
Tabla 71. MOSFET IRFP 460.....	110
Tabla 72. Explicación del circuito de potencia.....	111
Tabla 73. Polaridad del corte de trabajo.....	111
Tabla 74. Explicación del Panel de control principal.....	113
Tabla 75. Pruebas del sistema de bobinado de hilo con función rampa (1).....	116
Tabla 76. Pruebas del sistema de bobinado de hilo con función rampa (2) .....	116
Tabla 77. Pruebas de funcionamiento del Sistema de Circulación de dieléctrico ...	117
Tabla 78. Primeras Pruebas Eje X .....	119
Tabla 79. Primeras Pruebas Eje Y .....	120
Tabla 80. Pruebas de Disparo de PWM.....	121
Tabla 81. Rangos de trabajo sin carga .....	124
Tabla 82. Rangos de trabajo con carga.....	125
Tabla 83. Pruebas del encendido de los sistemas de la electroerosionadora.....	125
Tabla 84. Pruebas del encendido de los selectores de voltaje para la chispa.....	126
Tabla 85. Pruebas del encendido de los selectores de Voltaje para la chispa.....	126
Tabla 86. Proceso de corte por descarga eléctrica – Visualización de la chispa....	128
Tabla 87. Primeras pruebas de corte por descarga eléctrica .....	129
Tabla 88. Tabla resumen para el proceso de corte de la Máquina.....	131

Tabla 89. Materiales y accesorios mecánicos.....	133
Tabla 90. Materiales y accesorios eléctricos/electrónicos.....	134
Tabla 91. Mano de obra .....	136
Tabla 92. Costos directos totales .....	136
Tabla 93. Materiales .....	137
Tabla 94. Costos operativos .....	137
Tabla 95. Costos indirectos totales .....	137
Tabla 96. Costos de Fabricación y Ensamblaje .....	138
Tabla 97. Costos totales .....	138
Tabla 98. Flujo de caja proyectada a 5 años .....	139

## **RESUMEN**

El presente proyecto describe la repotenciación de una máquina de electroerosión de corte por hilo para SIMYM CIA. LTDA. El desarrollo de este trabajo permitirá aumentar los servicios que ofrece la empresa e incrementar las ganancias de la misma, fabricando piezas con formas complejas y que requieren de una alta precisión en materiales eléctricamente conductores. Para llevar a cabo esta repotenciación se realizó una evaluación general y detallada del estado en el que se encontraba la máquina, con ella se detectaron problemas tanto en la parte mecánica como en la parte eléctrica, electrónica y de control. Fueron rediseñados el sistema de circulación y filtrado del fluido dieléctrico, el sistema de transmisión de movimiento para los ejes X e Y, el sistema de bobinado del hilo, además del circuito generador de las descargas eléctricas y con ello el circuito eléctrico, electrónico y de control con sus respectivas protecciones eléctricas para cortocircuitos y sobrecargas, necesarios para manejar los diferentes motores utilizados y la bomba centrífuga. Un controlador CNC es el encargado de accionar los motores a pasos que mueven los ejes X e Y según la trayectoria deseada, además seleccionando el modo automático se puede encender o apagar el motor AC empleado para el bobinado del hilo, la bomba hidráulica empleada para la circulación del fluido dieléctrico y el circuito de la chispa que es el que genera las descargas eléctricas. Durante las pruebas funcionales realizadas a la máquina electroerosionadora se obtuvieron resultados satisfactorios.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **ELECTROEROSIÓN**
- **DIeléCTRICO**
- **CNC**
- **MATRICES.**

## **ABSTRACT**

This project describes the upgrading of a wire EDM machine to SIMYM CIA. LTDA. The development of this work will increase the services offered by this company and profits, producing parts with complex shapes and requiring high accuracy, in electrically conductive materials. To carry out this upgrading a comprehensive and detailed assessment of the machine was performed, as a result problems were detected in the mechanical, electrical, electronic and control part too. These were redesigned circulation and filtering system of the dielectric fluid, motion transmission system for the X and Y axes, wire winding system, besides electrical discharge generator circuit and thus the electrical, electronic and control circuit with their electrical protections for short circuits and overloads needed to handle different motors used and the centrifugal pump. A CNC controller is responsible for operating the stepper motors that move the X and Y axes according to the desired path, also selecting the automatic mode can be turned on or off the AC motor used for winding the wire, the hydraulic pump used for dielectric fluid circulation, and the spark circuit that is generated by electrical discharges. During the functional tests on the EDM machine satisfactory results were obtained.

### **KEYWORDS:**

- **ELECTROEROSION**
- **DIELECTRIC**
- **CNC**
- **CASTS**

# **CAPÍTULO 1.**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 GENERALIDADES**

El tener una economía globalizada exige mercados altamente competitivos. Actualmente las empresas enfrentan cambios en el sector industrial con el propósito de ingresar en el mejoramiento continuo, para ello se necesita la participación de personas con las capacidades y aptitudes necesarias para llevar la empresa al éxito.

El hecho de repotenciar implica producir un bien real con características superiores a las que el equipo o sistema poseía anteriormente, el punto clave es identificar qué tipo de repotenciación realizar, dónde y cómo llevarla a cabo.

Asegurar la capacidad productiva de cualquier equipo en un mercado que cada vez se vuelve más exigente, es uno de los campos en los que Ingenieros Mecatrónicos ponen en práctica conocimientos adquiridos en las aulas.

### **1.2 ANTECEDENTES**

SIMYM CIA. LTDA., es una empresa dedicada a prestar servicios para el sector industrial y de la construcción, se encuentra ubicada en Tumbaco, ciudad de Quito.

Actualmente, presta además de otros servicios el de corte por plasma CNC y oxicorte CNC. Con el fin de seguir innovando y satisfaciendo las necesidades de sus clientes adquirieron una máquina de electroerosión de corte por hilo marca NC WIRE CUT MACHINE J0780 fabricada en la República Popular de China.

Esta máquina fue utilizada anteriormente en otra empresa en el proceso de fabricación de piezas de electrodomésticos. La decisión de venderla fue motivada por la obsolescencia de los controles empleadas para su puesta en marcha.



Lo que busca la empresa SIMYM CIA. LTDA., es repotenciar esta máquina para luego incorporarla en la lista de los múltiples servicios que ofrece. Debido a los elevados costos en que se incurriría al adquirir una totalmente nueva y moderna.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Según lo que plantea El Plan Nacional del Buen Vivir (Senplades, 2013) resulta indispensable revalorizar la educación superior técnica y tecnológica, para formar profesionales que aporten al cambio en un contexto social, político y económico. Es por esta razón que la aplicación de este plan de desarrollo constituye el motor que genera la transformación en el país.

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se ubica como una de las gestoras de la revolución del conocimiento. Esta institución propone la innovación, la ciencia y tecnología, como fundamentos para el cambio de la matriz productiva, acorde al Plan Nacional del Buen Vivir.

Ingeniería Mecatrónica como carrera élite de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, se basa en la creación, aplicación y difusión de alternativas de solución a los problemas productivos del país. Con esto se logra emprender procesos eficientes para alcanzar cambios en la estructura competitiva de la industria ecuatoriana.

La competitividad es un factor decisivo en cualquier tipo de empresa y más aún el poder contar con tecnología moderna para ofrecer servicios o productos de calidad.

En el caso de SIMYM CIA. LTDA., una empresa que ofrece servicios industriales, es importante contar con variada maquinaria para mecanizar piezas y prestar servicios más óptimos.

Por ejemplo, para poder mecanizar piezas en materiales metálicos con durezas mayores a 400 HB o con formas de alto grado de complejidad y obviamente tolerancias y acabados especiales, se emplean métodos no convencionales como el de electroerosión de corte por hilo. Por tal razón, la repotenciación de esta máquina, es de vital importancia para la empresa. Los equipos con los que trabajan actualmente dificultan alcanzar tales parámetros de especificación y detalle.

Poner en funcionamiento esta máquina, ayuda en el incremento de la productividad, pues reduce el número de operaciones necesarias en la fabricación de las diferentes piezas o matrices. Además, es posible evitar el rechazo de productos y se adquiere la capacidad de repetir procesos continuos para la obtención de piezas por lotes.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General**

Repotenciar la máquina de electroerosión de corte por hilo *NC WIRE CUT MACHINE J0780* en la empresa SIMYM CIA. LTDA.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Implementar actuadores tanto para el control del movimiento de ejes como para el control de la chispa.
- Implementar un control de filtrado, paso y recirculación del dieléctrico (agua desionizada).
- Integrar los sistemas mecánico, electrónico y de control en un solo sistema general.
- Validar el correcto funcionamiento de la máquina, mecanizando piezas con parámetros específicos.

## **CAPÍTULO 2.**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 PROCESOS NO TRADICIONALES DE MAQUINADO**

Generalmente la palabra maquinado se asocia a la eliminación de material empleando herramientas con mayor dureza que la pieza de trabajo. Debido a los avances en cuanto al mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de materiales se refiere, es casi imposible maquinaslos con procesos tradicionales.

Por ello surgen procesos para la remoción de material por fusión, evaporación, acción química o eléctrica que colectivamente se las denomina procesos no convencionales o tradicionales de maquinado. Se caracterizan por la insensibilidad a la dureza del material de la pieza de trabajo. Además con estos procesos se logran obtener piezas con formas de alto grado de complejidad, tolerancias y calidad superficial.

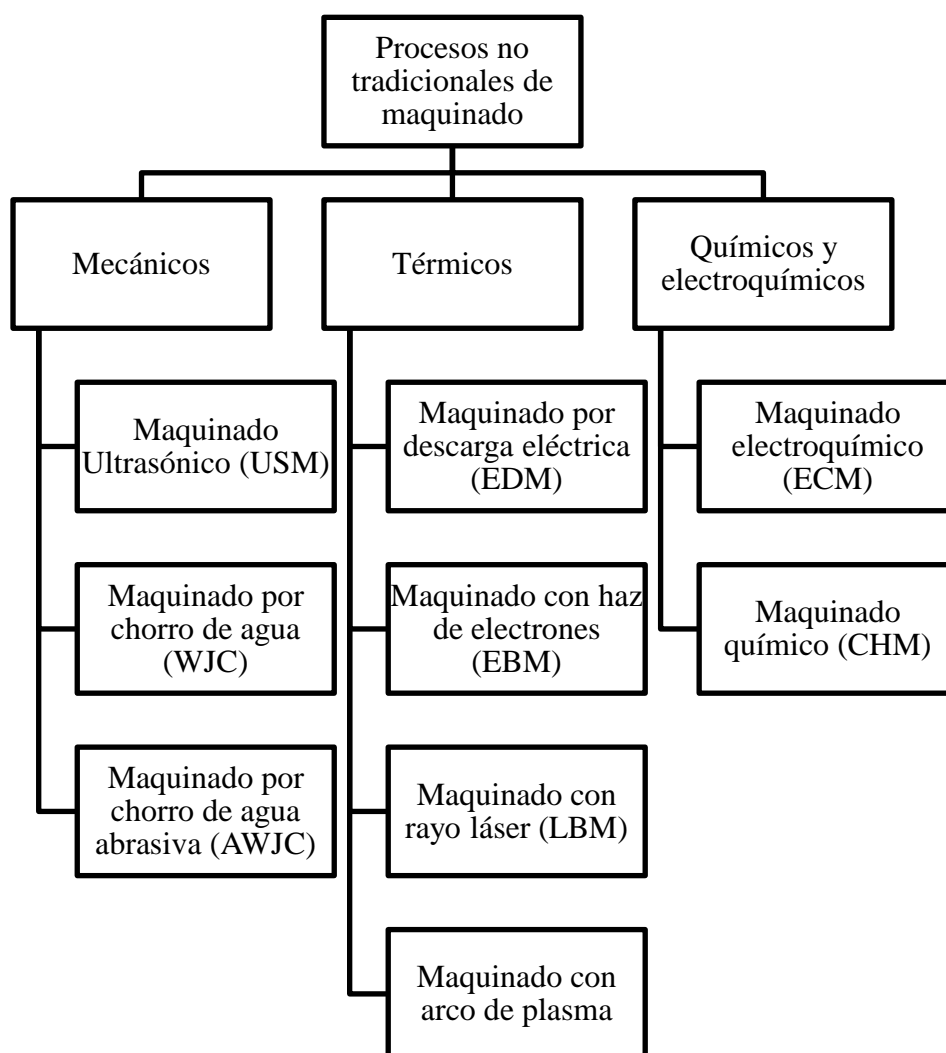
##### **2.1.1 Clasificación**

Los procesos no tradicionales se clasifican de acuerdo con el modo de acción (ver Figura 1).

#### **2.2 REPOTENCIACIÓN DE EQUIPOS**

Repotenciación es un proceso de mantenimiento cuyo propósito es mejorar y actualizar el funcionamiento de un determinado equipo o sistema, que por el transcurso del tiempo ha ido quedando en la obsolescencia o ha caído en la falta de eficiencia.

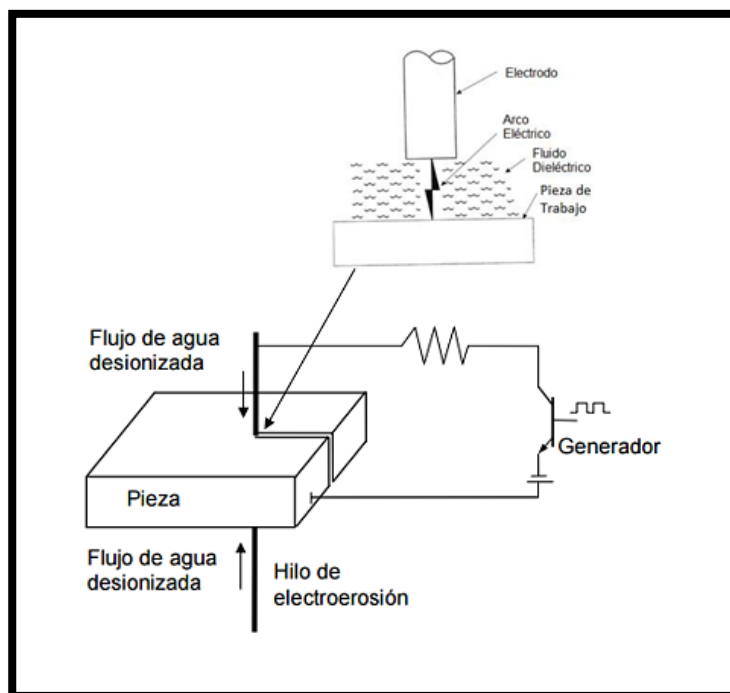
Repotenciar equipos implica una actualización global, un rediseño, o una reestructuración del sistema o equipo. Los resultados que se esperan con la repotenciación deben ser similares o superiores respecto al estado inicial del equipo. Para ello se emplean recursos tecnológicos y metodologías actuales.



**Figura 1. Clasificación de los procesos no tradicionales de maquinado.**

### **2.3 MAQUINADO POR DESCARGA ELÉCTRICA (EDM)**

Este tipo de mecanizado, es un proceso termoeléctrico que se realiza en materiales eléctricamente conductores independientemente de su dureza, mediante el uso de chispas controladas con precisión, mismas que se producen entre un electrodo que es la herramienta de corte y una pieza de trabajo en presencia de un fluido dieléctrico (ver Figura 2).



**Figura 2. Esquema de electroerosión por hilo**

Fuente: (Universidad Técnica de Navarra, 2015)

### 2.3.1 Historia de la electroerosión

La electroerosión existe desde el comienzo de la electricidad, el simple hecho del desgaste producido por la chispa eléctrica al saltar entre dos contactos al momento de su separación lo demuestra.

Este efecto fue estudiado por muchos científicos con el fin de evitarlo. Después cambiaron de enfoque y lo emplearon para crear un nuevo método de mecanizado totalmente distinto a los que existían en aquella época.

Esta tecnología fue desarrollada como tal, durante la Segunda Guerra Mundial. Fueron los científicos soviéticos B.R y N. I. Lazarenko, los principales investigadores en este campo y a ellos se les atribuye la invención de la primera máquina electroerosionadora en el año de 1944.

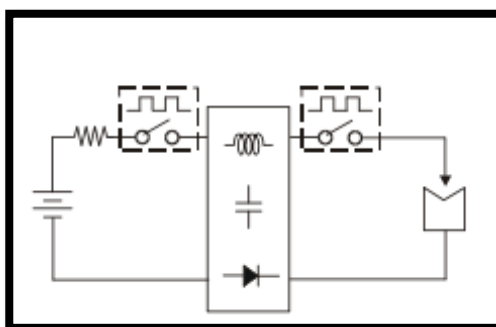
Las primeras máquinas de electroerosión fueron máquinas-herramientas convencionales adaptadas para este mecanizado. Recién a mediados de la década de los 50 salieron a la venta máquinas de electroerosión como tal (ver Figura 3).



**Figura 3. Primera máquina ONA de electroerosión.**

Fuente: (Etitudela, 2014)

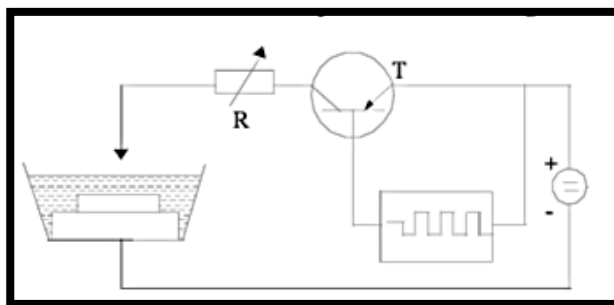
Los primeros generadores para la chispa, también llamados circuito de Lazarenko o de relajación (ver Figura 4) eran poco eficientes. Se producía un gran desgaste en los electrodos, “del orden del 100% en volumen” (Universidad Técnica de Navarra, 2015) desventaja que no detuvo la inclusión de máquinas electroerosionadoras en el sector industrial.



**Figura 4. Circuito generador de relajación.**

Fuente: (Azcondo, Casanueva, Leone, & Schulze, 2007)

Gracias a los avances en el campo de la electrónica, los generadores de relajación fueron reemplazados por circuitos transistorizados (ver Figura 5). Con estos el desgaste se redujo notablemente “a niveles del 0.5% en volumen” (Universidad Técnica de Navarra, 2015) y la aplicación de la electroerosión se amplió.



**Figura 5. Circuito generador transistorizado.**

Fuente: (Albert Camprubí Graell, 2007)

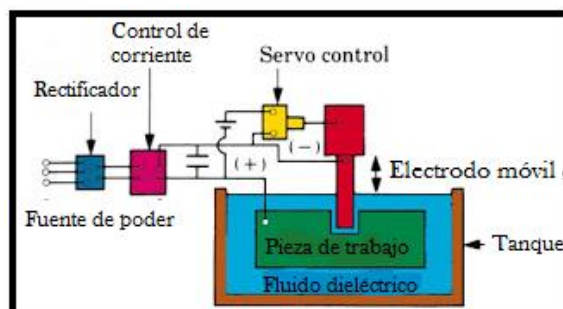
En 1969 se lanzaron al mercado máquinas de electroerosión por hilo o Wire EDM. En un principio el proceso de mecanizado por Wire EDM era lento, su velocidad fue en aumento con los avances tecnológicos en la electrónica, específicamente con el empleo de controles numéricos.

### 2.3.2 Tipos de mecanizado por electroerosión (Universidad Técnica de Navarra, 2015)

Según la forma y movimiento relativo del electrodo tenemos los siguientes tipos de mecanizado por electroerosión:

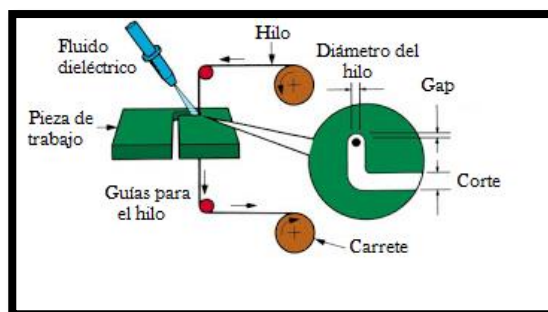
**Electroerosión por penetración:** Basado en el avance continuo y servo-controlado de un electrodo-herramienta que penetra en el electrodo-pieza en presencia de un líquido dieléctrico (ver Figura 6).

**Corte por electroerosión por hilo** (ver Figura 7): A diferencia de la electroerosión por penetración, la forma del electrodo no influye directamente en la forma de la pieza a obtener. Las geometrías producidas son pasantes.



**Figura 6. Esquema de la electroerosión por penetración.**

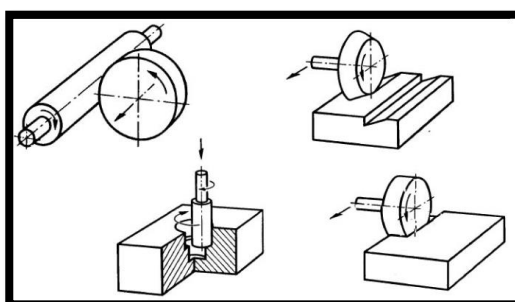
Fuente: (Mechanical Engineering, 2016)



**Figura 7. Esquema de la electroerosión por hilo.**

Fuente: (Mechanical Engineering, 2016)

**Rectificado por electroerosión:** Al igual que en el rectificado convencional se da un movimiento de rotación del electrodo, pero el arranque de material se realiza mediante descargas eléctricas, sin contacto directa entre electrodo y pieza (ver Figura 8).



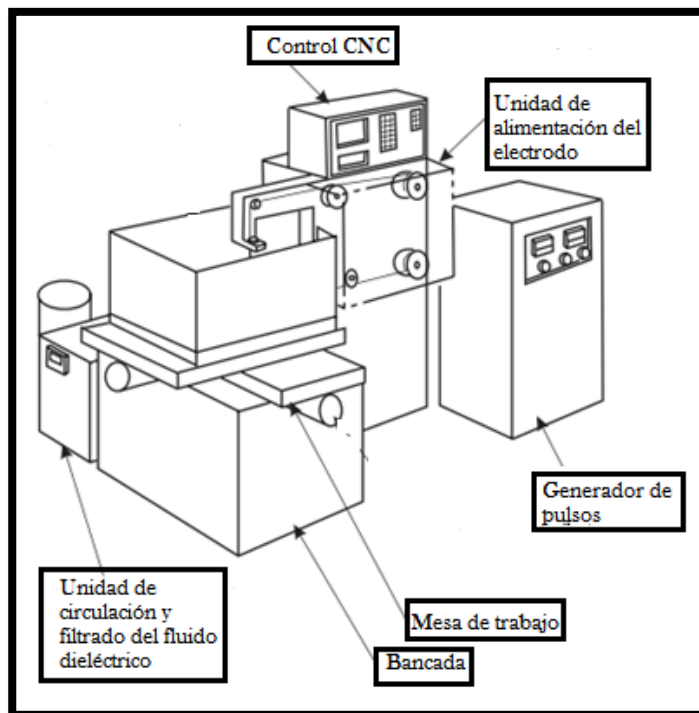
**Figura 8. Rectificado por electroerosión.**

Fuente: (Universidad Técnica de Navarra, 2015)

### 2.3.3 Equipos de electroerosión de corte por hilo

Los equipos de electroerosión de corte por hilo constan de los siguientes componentes básicos (ver Figura 9):





**Figura 9. Componentes de la máquina de corte por hilo.**

Fuente: (Jameson, 2001)

**Bancada o armazón**, es el esqueleto de la máquina y constituye la base de sujeción a todos los elementos y dispositivos necesarios para el proceso electroerosivo.

**Mesa de trabajo**, es aquí donde se fija la pieza a mecanizar.

**Unidad CNC**, permiten la realización de una variada gama de funciones, mismas que en conjunto suponen un elevado grado de automatización.

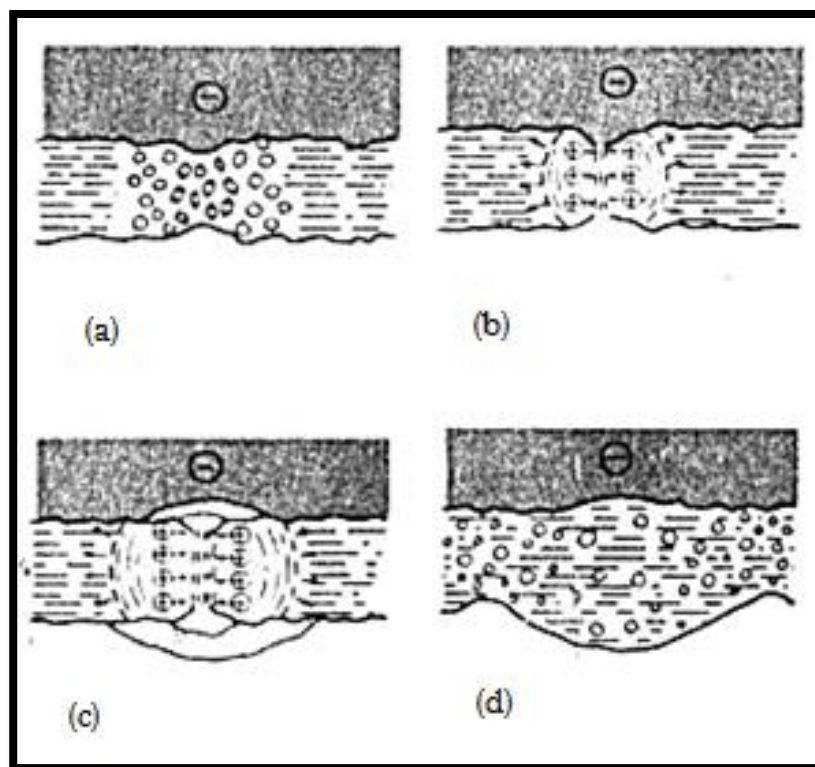
**Unidad de circulación y filtrado del fluido dieléctrico**, esta unidad se encarga de proporcionar el fluido dieléctrico necesario para el proceso de electroerosión además de extraer los residuos del material arrancado durante el mecanizado.

**Generador**, es uno de los elementos principales de la máquina ya que proporciona los impulsos erosivos.

### 2.3.4 Teoría termoelectrónica de la electroerosión

Las descargas eléctricas producidas entre el electrodo y la pieza de trabajo ocurren en cuatro fases (ver Figura 10), primero la etapa de creación (ver Figura 10(a)), en donde la carga inducida en los dos electrodos por la fuente de poder, genera un fuerte campo eléctrico. Es aquí cuando los iones positivos y electrones libres, mezclados con gas formado por la descomposición química del líquido dieléctrico dan como resultado el canal de plasma.

En la etapa de ignición la intensidad de corriente es muy alta, genera un campo magnético en el canal atrayendo los iones hacia el eje del canal de descarga (ver Figura 10(b)). Durante la etapa de descarga los iones atraídos comprimen el canal de corriente e incrementan la temperatura hasta llegar a decenas de miles de grados Celsius, funde una porción del metal de la pieza de trabajo y la vaporiza (ver Figura 10(c)). Finalmente en la etapa de ruptura el vapor provee algo de la fuerza que expelle el metal fundido de la pieza de trabajo y ayuda además a que se colapse el canal ionizado. El impacto mecánico de la descarga en sí, contribuye a su expulsión (ver Figura 10(d)).



**Figura 10. Fases del desarrollo de las descargas eléctricas.**

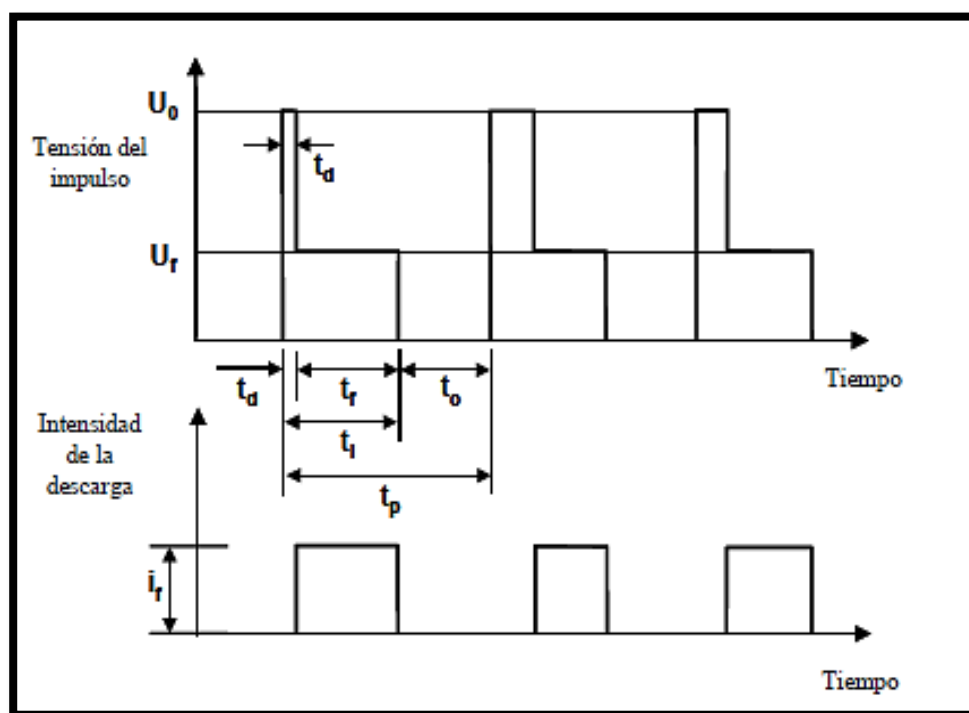
Fuente: (Del Castillo, 2007)

### *Condiciones necesarias para el proceso de electroerosión*

- Una de las condiciones imprescindibles para que se produzca erosión mediante descargas y obtener una pieza con los parámetros deseados, es el que exista una distancia apropiada entre el hilo de electroerosión y el material a mecanizar, llamado gap que es donde se produce la descarga.
- Si la separación entre electrodo y pieza llega a ser nula, se produce un cortocircuito entre ambos, con lo cual pasará evidentemente la corriente pero no habrá descarga.
- El elemento encargado de mantener la distancia dentro del margen apropiado de funcionamiento es el mecanismo de control de avance del electrodo. Este constituye uno de los órganos básicos y más importantes en una máquina de electroerosión ya que de él depende casi exclusivamente la estabilidad del proceso y por ende el buen rendimiento de la máquina.
- Para darse una idea de la precisión de dicho mecanismo se dice que la distancia frontal entre electrodo y pieza puede llegar a estar comprendida entre 2 a 10 micras, según régimen de trabajo. Esta distancia debe mantenerse constante, a medida que el arranque de material progresa (Albert Camprubí Graell, 2007).
- La electroerosión por hilo es más parecida a un proceso de corte, con sierra: la velocidad de arranque del material es área de la superficie cortada por unidad de tiempo.
- Cuando se utilizan máquinas de electroerosión, las tolerancias dimensionales están en el rango de las micras.
- La electroerosión por hilo se utiliza frecuentemente para el pulido o acabado final de aparatos de medida de tolerancias dimensionales. Es un

proceso que industrialmente se denomina de superacabado. En estas condiciones, lógicamente, las máquinas deben trabajar en condiciones muy ajustadas de temperatura y humedad (Espinosa, 2002).

- La máquina va generando pulsos eléctricos para realizar la electroerosión (ver Figura 11):



**Figura 11. Terminología eléctrica.**

Fuente: (Universidad Técnica de Navarra, 2015)

Donde:

- Tensión en vacío ( $U_0$ ).
- Intensidad media de corriente ( $I_{fm}$ )
- Intensidad de impulso ( $I_f$ )
- Tiempo de descarga ( $t_r$ )
- Tiempo de impulso ( $t_i$ )
- Tiempo de pausa ( $t_o$ ):  $t_p = t_i + t_o$ .
- Tiempo de retraso de descarga o de ionización ( $t_d$ ):  $t_i = t_d + t_r$

### 2.3.5 Electrodo para corte por electroerosión

Para la selección de alambres o hilos empleados en las máquinas electroerosionadoras de corte por hilo, se deben considerar las siguientes características (ver Figura 12):

<p><b>Buena conductividad térmica</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con ello el calor provocado por las descargas puntuales se difunde con rapidez por el resto del electrodo.</li> <li>• Se mide en términos de porcentaje de IASC, una comparación con la conductividad del cobre puro que se toma como el 100%.</li> </ul>
<p><b>Resistencia a la tracción</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indica la capacidad del alambre para resistir a la tensión que posee el cable al momento de realizar el corte sin que este se rompa.</li> <li>• Esta magnitud se especifica en N/mm<sup>2</sup>.</li> </ul>
<p><b>Elongación</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Describe cuánto se puede deformar el alambre antes de romperse.</li> </ul>
<p><b>Punto de fusión</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entre más alto sea el punto de fusión, menos se desgastará el electrodo debido a las continuas descargas eléctricas a las que está expuesto.</li> </ul>

**Figura 12. Características para la selección de electrodos.**

Existen varios tipos de alambres, mismos que se eligen dependiendo de la aplicación a realizarse (ver Tabla 1):

**Tabla 1.**  
**Tipos de alambre para el corte por electroerosión**

Tipo de alambre	Características
<b>Alambre de Cobre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta conductividad térmica y eléctrica.</li> <li>• Actualmente, se lo emplea en un menor porcentaje debido a que su resistencia a la tracción es baja.</li> </ul>
<b>Alambre de latón (65Cu35Zn)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sucesor del alambre de cobre.</li> <li>• Es bastante utilizado ya que posee una buena conductividad y alta resistencia a la tracción.</li> </ul>
<b>Alambre de Molibdeno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empleado en aplicaciones que requieran de alta resistencia a la tracción en alambres de diámetro pequeño.</li> <li>• Posee un alto punto de fusión pero su conductividad es baja.</li> </ul>
<b>Alambre de Tungsteno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posee mejores propiedades que el alambre de molibdeno en cuanto a punto de fusión y resistencia a la tracción.</li> </ul>
<b>Alambre con recubrimiento de Zinc</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son alambres de cobre o de latón con un recubrimiento de zinc.</li> <li>• La capa de zinc es empleada para proteger al alambre que recubre.</li> </ul>

### 2.3.6 Factores que repercuten en la electroerosión

Son factores relacionados con la naturaleza y composición de los materiales de la pieza de trabajo, el electrodo, el líquido dieléctrico además de las condiciones operacionales de la máquina.

Dentro de las condiciones operacionales de la máquina de electroerosión se consideran los siguientes (ver Figura 13):

Potencia de la máquina	Gap	Flujo del líquido dieléctrico
<ul style="list-style-type: none"> <li>Definida por el voltaje aplicado y la corriente que circula por los electrodos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contribuye a la eliminación de los residuos metálicos y del calor</li> </ul>

**Figura 13. Condiciones operacionales de la máquina de electroerosión.**

### 2.3.7 Ejemplos de piezas cortadas por electroerosión de hilo

Con el proceso de Wire EDM, se pueden realizar distintas piezas de materiales conductores, ya sea en el campo médico, químico, electrónico, automotriz, aeronáutico, entre otros (ver Figura 14).



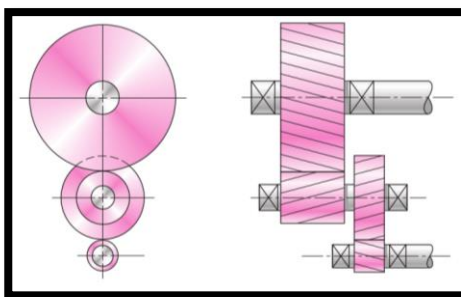
**Figura 14. Piezas mecanizadas por el proceso Wire EDM.**

Fuente: (MICRO-TRÓNICS, 2015)

## 2.4 COMPONENTES MECÁNICOS

### 2.4.1 Tren de engranajes

Es un sistema compuesto por ruedas dentadas acopladas (ver Figura 15). La combinación de estas ruedas transmite el movimiento de giro que se relacionan entre dos ejes, así el movimiento de uno de ellos se transmite al otro según la relación de velocidad prevista.



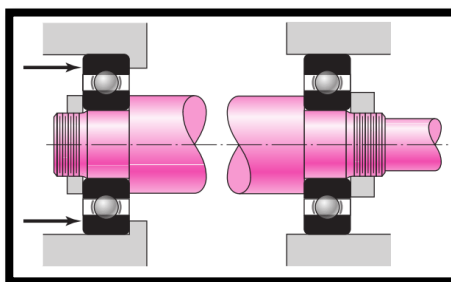
**Figura 15. Tren de engranajes.**

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

### 2.4.2 Rodamientos

Son elementos mecánicos que reducen la fricción entre un eje y las piezas que se conectan mismo (ver Figura 16). Además sirve de apoyo y facilita el desplazamiento del eje.

Los rodamientos o cojinetes deben estar adecuadamente lubricados para que su desempeño sea fiable.



**Figura 16 Montaje de cojinetes.**

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)



### 2.4.3 Válvulas de globo

Son válvulas que pueden ser aplicadas en la regulación de fluidos, además pueden realizar un cierre hermético. A diferencia de las válvulas de compuerta el fluido no corre de manera directa y en una sola dirección sino que el fluido entra y sube dentro del cuerpo de la válvula, es estrangulado por el embolo según qué tan abierta se encuentre la válvula (ver Figura 17).



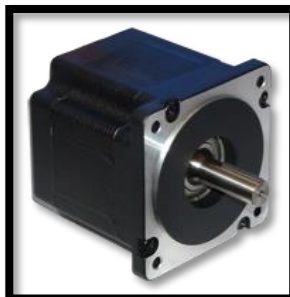
**Figura 17 Válvula de globo.**

Fuente: (distrivalvulas, 2012)

## 2.5 COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

### 2.5.1 Motor a pasos

Estos motores se emplean en aplicaciones que requieran de movimientos precisos. Se caracterizan por poderlos mover un paso cada vez que se les dé un pulso (ver Figura 18).



**Figura 18 Motor a pasos NEMA 34.**

Fuente: (ANAHEIM AUTOMATION, 2016)

### 2.5.2 Motor de corriente alterna (AC)

Tenemos dos tipos de motores AC, mismos que se citan a continuación:

**Motor sincrónico**, se caracteriza porque la velocidad de giro del mismo es proporcional a la frecuencia de la corriente alterna que lo alimenta.

**Motor asincrónico**, son los más empleados a nivel industrial. No precisan de un campo magnético alimentado con corriente continua (ver Figura 19).



**Figura 19 Motor LAFERT ½ HP.**

Fuente: (lafert, 2016)

### 2.5.3 Bomba centrífuga

Las bombas centrífugas o rotodinámicas transforman la energía mecánica en un impulsor. Consiste en un conjunto de paletas rotatorias encerradas dentro de una caja o cárter. Su principal característica es convertir la energía de una fuente de movimiento primero en velocidad y después en energía de presión (ver Figura 20).



**Figura 20 Bomba centrífuga Pedrollo ½ HP.**

Fuente: (Ferretería Industrial León, 2016)

### 2.5.4 Contactores

Son aparatos de mando a distancia que pueden abrir o cerrar circuitos, ya sea en vacío o en carga. Constituyen la pieza clave para el automatismo de motores eléctricos.

Está formado por una bobina y contactos abiertos y cerrados, mismos que dan paso o no a la corriente en el circuito (ver Figura 21).



**Figura 21 Contactor CHNT.**

Fuente: (Rodríguez, 2013)

### 2.5.5 Variador de frecuencia

Dispositivo electrónico que permite el control completo de motores eléctricos de inducción. Existen variadores de corriente continua, en los que se varía la tensión y de corriente alterna, en donde se varía la frecuencia (ver Figura 22).

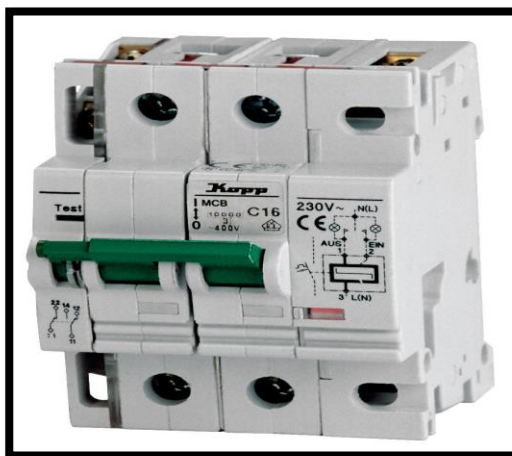


**Figura 22 Variador de frecuencia ABB.**

Fuente: (SIDE, 2016)

### 2.5.6 Disyuntor

Es un interruptor automático magneto-térmico capaz de abrir un circuito magnético cuando la intensidad que por él circula excede un valor determinado (ver Figura 23).



**Figura 23 Disyuntor Kopp.**

Fuente: (direct industry, 2016)

### 2.5.7 Driver motor a pasos

Dispositivo que permite controlar la velocidad de un motor a pasos regulando micropulsos (ver Figura 24).



**Figura 24 Driver 5A.**

Fuente: (direct industry, 2016)

### 2.5.8 Control CNC

Es un sistema que permite controlar en todo momento la posición de un elemento físico generalmente es una herramienta que está montada en una máquina. Emplea un software y un conjunto de órdenes para controlar las coordenadas de posición de un punto respecto a un origen (ver Figura 25).

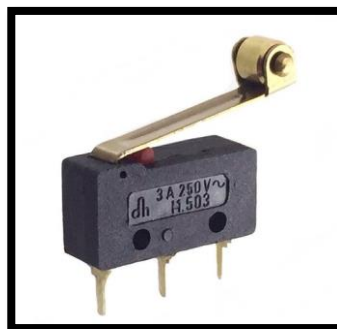


**Figura 25 Flame/Plasma CNC Cutting System.**

Fuente: (ebay, 2015)

### 2.5.9 Fines de carrera

Son mecanismos de precisión formados por un resorte y un par de contactos que convierten energía mecánica aplicada a un actuador en señales eléctricas (ver Figura 26).



**Figura 26 Interruptor final de carrera con palanca.**

Fuente: (Cetronic, 2016)

## **CAPÍTULO 3.**

### **LEVANTAMIENTO DEL ESTADO TÉCNICO INICIAL DE LA MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN DE CORTE POR HILO**

#### **3.1 ANÁLISIS GENERAL DEL ESTADO DE LA MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN**

Este análisis del estado técnico inicial de la máquina, es el punto de partida para evaluar las funciones y servicios que se utilizarán para ejecutar las actividades de repotenciación de la máquina electroerosionadora.

Para cumplir con este análisis, se debe conocer las especificaciones que posee cada parte de la máquina a repotenciar. Los datos obtenidos se recogen en fichas técnicas para mayor rendimiento.

##### **3.1.1 Ficha técnica de datos y especificaciones de la máquina electroerosionadora**


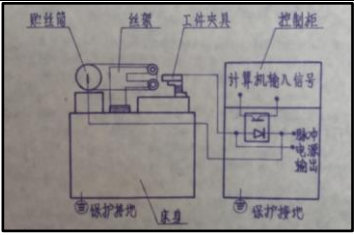


Se realiza esta ficha para determinar las características de trabajo previo de electroerosión de la máquina.

Además estas especificaciones son útiles para la toma de decisiones de repotenciación futuras sobre cualquier dato técnico exclusivo de la máquina y la posibilidad de usar elementos de mayor prestación. Se detalla a continuación el estado técnico de la máquina de electroerosión de corte por hilo (ver Tabla 2), tomando en cuenta el conjunto de manuales que vinieron con la máquina:

A continuación, se observan las especificaciones de cada sistema de la máquina (ver Tabla 3 – Tabla 7):

Tabla 2.

Ficha técnica de datos generales de la máquina de electroerosión de corte por hilo.

 <b>GRUPO SIMYM</b> SERVICIOS INDUSTRIALES MECÁNICOS Y MECATRÓNICOS				
<b>EQUIPO</b>	<b>Electroerosionadora de corte por hilo</b>			
<b>CÓDIGO TÉCNICO</b>	<b>GS-EDM-NC-01</b>			
	<b>GS:</b>	Grupo SIMYM	<b>NC:</b>	NC Wire Cut Machine
	<b>EDM:</b>	Mecanizado por descarga eléctrica	<b>01:</b>	Máquina N° 1
<b>FOTOGRAFÍAS DE LA MÁQUINA</b>				
				
<p><b>Figura 27 Esquema de la máquina de electroerosión de corte por hilo.</b></p> <p>Fuente: (Manual de la máquina N° 2.)</p>				
<b>Máquina</b>			<b>Armario de Control</b>	
				
<p><b>Figura 28 Máquina electroerosionadora.</b></p>			<p><b>Figura 29 Armario de Control</b></p>	



<b><i>DATOS DE FABRICACIÓN Y ADQUISICIÓN</i></b>			
<b>Fabricante:</b>	NC	<b>País Productor:</b>	China
<b>Modelo:</b>	J0780	<b>Serie:</b>	014
<b>Tipo:</b>	Wire Cut Machine	<b>Año:</b>	1991
<b>Fecha de Adquisición:</b>	Enero-2015	<b>Valor de Adquisición:</b>	\$ 1000
<b><i>DATOS GENERALES</i></b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>ENERGÍA</b> Energía de alimentación principal 220 VAC y 480 VAC, 3 fases y 60 Hz. Energía de control 220 VAC, 2 líneas, 60 Hz. Energía de potencia 220 VCC fijos y 480 VCC variables, 60 Hz.</li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>POTENCIA</b> Potencia total: 1.2 KW</li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>CONDICIONES DE AMBIENTE</b> Temperatura de trabajo: 5 – 40 °C Humedad relativa: &lt; 85% (25 °C)</li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>EJES DE TRABAJO</b> Eje X – Eje Y Recorrido longitudinal de los ejes 160 mm x 200 mm</li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DIMENSIONES DE LA MÁQUINA</b> Largo total: 116 cm Ancho total: 67 cm Altura total: 120 cm Peso: 650 Kg</li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DIMENSIONES DEL ARMARIO DE CONTROL</b> Largo total: 110 cm Ancho total: 66 cm Altura total: 130 cm</li> </ul>			






Peso: 200 Kg
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DIMENSIONES DE LA PIEZA DE TRABAJO</b>  Largo total: 120 mm  Ancho total: 55 mm  Altura total: 80 mm  Peso máximo: 40 Kg</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>TIPO DE HILO</b>  Material: Molibdeno reutilizable  Diámetro del hilo: 0.08 mm – 0.14 mm</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>CARACTERÍSTICAS DE TRABAJO</b>  Rangos de voltaje: 33, 36, 39, 42, 45 V  Rango de corriente: 0.2 – 3.0 A  Ancho de pulso: 7, 12, 30, 38, 44 <math>\mu</math>s  Intervalo de pulso: 25 – 290 <math>\mu</math>s</li> </ul>

Tabla 3.

Ficha técnica de datos del Sistema de bobinado de hilo.

 <b>GRUPO SIMYM</b> SERVICIOS INDUSTRIALES MECÁNICOS Y MECATRÓNICOS				
<b>EQUIPO</b>	<b>Electroerosionadora de corte por hilo</b>			
<b>CÓDIGO TÉCNICO</b>	<b>GS-EDM-NC-01</b>			
	<b>GS:</b>	Grupo SIMYM	<b>NC:</b>	NC Wire Cut Machine
	<b>EDM:</b>	Mecanizado por descarga eléctrica	<b>01:</b>	Máquina N° 1
<b>SISTEMA DE BOBINADO DE HILO</b>				





**Figura 30 Motor 100 VDC.**

<b>Fabricante:</b>	NC	<b>Voltaje:</b>	100 VDC
<b>Tipo:</b>	Corriente continua	<b>Amperaje:</b>	10 A
<b>Acople:</b>	Matrimonio	<b>RPM:</b>	1800

**Hilo**



a)



b)



c)

**Figura 31 Bobinado de hilo. a) Rodete con hilo. b) Tornillo sinfín. c)**

**Engranajes.**

<b>Rodete:</b>	Acero	<b>Transmisión:</b>	Engranajes
<b>Hilo:</b>	Molibdeno		Tornillo sinfín
<b>Sensores:</b>	3 Fines de carrera	<b>Relación de transmisión:</b>	30:1

Tabla 4.

Ficha técnica de datos del Sistema de Circulación y fluido dieléctrico.



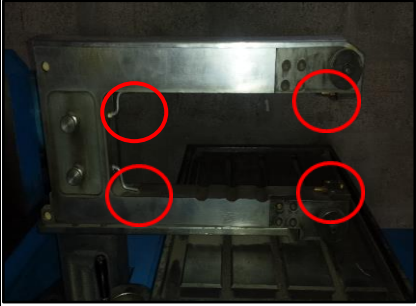

				
<b>EQUIPO</b>	<b>Electroerosionadora de corte por hilo</b>			
<b>CÓDIGO TÉCNICO</b>	<b>GS-EDM-NC-01</b>			
	<b>GS:</b>	Grupo SIMYM	<b>NC:</b>	NC Wire Cut Machine
	<b>EDM:</b>	Mecanizado por descarga eléctrica	<b>01:</b>	Máquina N°1
<b>SISTEMA DE CIRCULACIÓN Y FLUIDO DIELECTRICO</b>				
<b>Mangueras</b>				
				
<b>Figura 32 Mangueras de desfogue.</b>				
<b>Fabricante:</b>	NC	<b>Dimensión:</b>	1.25 m	
<b>Tipo:</b>	ID 6mm, flexible	<b>Característica:</b>	Plástica transparente	
<b>Reductores y Acoples</b>				
				
a)		b)		
<b>Figura 33 a) Acoples de mangueras a la máquina. b) Reductores.</b>				
<b>Acoples:</b>	Acero	<b>Reducciones:</b>	Acero	
	Para manguera 6 mm		10:6	
	Cantidad: 4		Cantidad: 2	

Tabla 5.

Ficha técnica de datos del Sistema de transmisión de movimiento en el eje X e Y.

				
<b>EQUIPO</b>	<b>Electroerosionadora de corte por hilo</b>			
<b>CÓDIGO TÉCNICO</b>	<b>GS-EDM-NC-01</b>			
	<b>GS:</b>	Grupo SIMYM	<b>NC:</b>	NC Wire Cut Machine
	<b>EDM:</b>	Mecanizado por descarga eléctrica	<b>01:</b>	Máquina N°1
<b>SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO EN EL EJE X E Y</b>				
<b>Motores</b>				
				
a)		b)		
<b>Figura 34 a) Motor a pasos Eje X. b) Motor a pasos Eje Y.</b>				
<b>Fabricante:</b>	NC	<b>Voltaje:</b>	24 VDC	
<b>Tipo:</b>	A pasos (3 bobinas)	<b>Amperaje:</b>	10 A	
<b>Sistema de transmisión de motores a pasos</b>				
				
<b>Figura 35 Caja reductora de engranajes y tornillo sinfín.</b>				
<b>Engranajes:</b>	Acero	<b>Transmisión:</b>	Engranajes	
	Cantidad: 2		Tornillo sinfín	
<b>Resortes:</b>	2 por cada eje	<b>Relación de transmisión:</b>	125:1	
<b>Selector de movimiento</b>	1 por cada eje			

Tabla 6.


Ficha técnica de datos del Sistema de Circuito de la chispa.

				
<b>EQUIPO</b>	<b>Electroerosionadora de corte por hilo</b>			
<b>CÓDIGO TÉCNICO</b>	<b>GS-EDM-NC-01</b>			
	<b>GS:</b>	Grupo SIMYM	<b>NC:</b>	NC Wire Cut Machine
	<b>EDM:</b>	Mecanizado por descarga eléctrica	<b>01:</b>	Máquina N°1
<b>SISTEMA DE CIRCUITO DE LA CHISPA</b>				
				
<b>Figura 36 Sistema de circuito de la chispa.</b>				
<b>Resistencias de Potencia:</b>	10 $\Omega$ y 300 W (Grande)	<b>Transformador:</b>	220 VAC, Multietapas	
	6.8 $\Omega$ y 5 W	<b>Transistores:</b>	BJT 3DA27B	
	24 $\Omega$ y 5 W	<b>Diodos:</b>	2CZ520	
<b>Capacitores:</b>	Metalizados de prolipropileno 0.01 $\mu$ F	<b>Carbón:</b>	1 escobilla	



Tabla 7.

Ficha técnica de datos del Tablero y circuitos de control.

				
<b>EQUIPO</b>	<b>Electroerosionadora de corte por hilo</b>			
<b>CÓDIGO TÉCNICO</b>	<b>GS-EDM-NC-01</b>			
	<b>GS:</b>	Grupo SIMYM	<b>NC:</b>	NC Wire Cut Machine
	<b>EDM:</b>	Mecanizado por descarga eléctrica	<b>01:</b>	Máquina N° 1
<b><i>TABLERO Y CIRCUITOS DE CONTROL</i></b>				
				
<b>Figura 37 Tablero y circuitos de control</b>				
<b>Botones:</b>	Normalmente abiertos y normalmente cerrados	<b>Medidores e indicadores:</b>	De voltaje y amperaje	
<b>Capacitores y diodos:</b>	Para 220 VAC.	<b>Disyuntores, contactores y relés:</b>	Para 220 VAC y 10 A	

### 3.2 EVALUACIÓN DEL ESTADO TÉCNICO DE LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.

La máquina electroerosionadora estuvo sometida a un régimen de trabajo de casi 25 años.

Esta evaluación detecta el grado de desgaste de los distintos mecanismos de la máquina. La inspección se realizó bajo el siguiente estándar (ver Tabla 8):

**Tabla 8.**  
**Estado técnico de los elementos de la máquina.**


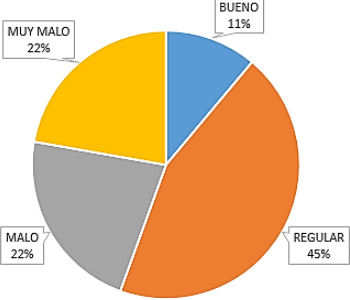
<b>ESTÁNDAR</b>	<b>PORCENTAJE</b>
<i>Bueno</i>	90 a 100%
<i>Regular</i>	75 a 89%
<i>Malo</i>	50 a 74%
<i>Muy Malo</i>	Menor a 49%

El estado técnico determina las condiciones funcionales que presta la máquina actualmente, de este punto se parte para realizar una evaluación general de la máquina electroerosionadora, según la Tabla 9:

A continuación, se observan las evaluaciones de cada sistema de la máquina electroerosionadora (ver Tabla 10 - Tabla 14):


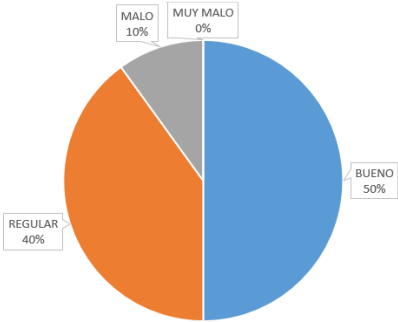
Tabla 9.

Evaluación del estado general de la máquina electroerosionadora.

 <b>GRUPO SIMYM</b> SERVICIOS INDUSTRIALES MECÁNICOS Y MECATRÓNICOS					
EQUIPO	Electroerosionadora de corte por hilo				
CÓDIGO TÉCNICO	GS-EDM-NC-01				
	GS:	Grupo SIMYM	NC:	NC Wire Cut Machine	
	EDM:	Mecanizado por descarga eléctrica	01:	Máquina N°1	
EVALUACIÓN GENERAL DE LA MÁQUINA					
ÍTEM	ESTADO TÉCNICO	Bueno	Regular	Malo	Muy malo
1	Estado de la carcasa o cuerpo del equipo.	X			
2	Consumo de energía.		X		
3	Estado y funcionamiento del sistema de transmisión.		X		
4	Estado y funcionamiento del sistema de fluido dieléctrico.				X
5	Estado de los elementos motrices del equipo.			X	
6	Estado del sistema eléctrico y electrónico.			X	
7	Estado del sistema mecánico.		X		
8	Estado del tablero de control.				X
9	Lubricación general de la máquina.		X		
ESTADO TÉCNICO:		REPOTENCIACIÓN:			
 <p><b>Figura 38 Estado técnico</b></p>		Revisión ( ) Reparación pequeña ( ) Reparación media ( X ) Reparación general ( )			



**Tabla 10.**  
**Evaluación del Sistema de bobinado de hilo.**

 <b>GRUPO SIMYM</b> SERVICIOS INDUSTRIALES MECÁNICOS Y MECATRÓNICOS					
EQUIPO	<b>Electroerosionadora de corte por hilo</b>				
CÓDIGO TÉCNICO	<b>GS-EDM-NC-01</b>				
	GS:	Grupo SIMYM	NC:	NC Wire Cut Machine	
	EDM:	Mecanizado por descarga eléctrica	01:	Máquina N°1	
<b>SISTEMA DE BOBINADO DE HILO</b>					
ÍTEM	ESTADO TÉCNICO	Bueno	Regular	Malo	Muy malo
<b>1</b>	Funcionamiento del motor DC.			<b>X</b>	
<b>2</b>	Estado del acople (matrimonio) del motor DC.		<b>X</b>		
<b>3</b>	Funcionamiento de la caja reductora de velocidad.	<b>X</b>			
<b>4</b>	Estado de los engranajes.	<b>X</b>			
<b>5</b>	Estado del tornillo sinfín.	<b>X</b>			
<b>6</b>	Estado de los rodamientos.	<b>X</b>			
<b>7</b>	Estado del rodete.	<b>X</b>			
<b>8</b>	Estado del hilo de molibdeno.		<b>X</b>		
<b>9</b>	Estado de los sensores.		<b>X</b>		
<b>10</b>	Lubricación de los mecanismos.		<b>X</b>		
<b>ESTADO TÉCNICO:</b>		<b>REPOTENCIACIÓN:</b>			
 <p><b>Figura 39 Estado técnico</b></p>		Revisión ( ) Reparación pequeña ( X ) Reparación media ( ) Reparación general ( )			

**Tabla 11.**  
**Evaluación del Sistema de circulación y fluido dieléctrico.**


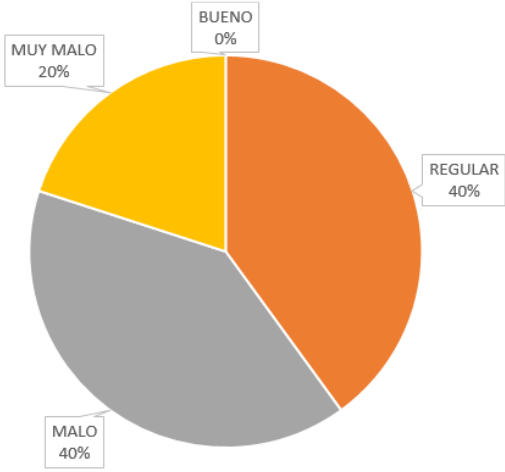

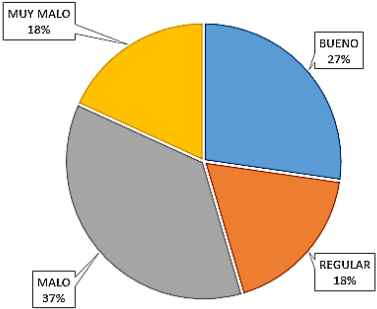
					
EQUIPO	Electroerosionadora de corte por hilo				
CÓDIGO TÉCNICO	GS-EDM-NC-01				
	GS:	Grupo SIMYM	NC:	NC Wire Cut Machine	
	EDM:	Mecanizado por descarga eléctrica	01:	Máquina N°1	
<i>SISTEMA DE CIRCULACIÓN Y FLUIDO DIELECTRICO</i>					
ÍTEM	ESTADO TÉCNICO	Bueno	Regular	Malo	Muy malo
1	Funcionamiento de la bomba.				X
2	Funcionamiento de las mangueras.			X	
3	Estado de los acoples.		X		
4	Estado de los reductores.		X		
5	Estado de las válvulas.			X	
ESTADO TÉCNICO:		REPOTENCIACIÓN:			
 <p><b>Figura 40 Estado técnico</b></p>		Revisión ( ) Reparación pequeña ( ) Reparación media ( ) Reparación general ( X )			

Tabla 12.


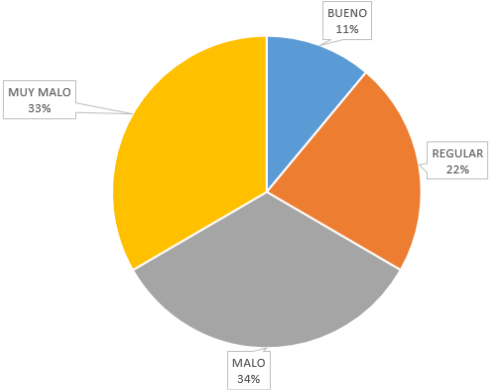
Evaluación del Sistema de transmisión de movimiento en el eje X e Y.

 <b>GRUPO SIMYM</b> SERVICIOS INDUSTRIALES MECÁNICOS Y MECATRÓNICOS					
EQUIPO	Electroerosionadora de corte por hilo				
CÓDIGO TÉCNICO	GS-EDM-NC-01				
	GS:	Grupo SIMYM	NC:	NC Wire Cut Machine	
	EDM:	Mecanizado por descarga eléctrica	01:	Máquina N°1	
<i>SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO EN EL EJE X E Y</i>					
ÍTEM	ESTADO TÉCNICO	Bueno	Regular	Malo	Muy malo
1	Funcionamiento de los motores a pasos.			X	
2	Funcionamiento de la caja reductora de velocidad.		X		
3	Estado de los engranajes.		X		
4	Estado del tornillo sinfín.	X			
5	Estado de los rodamientos.			X	
6	Estado de los resortes.	X			
7	Estado de las regletas.	X			
8	Estado de los selectores de movimiento.		X		
9	Lubricación de los mecanismos.		X		
ESTADO TÉCNICO:		REPOTENCIACIÓN:			
 <p><b>Figura 41 Estado técnico</b></p>		Revisión ( ) Reparación pequeña ( ) Reparación media ( X ) Reparación general ( )			

**Tabla 13.**  
**Evaluación del Sistema de circuito de la chispa.**

					
EQUIPO	Electroerosionadora de corte por hilo				
CÓDIGO TÉCNICO	GS-EDM-NC-01				
	GS:	Grupo SIMYM	NC:	NC Wire Cut Machine	
	EDM:	Mecanizado por descarga eléctrica	01:	Máquina N°1	
SISTEMA DE CIRCUITO DE LA CHISPA					
ÍTEM	ESTADO TÉCNICO	Bueno	Regular	Malo	Muy malo
1	Funcionamiento del transformador multietapas.	X			
2	Estado de las placas electrónicas en general.			X	
3	Funcionamiento del circuito rectificador.			X	
4	Estado de los capacitores metalizados de polipropileno.	X			
5	Funcionamiento de las resistencias de potencia.	X			
6	Funcionamiento de los transistores.		X		
7	Estado de los diodos.		X		
8	Funcionamiento del reóstato.			X	
9	Estado de los elementos de protección.				X
10	Estado del carbón (escobilla).				X
11	Estado del cableado.			X	
ESTADO TÉCNICO:			REPOTENCIACIÓN:		
			Revisión ( ) Reparación pequeña ( ) Reparación media ( ) Reparación general (X)		
<b>Figura 42 Estado técnico</b>					

**Tabla 14.**  
**Evaluación del Tablero y circuitos de control.**

					
EQUIPO	Electroerosionadora de corte por hilo				
CÓDIGO TÉCNICO	GS-EDM-NC-01				
	GS:	Grupo SIMYM	NC:	NC Wire Cut Machine	
	EDM:	Mecanizado por descarga eléctrica	01:	Máquina N°1	
TABLERO Y CIRCUITOS DE CONTROL					
ÍTEM	ESTADO TÉCNICO	Bueno	Regular	Malo	Muy malo
1	Estado de la caja de control.		X		
2	Estado de los botones de control.			X	
3	Estado de los selectores.	X			
4	Estado de los pulsadores.			X	
5	Funcionamiento de los contactores.				X
6	Funcionamiento de los disyuntores.				X
7	Funcionamiento de los relés.		X		
8	Estado de los medidores e indicadores.			X	
9	Capacitores y diodos.				X
ESTADO TÉCNICO:			REPOTENCIACIÓN:		
 <p><b>Figura 43 Estado técnico</b></p>			Revisión ( ) Reparación pequeña ( ) Reparación media ( ) Reparación general (X)		

### **3.3 DIAGNÓSTICO DEL ESTADO TÉCNICO GENERAL DE LA MÁQUINA**

El estado técnico actual de la máquina es el de NO funcionamiento y NO actividad, puesto que no ha trabajado durante un tiempo de 1 año. Incluso se puede observar que no tiene todos los sistemas completos, tanto mecánicos como electrónicos. La carcasa de la máquina se encuentra en buen estado, para soportar una repotenciación media.

## **CAPÍTULO 4.**

### **REDISEÑO E IMPLEMENTACIÓN**

#### **4.1 DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO**

Se inicia con el análisis de la posición, alcance de desplazamiento y velocidad, para realizar un diseño eficiente que cumpla los requisitos de las máquinas existentes en el mercado, y así garantizar un adecuado funcionamiento y rango de operatividad de la misma.

Para realizar la repotenciación de la máquina electroerosionadora fue necesario evaluar el estado de la misma, con el fin de facilitar la determinación de las diferentes actividades a ejecutar para su puesta en marcha (ver Figura 44).



**Figura 44 Máquina de electroerosión NC WIRE CUT MACHINE J0780**

### 4.1.1 Circulación y filtrado del fluido dieléctrico

Las máquinas de electroerosión de cualquier tipo cuentan con un sistema cíclico de agua desionizada (fluido dieléctrico). Este sistema con la ayuda de una bomba hidráulica se encarga de impulsar y hacer circular el fluido dieléctrico, tanto en el reservorio (tanque) como por las tuberías y el área de filtrado.

El fluido dieléctrico se encarga de las siguientes funciones:

- Aislante entre pieza de trabajo e hilo electrificado.
- Conductor de descargas.
- Refrigerante.
- Medio de filtrado y eliminación de partículas.

#### Fluido Dieléctrico

En las máquinas de electroerosión de corte por hilo se emplea casi de manera exclusiva el agua destilada y desionizada para aumentar al máximo su resistividad y evitar la conducción de la corriente por efecto electrolítico. (Albert Camprubí Graell, 2007)

Por tal razón, para este proceso se usa agua destilada, que posee las siguientes características (ver Tabla 15):

**Tabla 15.**  
**Especificaciones técnicas del agua destilada**

Propiedad	Valor especificado
Aspecto	Líquido transparente, incoloro e inodoro
pH 25°C	6.5 – 7.00
Conductividad	0.96 – 1.4 micro siemens/cm
Densidad 20°C	1000
Metales, cloruros, sulfatos	Negativo
Materia orgánica	Negativo
Aplicaciones	Disolvente, refrigerante
Almacenamiento	Temperatura mínima: 5 °C Temperatura máxima 30 °C Tiempo máximo: 6 meses



**Figura 45** Agua destilada.  
**Fuente: (IADA, 2013)**



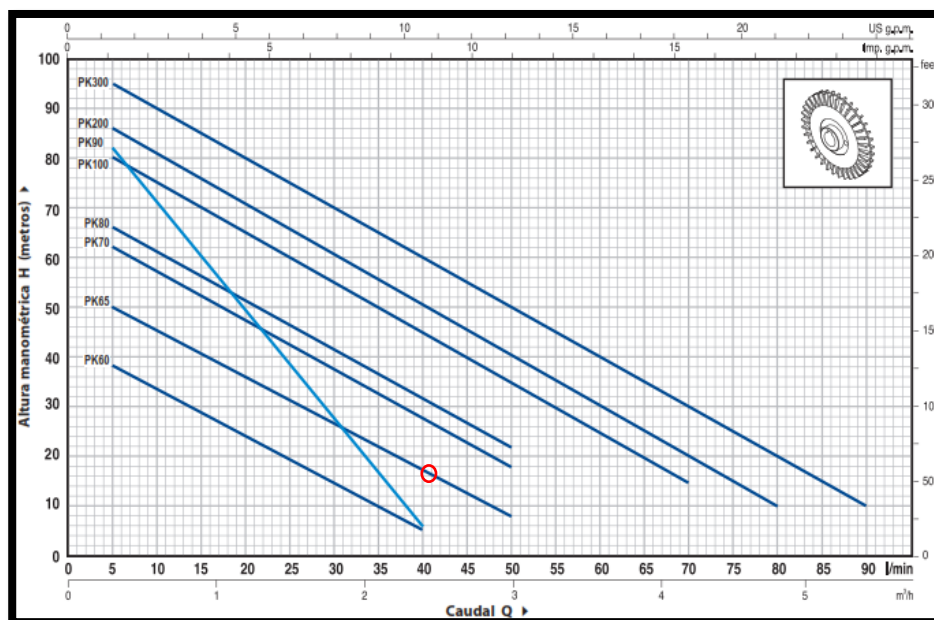
## Dimensionamiento de la bomba electrohidráulica

Para el proceso de maquinado por electroerosión, se necesita más precisión que fuerza. Por lo cual se elige una bomba electrohidráulica de baja potencia. (Albert Camprubí Graell, 2007)

Se escoge usar una bomba centrífuga pues presta los siguientes servicios:

- Es barato en cuanto a compra, operación y mantenimiento.
- Adaptable a diferentes condiciones de operación.
- Son recomendadas para bombear agua, sin partículas abrasivas y líquidos químicamente no agresivos con los materiales que constituyen la bomba.
- La instalación se debe realizar en lugares cerrados o protegidos de la intemperie.

Se utiliza el catálogo de Pedrollo: “Electrobombas con rodete periférico” PK, donde se observa la curvas y datos de prestación. Con estas características se escoge la bomba más adecuada para las características requeridas de trabajo (ver figura 46).



**Figura 46** Curva altura manométrica/caudal.

Fuente: (Catálogo de Pedrollo: “Electrobombas con rodete periférico” PK)

Puesto que la bomba va a conducir el dieléctrico a una altura menor a dos metros, se escoge la bomba de menor altura manométrica que es 5 m con un caudal de 40 litros por minuto. A estas características pertenecen las bombas Pk y PKm, que usan un motor eléctrico para su funcionamiento. La bomba electrohidráulica se muestra en la siguiente figura:

Las especificaciones más relevantes de la bomba escogida, se muestran en la Tabla 16:

**Tabla 16.**  
**Especificaciones técnicas de la bomba centrífuga**

Modelo	Monofásic a	PKm6 0
Potencia	kW	0.37
	HP	0.50
Caudal	m <sup>3</sup> /h	2.1
	l/min	40
Altura manométric a	m	5
Bocas	Entrada	1"
	Salida	1"
Tensión	V	110
Corriente	A	5.5



**Figura 47 Bomba Pedrollo PKm60.**  
Fuente: (Catálogo de Pedrollo: “Electrobombas con rodete periférico” PK)

### **Dimensionamiento de la base del sistema de circulación y filtrado de fluido dieléctrico**

El lugar previsto para ubicar el tanque, la bomba y la tubería tiene un espacio de 650 mm de alto x 60 cm de ancho x 580 mm de espesor. Además, el sistema de circulación y filtrado de fluido dieléctrico necesita ingresar por una puerta de 370 mm de ancho x 50 mm de ancho.

Por lo cual, se diseña una base para todo el sistema, con las siguientes características geométricas: 58 mm de largo x 270 mm de ancho x 5 mm de espesor.

Se usa acero estructural ASTM A36 para la construcción de la base del sistema, por las siguientes propiedades y características (ver Tabla 17):

**Tabla 17.**  
**Propiedades del acero estructural ASTM A36**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
<b>Densidad [g/cm<sup>3</sup>]</b>	7.85
<b>Resistencia a la tracción [MPa]</b>	400 – 552
<b>Límite de Fluencia [MPa]</b>	250
<b>Módulo de Young [MPa]</b>	200 000
<b>Elongación %</b>	18
<b>Dureza Rocknell</b>	67-83
<b>Dureza Brinell</b>	119 - 159

Para escoger el tipo de espesor, se requiere de la siguiente tabla que describe espesores y aplicaciones (ver Tabla 18):

**Tabla 18.**  
**Espesores y aplicaciones del acero estructural ASTM A36**

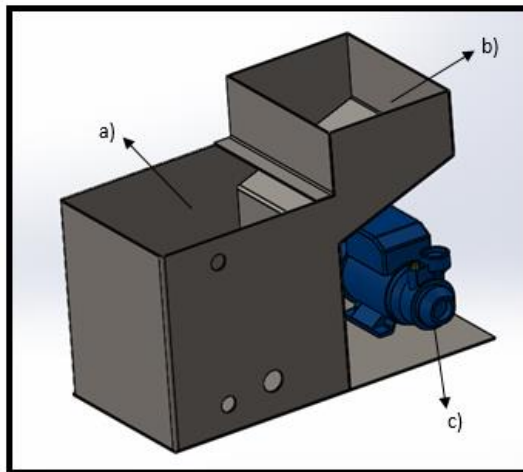
<b>ESPESOR (mm)</b>	<b>APLICACIÓN</b>
<b>2 - 4.5</b>	Estructuras de baja resistencia, depósitos de líquidos, tubería soldada, piezas no críticas y que no se expongan a altos esfuerzos de puentes, construcciones y edificios.
<b>5 - 13</b>	Construcción de puentes, estructuras metálicas.

Fuente: (Repositorio, ESPE)

### **Dimensionamiento del tanque**

Por el espacio requerido para la ubicación del tanque, se resuelve hacer un tanque con las siguientes características:

- Material: acero ASTM A36.
- Espesor: 3 mm.
- Conformado por 3 chapas metálicas, como se observa en los anexos.



**Figura 48 Tanque, base y bomba hidráulica. a) Reservorio de fluido dieléctrico. b) Ubicación del sistema de filtrado. c) Ubicación de la bomba hidráulica en la base.**

El tanque tiene dos partes, como se indica en la figura 48:

En la figura 48.a) sirve como reservorio de fluido dieléctrico con el siguiente volumen:

$$\mathbf{Volumen = 312mm_{largo} \times 264mm_{ancho} \times 320mm_{altura}} \quad \text{Ecuación}$$

1

$$Volumen = 26\,357\,760\,mm^3 \text{ o } 26\,357.76\,m^3$$

$$Volumen = 26\,357\,760\,mm^3 \times \frac{1cm^3}{1 \times 10^3mm^3}$$

$$\mathbf{Volumen = 26357.76\,cm^3}$$

Se obtiene un volumen en litros de, con la semejanza:

$$1cm^3 \approx 1ml$$

$$Volumen = 26357.76\,cm^3 = 26357.76\,ml$$

$$Volumen = 26357.76\,ml \times \frac{1l}{1000ml}$$

$$\mathbf{Volumen = 26.36\,litros}$$

Para este tipo de máquinas WEDM, se usan volúmenes de fluido dieléctrico desde 20 hasta 40 litros, por lo que el diseño del tanque entra en este rango. (Albert Camprubí Graell, 2007)

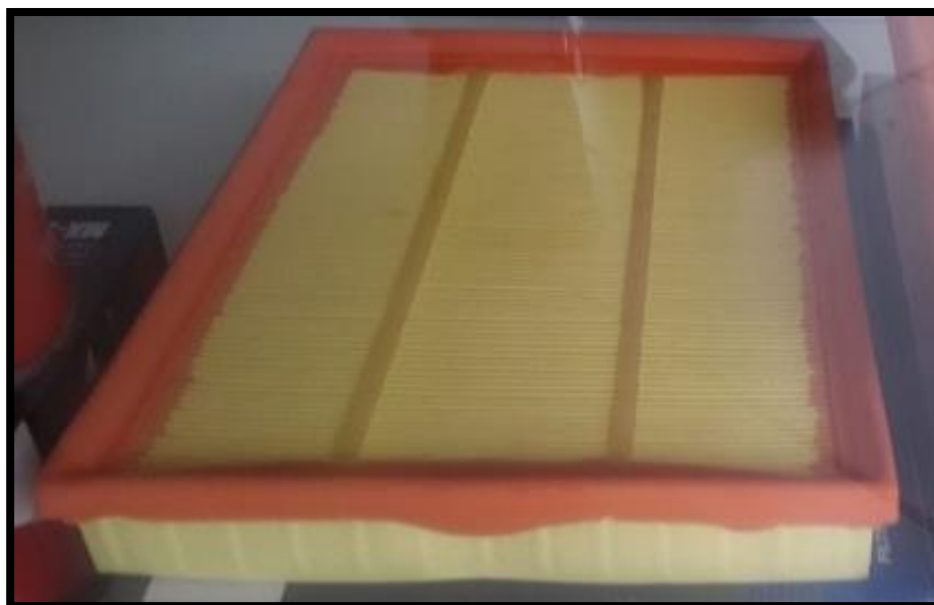
La Figura 48.b) sirve para ubicar el filtro. En la chapa metálica 2, existe una inclinación para que el agua pueda regresar al reservorio con mayor facilidad. Además esto ayuda para que se pueda ubicar la bomba hidráulica dentro del área de la base como se indica en la Figura 48.c) de la figura.

### **Dimensionamiento del filtro**

Para la eliminación de las partículas sólidas se emplean filtros. Como en el caso de la electroerosión de corte por hilo, el volumen de residuos producido suele ser pequeño se emplean casi de manera general los filtros de superficie, principalmente los de cartucho de papel impregnado. (Albert Camprubí Graell, 2007)

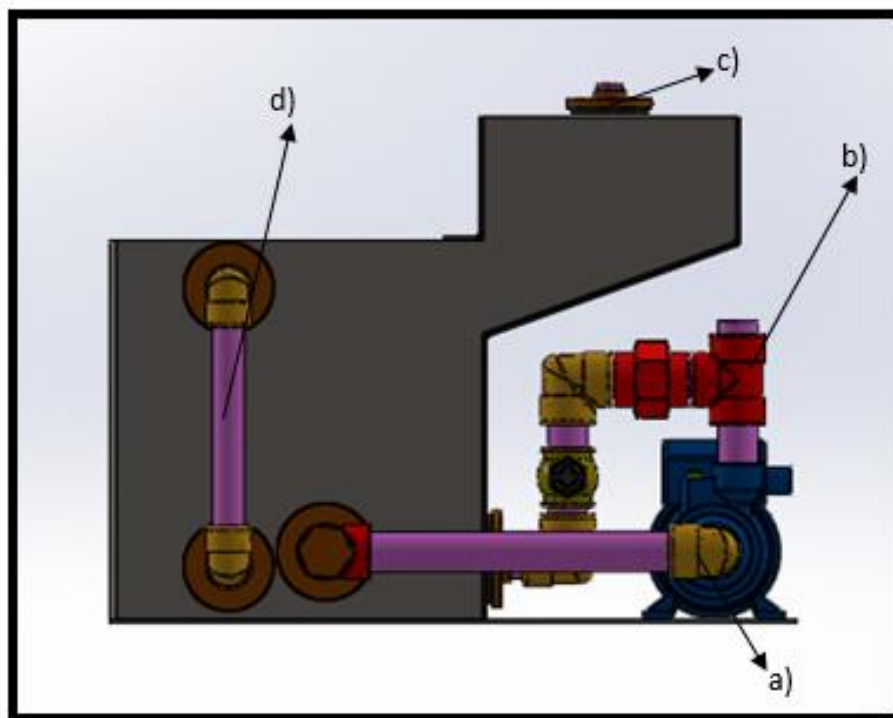
Se escoge un filtro Marca Kuboshi, como se muestra en la figura 49. Este tipo de sistemas de filtración tratan el fluido pasándolo a través de un medio poroso, donde se retienen las partículas contaminantes.

Este tipo de filtro es preciso para el espacio requerido dentro del tanque, con las siguientes dimensiones: 254 mm de largo x 204 mm de ancho x 38 mm de espesor.



**Figura 49 Filtro Kuboshi.**

## Dimensionamiento de la tubería



**Figura 50 Ubicación de la tubería en el tanque. a) tubería de entrada de fluido dieléctrico a la bomba hidráulica, b) tubería de salida y desfogue al tanque de fluido dieléctrico, c) tubería de entrada de fluido dieléctrico al filtro y d) Indicador de nivel de dieléctrico en el tanque.**

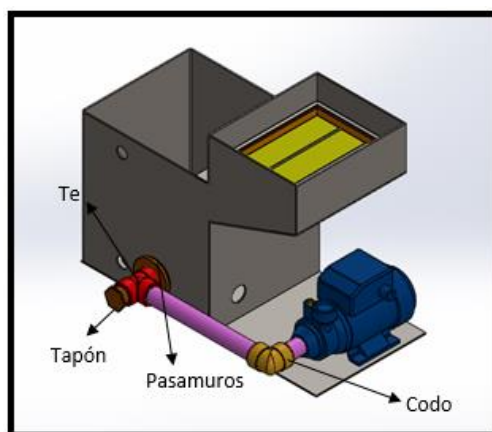
El sistema de tuberías cuenta con 4 partes, como se indica en la figura.

La Figura 50.a): En esta tubería comienza el proceso de circulación de fluido dieléctrico, el cual ingresa a la bomba electrohidráulica. Consta de las siguientes características (ver Tabla 19.):

La Figura 50.b): Esta tubería representa la línea de presión del fluido dieléctrico para circular desde la salida de la bomba hacia el sitio entre la pieza de trabajo y el hilo electrificado, sirviendo de aislante. Consta de las siguientes características (ver Tabla 20.):

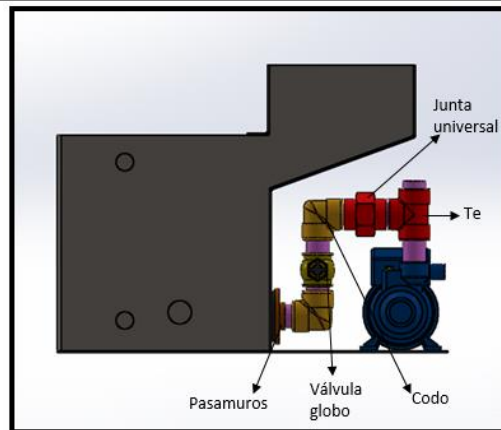
**Tabla 19.****Tubería de entrada de fluido dieléctrico a la bomba hidráulica**

Elemento	Marca	Diámetro	Funciones
Codo			Circulación de fluido dieléctrico.
Te			Circulación de fluido dieléctrico.
Pasamuros	PLASTIGAMA	1"	Circulación de fluido dieléctrico del tanque a la bomba.
Tapón			Vaciamiento del tanque cuando se requiere cambiar el fluido dieléctrico.

**Figura 51 Tubería de entrada de fluido dieléctrico a la bomba hidráulica.****Tabla 20.****Tubería de salida y desfogue al tanque de fluido dieléctrico**

Elemento	Marca	Diámetro	Funciones
Codo			Circulación de fluido dieléctrico.
Te			Circulación de fluido dieléctrico.
Pasamuros	PLASTIGAMA	1"	Circulación de fluido dieléctrico de la bomba al tanque.
Junta Universal			Ayuda a separar fácilmente los elementos de la tubería.
Válvula Globo	TOYO	1"	Permite el paso de una parte del fluido al tanque, para reducir el caudal que ingresará al área de trabajo.



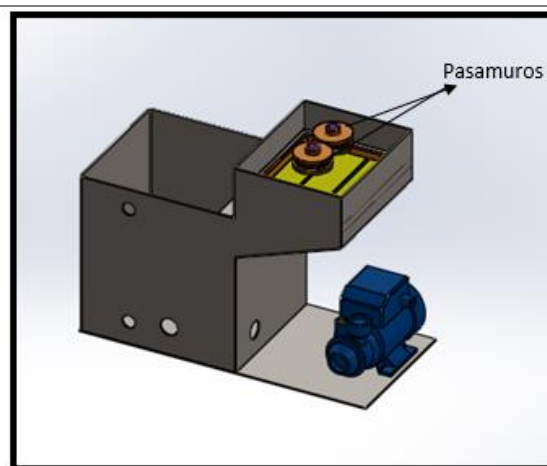


**Figura 52 Tubería de salida y desfogeo al tanque de fluido dieléctrico.**

La parte Figura 50.c): En esta tubería, el fluido dieléctrico regresa al tanque, pasando primero por el sistema de filtrado. Consta de las siguientes características:

**Tabla 21.**  
**Tubería de entrada de fluido dieléctrico al filtro.**

Elemento	Marca	Diámetro	Funciones
Pasamuros	PLASTIGAMA	1/4 "	Circulación de fluido dieléctrico hacia el filtro.



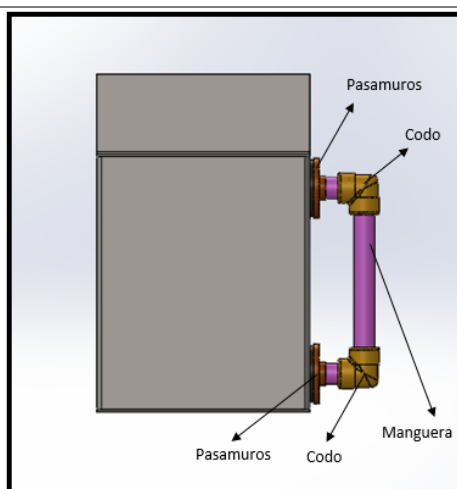
**Figura 53 Tubería de entrada de fluido dieléctrico al filtro.**

La parte Figura 50.d): En esta tubería se indica el nivel de fluido dieléctrico que hay en el tanque. Consta de las siguientes características:



**Tabla 22.**  
**Indicador de nivel de dieléctrico en el tanque**

Elemento	Marca	Diámetro	Funciones
<b>Codo</b>			Circulación de fluido dieléctrico.
<b>Pasamuros</b>	PLASTIGAMA	1/2"	Circulación de fluido dieléctrico.
<b>Manguera</b>		10 mm	Indicador de nivel.



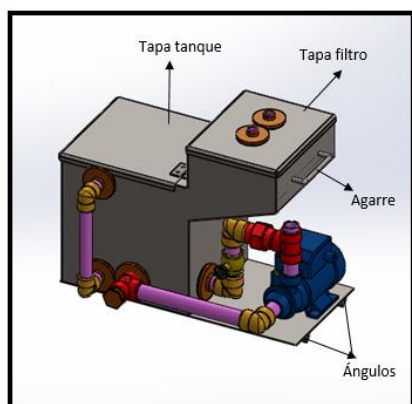
**Figura 54 Indicador de nivel de dieléctrico en el tanque.**

### Elementos adicionales

- Para tapar la parte donde se almacena el fluido dieléctrico se utiliza una tapa con bisagras.
- Para tapar la parte donde se filtra el fluido dieléctrico se usa una tapa simple.
- Se pone un agarre, para facilitar el deslizamiento del tanque hacia afuera, para mantenimiento o cambio de fluido dieléctrico.
- Se pone dos ángulos, que ya en la máquina, van apoyados en dos ruedas cada uno, para facilitar el desplazamiento del sistema hacia afuera.

Además todas las dimensiones del sistema de circulación y filtrado de fluido dieléctrico, se encuentran en el **ANEXO 1**.

**Tabla 23.**  
**Diseño del sistema de circulación y filtrado de fluido dieléctrico.**



**Figura 55** Diseño CAD del sistema de circulación y filtrado de fluido dieléctrico.



**Figura 56** Sistema construido de circulación y filtrado de fluido dieléctrico.

### **Sistema de aspersión o flushing de fluido dieléctrico**

El fluido dieléctrico llega al área de trabajo que consta de dos mangueras de 6mm. Cada manguera cuenta con un regulador de caudal, como se muestra en la figura 57.



**Figura 57** Espacio de trabajo. a) Mangueras de 6mm. b) Reguladores de caudal.

El fluido dieléctrico se esparce por arriba y por abajo, alrededor del área donde circula el hilo y la pieza de trabajo, formando un sistema de aspersion o flushing, como se muestra en la figura 58.



**Figura 58 Sistema de aspersion o flushing de fluido dieléctrico.**

#### 4.1.2 Transmisión de movimiento en los ejes X e Y

##### Selección de los motores

Originalmente la máquina contaba con motores 75BF006A, para desplazar las mesas de trabajo a lo largo del eje x e y respectivamente, entre sus características tenían (ver Tabla 24):

**Tabla 24.**  
**Especificaciones técnicas del motor 75BF006A**

<b>Torque nominal (N.m)</b>	<b>Corriente nominal (A)</b>	<b>Voltaje nominal (V)</b>
<b>1.98</b>	<b>2.5</b>	<b>24</b>

Fuente: (Focus Technology Co. Ltd., 2016)

En SIMYM CIA LTDA. contaban con motores NEMA 34, mismos que tienen las siguientes características (ver Tabla 25):

**Tabla 25.**  
**Especificaciones técnicas del motor NEMA 34**

<b>Torque nominal (N.m)</b>	<b>Corriente nominal (A)</b>	<b>Voltaje nominal (V)</b>
7.7	5.6	60

Fuente: (Focus Technology Co. Ltd., 2016)

### **Selección de los controladores**

Tomando en cuenta la corriente y el voltaje que necesitan los motores NEMA 34, seleccionamos un controlador adecuado, es decir, un controlador que entregue al motor 5.6A y 60V, por ellos elegimos al controlador DQ860MA cuyas características son las siguientes (ver Tabla 26):

**Tabla 26.**  
**Especificaciones técnicas del controlador DQ860MA**

<b>Voltaje de entrada (V)</b>	<b>Corriente de entrada (A)</b>	<b>Corriente de salida (A)</b>
24 – 80 VDC	<6 A	2.8 – 7.8 A

Fuente: (LIKO MOTOR)

Cabe mencionar que con los controladores de cada uno de los motores, se configura el valor de la corriente y por lo tanto el torque que entregan los motores, los valores descritos en la tabla son los valores máximos.

Sabiendo los datos técnicos del motor que se empleará, se procede a seleccionar el mecanismo a utilizar para transmitir el movimiento en los ejes estudiados.

A continuación se detallan los cálculos realizados para el diseño del mecanismo de transmisión de movimiento en el eje Y, los cálculos para el eje X se resumirán en una tabla.

## Diseño de los engranajes

Partimos de los siguientes parámetros:

Velocidad de entrada  $n_{in} = 10 \text{ rpm}$

Velocidad de salida  $n_{out} = 4 \text{ rpm}$

Potencia  $H = 3.25 \text{ W}$

Módulo frontal  $m_t = 0.8$

Módulo normal  $m_n = 0.75$

Ángulo de presión  $\phi_t = 20^\circ$

Ángulo de hélice  $\Psi = 15^\circ$

Torque de entrada  $T = 7.7 \text{ Nm}$

Factor de diseño  $n_d = 2$

Número de calidad  $Q_v = 7$

### Velocidad en cada engrane

$$n_5 = 4 \text{ rpm}$$

$$n_2 = n_3 = n_4 = 10 \text{ rpm}$$

### Relaciones de transmisión en cada etapa.

$$e_1 = \frac{n_2}{n_3} \rightarrow e_1 = 1$$

$$e_2 = \frac{n_4}{n_5} \rightarrow e_2 = \frac{5}{2}$$

### Número de dientes para cada engrane.

Para  $N_2 = 50$  dientes

$$N_3 = e_1 * N_2 \rightarrow N_3 = 50 \text{ dientes}$$

Para  $N_4 = 50$  dientes

$$N_5 = e_2 * N_4 \rightarrow N_5 = 125 \text{ dientes}$$

### Pares de torsión.

$$H = T_n * n_n$$

Ecuación 2

Sabiendo que

$$T_2 = T_3 = T_4 = 7.7 \text{ N.m}$$

$$T_5 = \frac{T_4 * n_4}{n_5} \rightarrow T_5 = 19.25 \text{ N.m}$$

### Especificación de engranes.

Tomando como referencia al engrane que se encuentra ensamblado al tornillo sinfín que mueve la mesa en el eje estudiado, obtenemos las siguientes especificaciones para los engranajes.

Ancho del diente  $t = 1.35 \text{ mm}$

Ancho de la cara del diente  $b = 12 \text{ mm}$

*Diámetros de paso*

$$D_n = m_t * N_n \quad \text{Ecuación 3}$$

$$D_2 = m_t * N_2 \rightarrow D_2 = D_3 = D_4 = 40 \text{ mm}$$

$$D_5 = m_t * N_5 \rightarrow = 100 \text{ mm}$$

Velocidad de la línea de paso.

$$V_n = \pi * D_n * \frac{n_n}{60} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$V_{23} = V_{45} = 20.94 \text{ mm/s}$$

Carga transmitida.

$$W_t = \frac{60000 * H}{\pi * D_n * n} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$W_t = 0.158 \text{ kN}$$

Factor dinámico

$$B = 0.25 * (12 - Q_v)^{2/3} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$B = 0.73$$

$$A = 50 + 56 * (1 - B) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$A = 65.06$$

$$K_v = \left( \frac{A + \sqrt{200 * V}}{A} \right)^B \quad \text{Ecuación 8}$$

$$K_v = 1.07$$

**Tabla 27.**  
**Factor de forma de Lewis**

Número de dientes	Y	Número de dientes	Y
12	0.245	28	0.353
13	0.261	30	0.359
14	0.277	34	0.371
15	0.290	38	0.384
16	0.296	43	0.397
17	0.303	50	0.409
18	0.309	60	0.422
19	0.314	75	0.435
20	0.322	100	0.447
21	0.328	150	0.460
22	0.331	300	0.472
24	0.337	400	0.480
26	0.346	Cremallera	0.485

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Sea Y el factor de forma encontrado en la Tabla 27

$$Y = 0.409$$

Factor de tamaño.

$$K_s = 1.192 * \left(\frac{F*\sqrt{Y}}{P}\right)^{0.0535} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$K_s = 1.091$$

Factor de Distribución de la Carga.

Sea:

$$C_{mc} = 1 \rightarrow \text{factor para dientes sin coronar}$$

$$C_{pm} = 1 \rightarrow \text{factor para piñón montado separado} \quad \frac{s_1}{s} < 0.175$$

pulgadas

$$C_e = 1$$

$$C_{pf} = \frac{F}{10*s_d} - 0.025 \rightarrow F \leq 1 \text{ pulg} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$C_{pf} = 0.032$$

**Tabla 28.**  
**Constantes empíricas A, B y C.**

Condición	A	B	C
Engranajes abiertos	0.247	0.0167	$-0.765(10^{-4})$
Unidades comerciales, cerradas	0.127	0.0158	$-0.930(10^{-4})$
Unidades de precisión, cerradas	0.0675	0.0128	$-0.926(10^{-4})$
Unidades de precisión extrema, cerradas	0.00360	0.0102	$-0.822(10^{-4})$

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$C_{ma} = A + B * F + C * F^3 \quad \text{Ecuación 11}$$

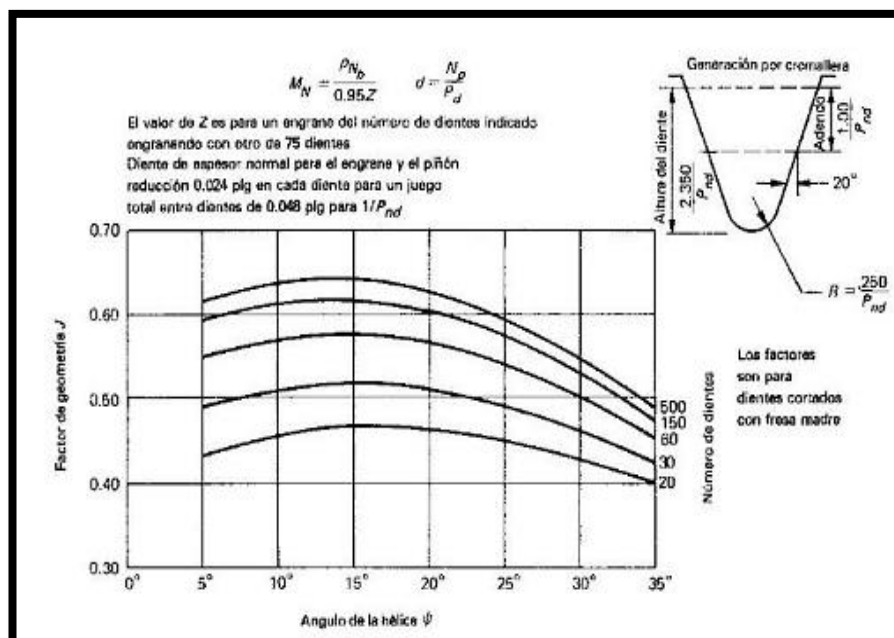
$$C_{ma} = 0.57$$

$$K_H = 1 + C_{mc} * (C_{pf} * C_{pm} + C_{ma} * C_e) \quad \text{Ecuación 12}$$

$$K_H = 1.60$$

$$\text{Factor de espesor de aro } K_B = 1$$

### Factor geométrico de resistencia a la flexión



**Figura 59 Factores de Geometría de la AGMA**

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)



De la Figura 59, determinamos que:

$$Y_f = 0.56$$

**Tabla 29.**  
**Factores de sobrecarga  $K_o$**

Máquina impulsada			
Fuente de potencia	Uniforme	Impacto moderado	Impacto pesado
Uniforme	1.00	1.25	1.75
Impacto ligero	1.25	1.50	2.00
Impacto medio	1.50	1.75	2.25

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

De la Tabla 29, tenemos que:

$$K_o = 1$$

Flexión en los engranes.

$$\sigma = W_t * K_o * K_s * \frac{K_H * K_B}{b * Y_f * K_v * m_t}$$

Ecuación 13

$$\sigma = 47.35 \text{ MPa}$$

Límite de durabilidad en flexión

**Tabla 30.**  
**Propiedades de varios aceros nitrurizados**

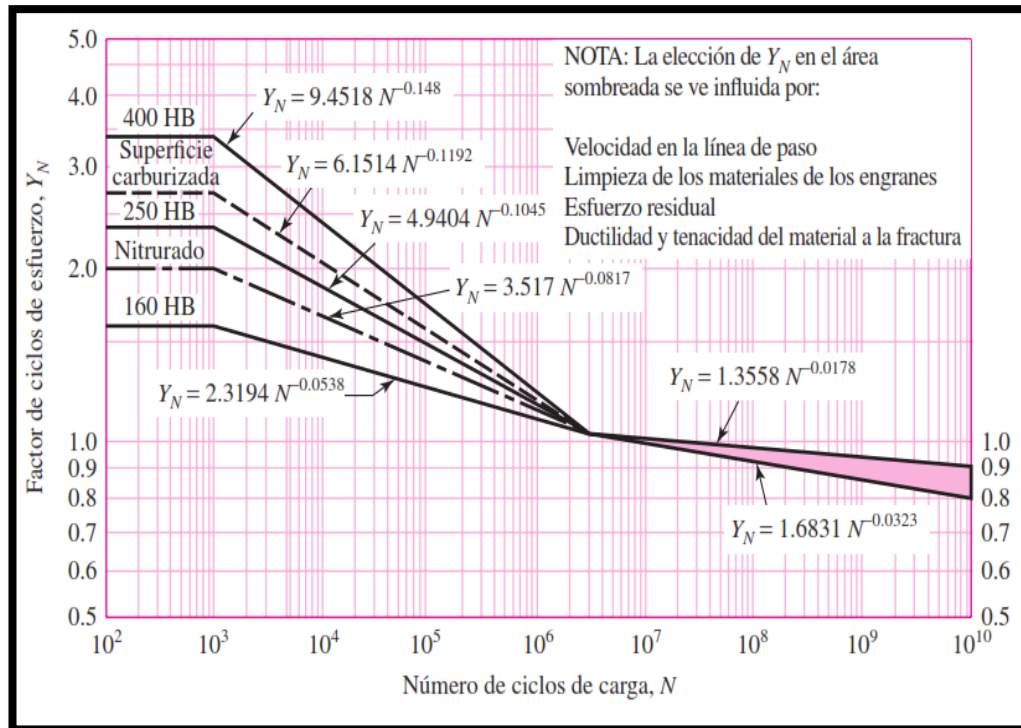
1	2	3	4	5	6	7	8
AISI núm.	Tratamiento	Temperatura, °C (°F)	Resistencia a la tensión MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación, %	Reducción del área, %	Dureza Brinell
4130	TyR*	205 (400)	1 630 (236)	1 460 (212)	10	41	467
	TyR*	315 (600)	1 500 (217)	1 380 (200)	11	43	435
	TyR*	425 (800)	1 280 (186)	1 190 (173)	13	49	380
	TyR*	540 (1 000)	1 030 (150)	910 (132)	17	57	315
	TyR*	650 (1 200)	814 (118)	703 (102)	22	64	245
	Normalizado	870 (1 600)	670 (97)	436 (63)	25	59	197
	Recocido	865 (1 585)	560 (81)	361 (52)	28	56	156
4140	TyR	205 (400)	1 770 (257)	1 640 (238)	8	38	510
	TyR	315 (600)	1 550 (225)	1 430 (208)	9	43	445
	TyR	425 (800)	1 250 (181)	1 140 (165)	13	49	370
	TyR	540 (1 000)	951 (138)	834 (121)	18	58	285
	TyR	650 (1 200)	758 (110)	655 (95)	22	63	230
	Normalizado	870 (1 600)	1 020 (148)	655 (95)	18	47	302
	Recocido	815 (1 500)	655 (95)	417 (61)	26	57	197
4340	TyR	315 (600)	1 720 (250)	1 590 (230)	10	40	486
	TyR	425 (800)	1 470 (213)	1 360 (198)	10	44	430
	TyR	540 (1 000)	1 170 (170)	1 080 (156)	13	51	360
	TyR	650 (1 200)	965 (140)	855 (124)	19	60	280

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$S_t = 0.568 * H_B + 83.8 \text{ MPa} \quad H_B = 280$$

Ecuación 14

$$S_t = 242.84 \text{ MPa}$$



**Figura 60 Factor de ciclos de esfuerzo de resistencia a la flexión**

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Con un número de ciclos de carga de  $10^7$

$$Y_N = 1.3558 * N^{-0.0178}$$

Ecuación 15

$$Y_N = 1.02$$

$$\sigma_{perm} = S_t * Y_N$$

Ecuación 16

$$\sigma_{perm} = 247.7 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma}$$

Ecuación 17

$$n = 5.23$$

De la Tabla 31 tenemos que:

$Y_Z = 0.85$  Para una confiabilidad de 0.90  
 $Y_\theta = 1$  Temperatura de trabajo menor 120°C

**Tabla 31.**  
**Factores de confiabilidad**  
 **$K_R (Y_Z)$**

Confiabilidad	$K_R (Y_Z)$
0.9999	1.50
0.999	1.25
0.99	1.00
0.90	0.85
0.50	0.70

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$S_F = \left( \frac{S_t \cdot Y_N}{Y_\theta \cdot Y_Z \cdot \sigma} \right)$$

Ecuación 18

$$S_F = 6.15$$

### Desgaste de engranajes

**Tabla 32.**  
**Coefficiente elástico  $C_P (Z_E)$**

		Material y módulo de elasticidad de la corona $E_o$ , lbf/pulg <sup>2</sup> (MPa)*					
	Módulo de elasticidad del piñón $E_p$	Acero	Hierro maleable	Hierro nodular	Hierro fundido	Bronce al aluminio	Bronce al estaño
Material del piñón	psi (MPa) <sup>a</sup>	$30 \times 10^6$ ( $2 \times 10^5$ )	$25 \times 10^6$ ( $1.7 \times 10^5$ )	$24 \times 10^6$ ( $1.7 \times 10^5$ )	$22 \times 10^6$ ( $1.5 \times 10^5$ )	$17.5 \times 10^6$ ( $1.2 \times 10^5$ )	$16 \times 10^6$ ( $1.1 \times 10^5$ )
Acero	$30 \times 10^6$ ( $2 \times 10^5$ )	2 300 (191)	2 180 (181)	2 160 (179)	2 100 (174)	1 950 (162)	1 900 (158)
Hierro maleable	$25 \times 10^6$ ( $1.7 \times 10^5$ )	2 180 (181)	2 090 (174)	2 070 (172)	2 020 (168)	1 900 (158)	1 850 (154)
Hierro nodular	$24 \times 10^6$ ( $1.7 \times 10^5$ )	2 160 (179)	2 070 (172)	2 050 (170)	2 000 (166)	1 880 (156)	1 830 (152)
Hierro fundido	$22 \times 10^6$ ( $1.5 \times 10^5$ )	2 100 (174)	2 020 (168)	2 000 (166)	1 960 (163)	1 850 (154)	1 800 (149)
Bronce al aluminio	$17.5 \times 10^6$ ( $1.2 \times 10^5$ )	1 950 (162)	1 900 (158)	1 880 (156)	1 850 (154)	1 750 (145)	1 700 (141)
Bronce al estaño	$16 \times 10^6$ ( $1.1 \times 10^5$ )	1 900 (158)	1 850 (154)	1 830 (152)	1 800 (149)	1 700 (141)	1 650 (137)

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

De la Tabla 32, tenemos que:

$$Z_E = 191$$

$$\phi_t = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \phi_n}{\cos \psi} \right) \quad Z_R = 1 \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\phi_t = 20.65^\circ$$

$$Z_I = \frac{\cos(\phi_t) \sin(\phi_t)}{2 * m_N} * \frac{m_G}{m_G + 1} \quad \text{Ecuación 20}$$

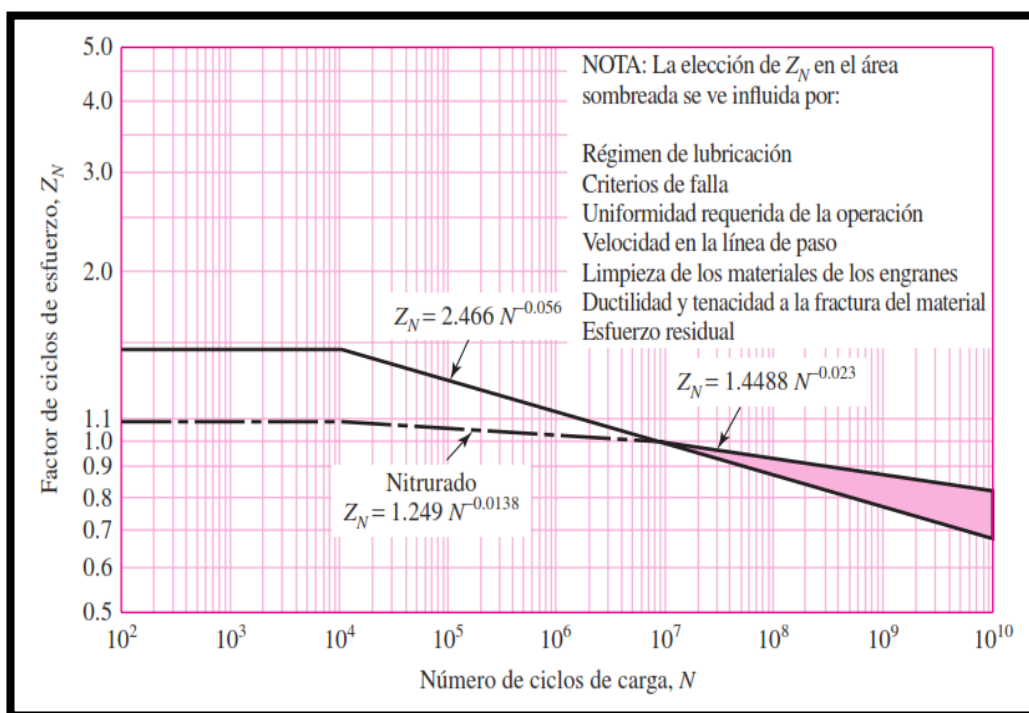
$$Z_I = 0.16$$

$$\sigma_c = Z_E \sqrt{W_t * K_o * K_v * K_s * \frac{K_H * Z_R}{d_{w1} * b * Z_I}} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$\sigma_c = 365.67 \text{ MPa}$$

$$S_c = 2.22 * H_B + 200 \text{ MPa} \quad H_B = 280 \quad \text{Ecuación 22}$$

$$S_c = 821.6 \text{ MPa}$$



**Figura 61 Factor de ciclos de esfuerzo de resistencia a la picadura**

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Con un número de ciclos de carga de  $10^7$

$$Z_N = 1.4488 * N^{-0.025} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$Z_N = 0.97$$

$$S_H = \left( \frac{S_c * Z_N}{Y_\theta * Y_Z} \right) \quad \text{Ecuación 24}$$

$$S_H = 2.54$$

$$n_c = \frac{S_c * Z_N}{\sigma_c} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$n_c = 2.16$$

Para piñones, se compara  $(SF)^2 p$  con  $(SH)^2 p$ .

$$S_F = 6.15 \text{ Vs. } S_H^2 = 6.45$$

De allí que la flexión representa una amenaza en los engranes.

Los cálculos han sido realizados con los datos correspondientes al engrane de 50 dientes.

#### Resumen de las especificaciones de los engranajes

Material empleado para la fabricación de todos los engranes, acero AISI 4340 T y R, con HB=280.

**Tabla 33.**  
**Resumen de las especificaciones de los engranajes para el eje Y**

Descripción	Módulo (m)	Dientes (N)	Ángulo de presión ( $\Phi_n$ )	Ángulo de hélice ( $\psi$ )
<b>Engrane 2</b>				15°
<b>Engrane 4</b>		50		(izquierda)
<b>Engrane 5</b>	0.8		20°	
<b>Engrane 3</b>		125		15° (derecha)

**Tabla 34.**  
Resumen de las especificaciones de los engranajes para el eje X

Descripción	Módulo (m <sub>t</sub> )	Dientes (N)	Ángulo	Ángulo de
			de presión ( $\Phi_n$ )	hélice ( $\psi$ )
Engrane 2	0.8	125	20°	15°
Engrane 3		50		(izquierda)
Engrane 4				15°
Engrane 5				

### Diseño de los ejes

#### Diseño del eje “a” para esfuerzos

**Tabla 35.**  
Propiedades de varios aceros laminados

1	2	3	4	5	6	7	8
SAE y/o		Procesa- miento	Resistencia a la tensión, la fluencia,		Elongación en 2 pulg, %	Reducción en área, %	Dureza Brinell
UNS núm.	AISI núm.		MPa (kpsi)	MPa (kpsi)			
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

El material a usarse para este eje será un acero AISI 1018 CD, cuyas propiedades se describen en la Tabla 35.

Consideramos que los engranes transmiten el par de torsión empleando tornillos de fijación y los cojinetes están localizados y soportados en hombros y se mantienen en su lugar ajustados a presión. Por lo que la carga que soporta el engrane 3 será:

$$W_t = 0.158 \text{ kN}$$

$$W_r = \frac{W_t * \tan(\phi)}{\cos(\psi)} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$W_r = 59.54 \text{ N}$$

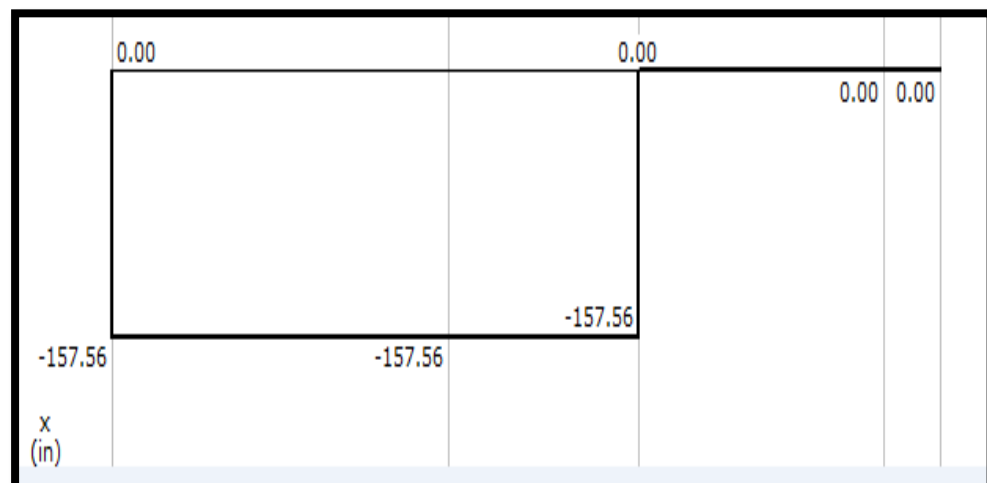
$$W_a = W_t * \tan(\phi) \quad \text{Ecuación 27}$$

$$W_a = 42.34 \text{ N}$$

Cuando se analiza las fuerzas aplicadas sobre el eje en diagramas ortogonales en los planos(x-y) y (x-z) se tiene:

*Cálculo del torque*

$$T = W_t * \frac{d_2}{2} = (158) * \left(\frac{40}{2}\right) = 316 \text{ N.mm}$$



**Figura 62 Torque en el eje a**

Plano X-Y

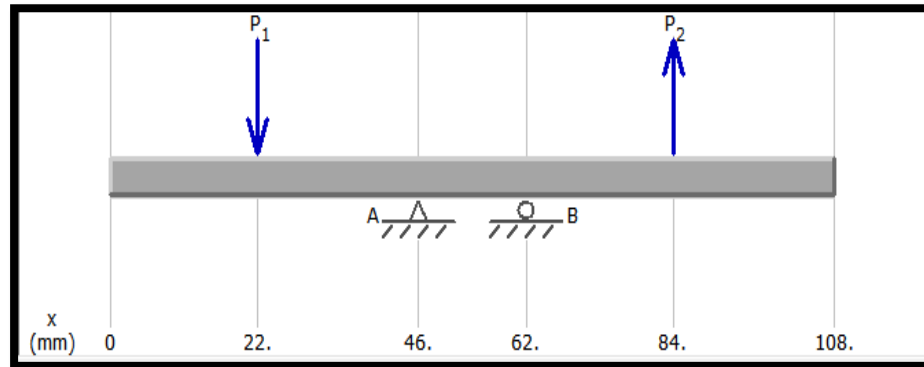


Figura 63 Plano de la disposición X-Y del eje a

$$R_{Ay} = 612.25 \text{ N}$$

$$R_{By} = -612.25 \text{ N}$$

Diagrama de cortante

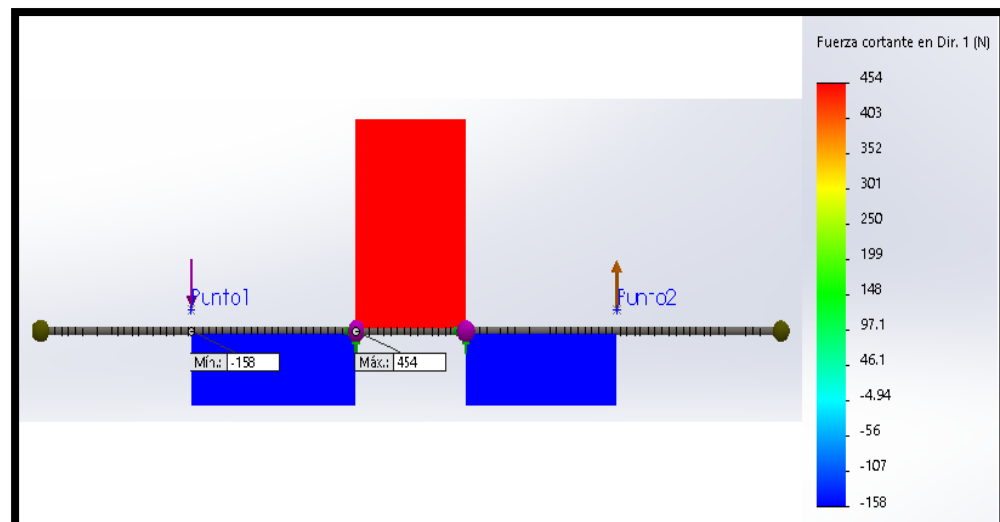


Figura 64 Diagrama de fuerzas cortantes plano X-Y.



### Diagrama de Momento Flector

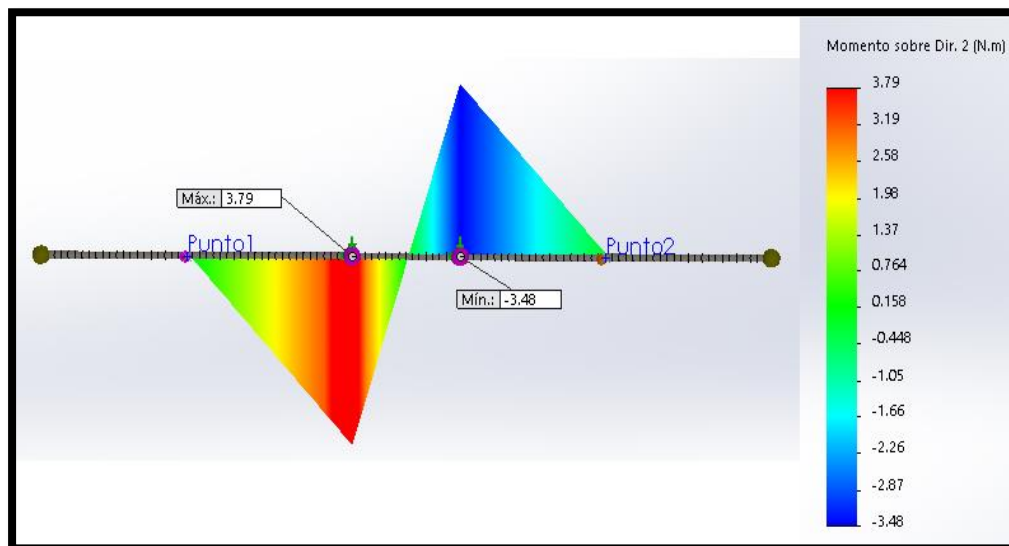


Figura 65. Diagrama de momento flector plano X-Y.

### Plano X-Z

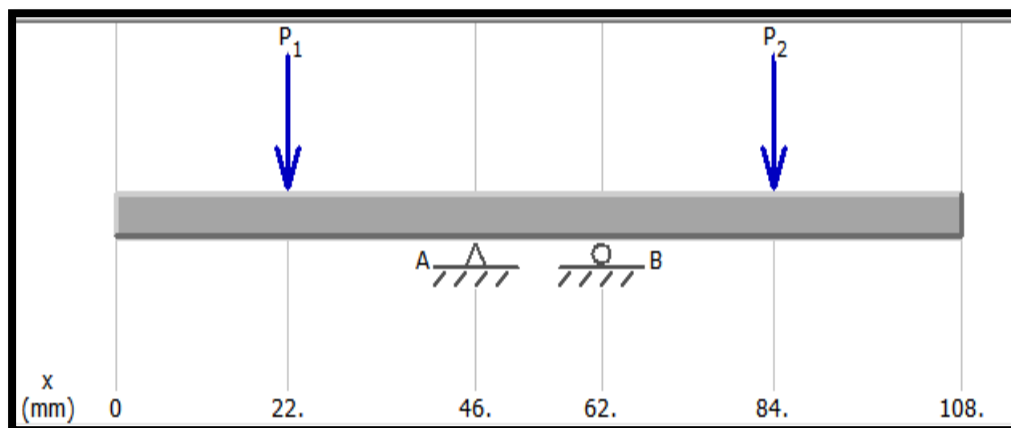
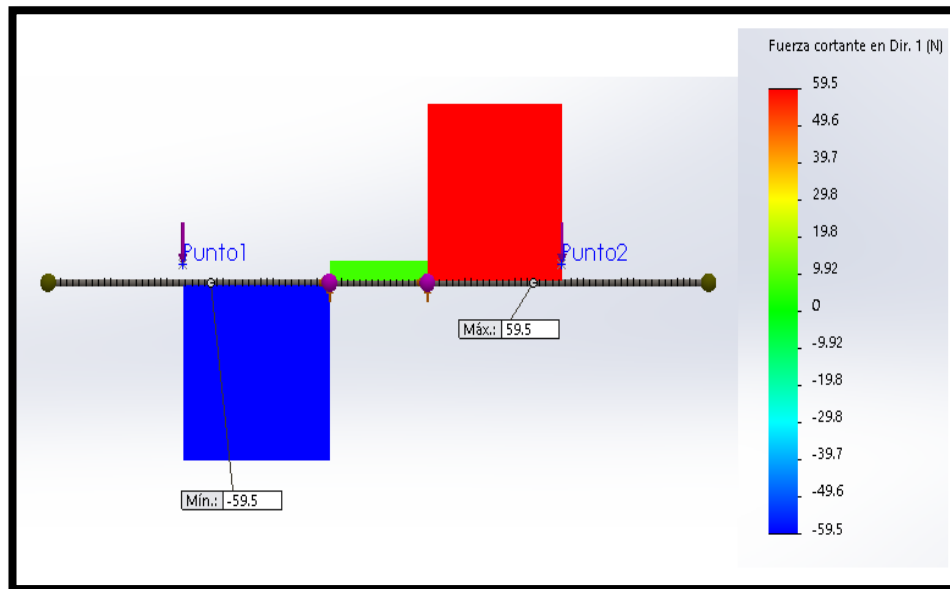


Figura 66. Plano de la disposición X-Z del eje a

$$R_{Az} = 66.98 \text{ N}$$

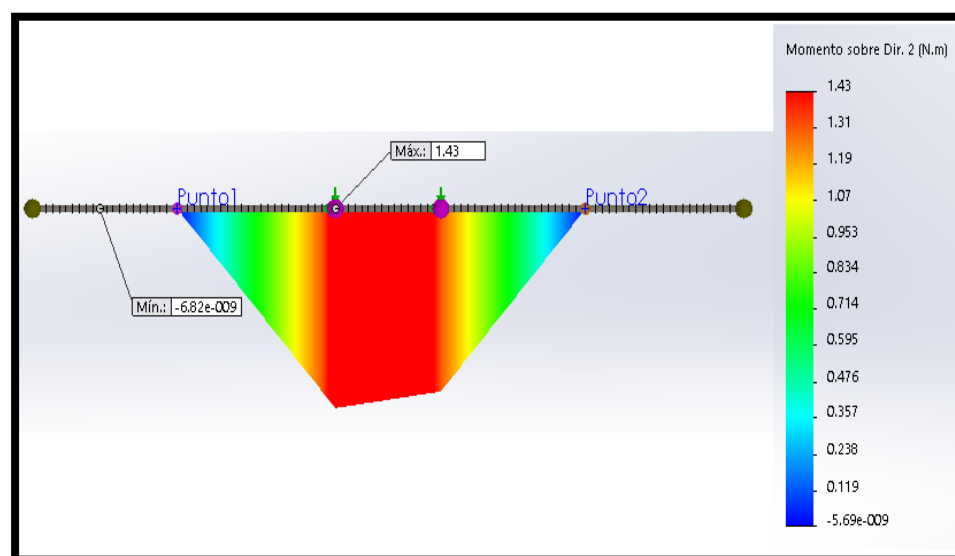
$$R_{Bz} = 52.1 \text{ N}$$

*Diagrama de cortante*



**Figura 67. Diagrama de fuerzas cortantes plano X-Z.**

*Diagrama de Momento Flector*



**Figura 68. Diagrama de momento flector plano X-Z.**

A la distancia de 46 mm:

$$M_{t_{d=3.3}} = \sqrt{3792^2 + 1428^2} = 4052.31 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

### *Punto Crítico*

Se realizará el primer análisis a una distancia de 46 mm debido a que es en ese punto donde se ubica el momento máximo.

$$K_t = K_f = 2.7$$

$$K_{ts} = K_{fs} = 2.2$$

### *Factor de superficie ( $k_a$ )*

De la Tabla 36 tenemos que:

$$k_a = a * S_{ut}^b \quad \text{Ecuación 28}$$

$$k_a = 0.899$$

**Tabla 36.**  
**Parámetros del factor de modificación superficial de Marin**

Acabado superficial	Factor $a$		Exponente $b$
	$S_{ut}$ kpsi	$S_{ut}$ MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o estirado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

### *Factor de tamaño ( $k_b$ )*

Por motivos de diseño se tomara un valor de 0.9 para la primera iteración. Luego de obtener todos los datos se volverá a calcular este valor.

### *Factor de carga ( $k_c$ )*

Al tratarse de flexión,  $k_c = 1$

*Factor de temperatura  $k_d$*

A 20° C  $k_d = 1$

*Factor de confiabilidad ( $k_e$ )*

$$k_e = 0.897$$

**Tabla 37.**  
**Factores de confiabilidad  $k_e$**

Confiabilidad, %	Variación de transformación $z_0$	Factor de confiabilidad $k_e$
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Por lo tanto se obtiene de la ecuación de Marín:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S_e' \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

$$\begin{aligned} S_e' &= 0.5 * S_{ut} && \text{Ecuación 30} \\ S_e' &= 220 \text{ MPa} \\ S_e &= 159.67 \text{ MPa} \end{aligned}$$

*Factor de seguridad*

Se ha trabajado con un factor de diseño  $n = 2$ . Aplicando el Criterio ED-GOODMAN para sacar el primer diámetro aproximado.

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[ 4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[ 4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde:

$$M_m = 0 = T_a$$

$$d = 10 \text{ mm}$$

Con la finalidad de evitar posibles problemas de deflexión debido a lo delgado que resulta el eje se tomara un diámetro un poco mayor al calculado, que en este caso será:

$$d = 12 \text{ mm}$$

Basándose en la relación típica en el hombro propuesta en el libro de Shigley se tiene:

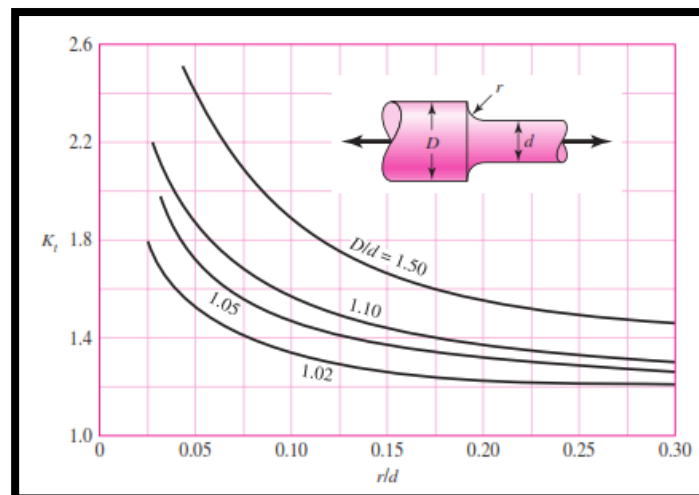
$$\frac{D}{d} = 1.2$$

$$D = 12 \text{ mm}$$

Suponiendo que el radio de filete es diez veces menor al diámetro se tiene:

$$r = \frac{d}{10}$$

$$r = 1.2 \text{ mm}$$



**Figura 69. Eje redondo con filete en el hombro en tensión**

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

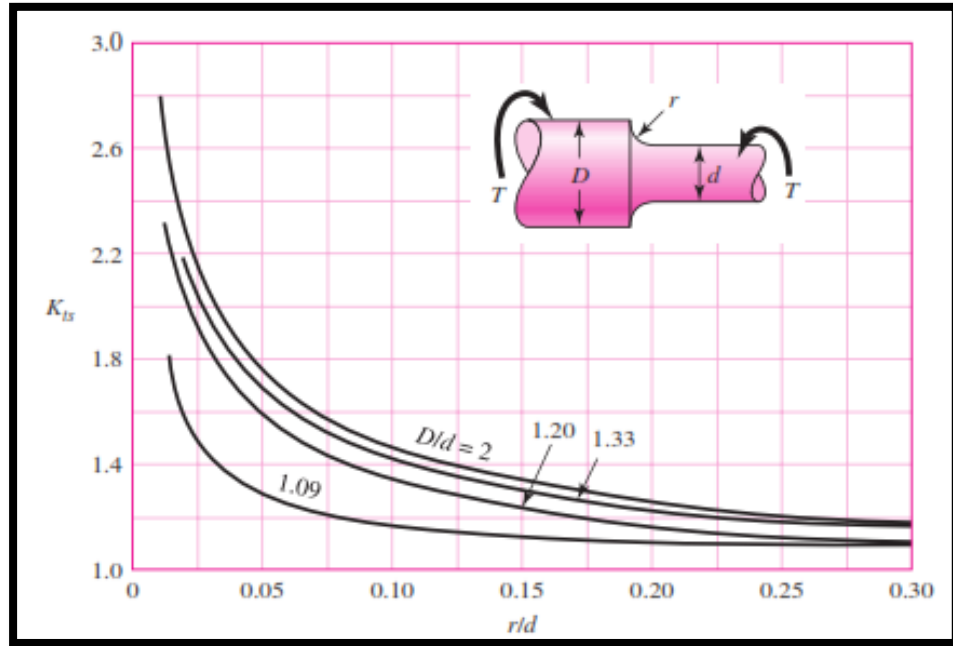


Figura 70. Eje redondo con filete en el hombro en torsión

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

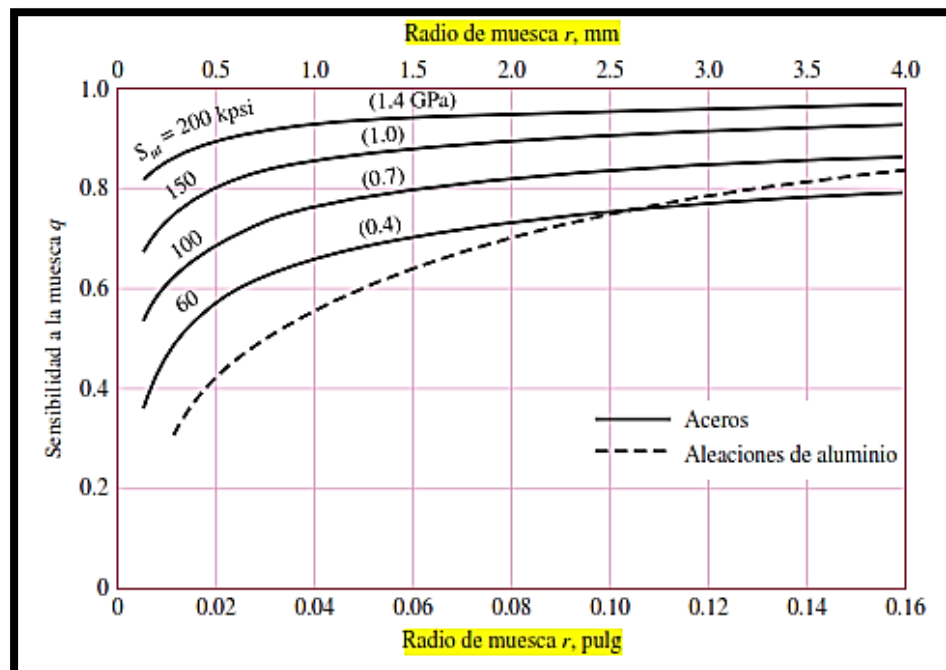
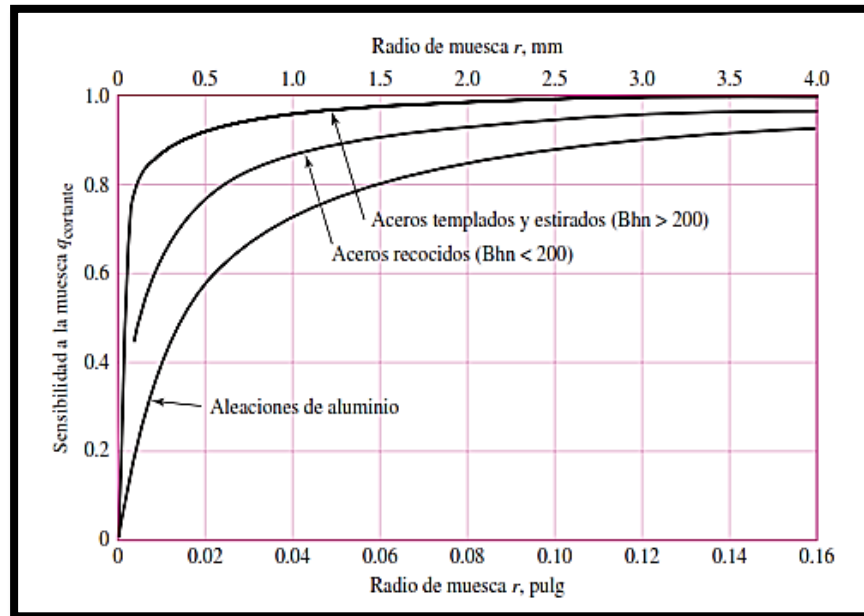


Figura 71. Sensibilidad a la muesca en el caso de aceros y aleaciones de aluminio

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)



**Figura 72. Sensibilidad a la muesca de materiales sometidos a torsión inversa.**

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$q = 0.68$$

Con estos diámetros elegidos se procede a calcular el factor de seguridad real

$$K_t = 1.62 \quad K_{ts} = 1.35$$

$$q = 0.68 \quad qs = 0.7$$

$$k_f = 1 + q * (K_t - 1) \quad \text{Ecuación 32}$$

$$k_{fs} = 1 + qs *$$

$$(K_{ts} - 1) \quad \text{Ecuación 33}$$

$$k_f = 1.42$$

$$k_{fs} = 1.25$$

Con esto se calcula:

$$k_b = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.107} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$k_b = 0.97$$

Y por tanto reemplazando nuevamente en la ecuación de Marin se tiene:

$$Se = 172.09 \text{ MPa}$$

Aplicando las ecuaciones de esfuerzos de Von Mises

$$\sigma'_a = \left[ \left( \frac{32K_f M_a}{\pi d^3} \right)^2 + 3 * \left( \frac{16K_{fs} T_a}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$\sigma'_a = 58.61 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \left[ \left( \frac{32K_f M_m}{\pi d^3} \right)^2 + 3 * \left( \frac{16K_{fs} T_m}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 36}$$

$$\sigma'_m = 3.48 \text{ MPa}$$

Calculando con los datos obtenidos el factor de seguridad real según el criterio de Goodman

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}$$

$$n_f = 2.87$$

### Selección de los cojinetes

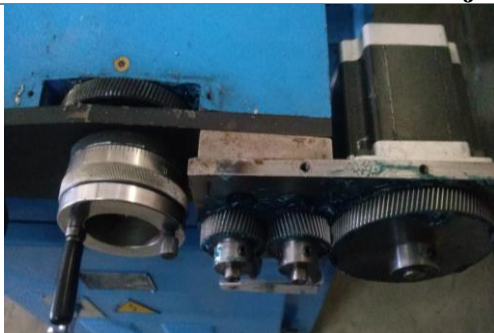
Según los diámetros obtenidos para el diámetro del eje, pues seleccionamos nuestro cojinete del catálogo FAG, escogemos el rodamiento **6000**.

**Tabla 38.**  
**Tabla resumen de las especificaciones de los ejes X e Y**

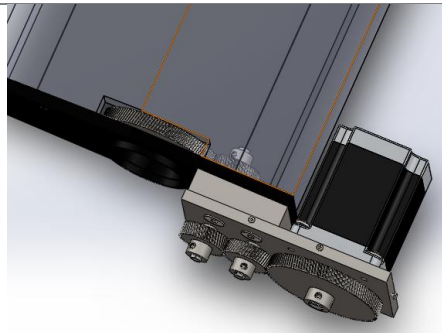
Ejes				
Número de eje	Material	Diámetro d (mm)	Diámetro D (mm)	Factor de seguridad
<b>b</b>	AISI	10	12	2.87
<b>c</b>	1018 CD			



**Tabla 39.**  
**Transmisión de movimiento en el eje Y.**



**Figura 73 Mecanismo de transmisión para el eje Y**

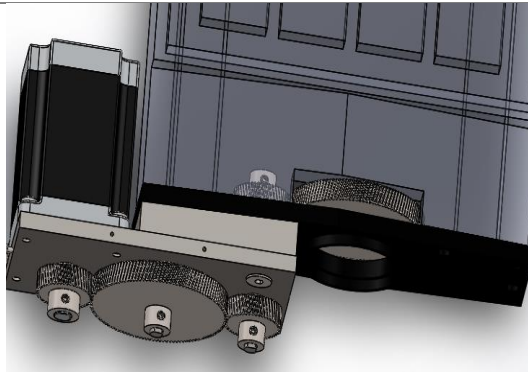


**Figura 74 Diseño CAD para el mecanismo de transmisión del eje Y**

**Tabla 40.**  
**Transmisión de movimiento en el eje X.**



**Figura 75 Mecanismo de transmisión para el eje X**



**Figura 76 Diseño CAD para el mecanismo de transmisión del eje X**

#### 4.1.3 Bobinado del hilo de molibdeno

##### Selección de elementos para el sistema de bobinado de hilo

Una de las mayores limitantes de la máquina era que funcionaba con un motor de 100 VDC, por lo que se realizaba el cambio de giro con muchos relevos, contactores, relés y contadores, por lo que era muy difícil encontrar fallas de operación y todo el control ocupaba demasiado espacio.

Para minimizar estos inconvenientes, en las máquinas actuales de hilo se incorpora un control de velocidad con variador de frecuencia y un motor AC, que permite

escoger hasta 15 velocidades distintas de corte. Los cambios de giro se producen de manera más suave y la pérdida de tiempo oscila entre medio y un segundo.

El sistema de bobinado de hilo de molibdeno debe cumplir las siguientes características de trabajo:

- Voltaje de 220 VAC, Frecuencia de 60 Hz.
- Potencia de ½ HP.
- Rango de velocidad angular: 700-1700 RPM. Este rango se toma como referencia del manual N° 2: DK7716 SM 28 – 9.
- Controlar el bobinado de hilo de molibdeno en revoluciones por minuto.
- Controlar el bobinado de hilo de molibdeno en un rango que será manejado por 3 fines de carrera, para el cambio de dirección.

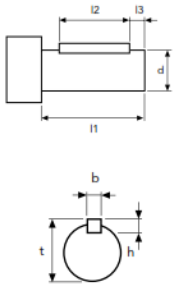
### Dimensionamiento del motor AC

Puesto que la parte mecánica de esa parte de la máquina no se cambiará, se necesita un motor que tenga 14 mm de diámetro en el eje motor. Del manual de motores LAFERT, se elige el modelo de motores que tienen el diámetro del eje rotor de 14 mm, como se muestra en la figura 77:

POSITION AND DIMENSIONS OF KEY

Frame size	Poles	d x l1	b x h	l2	l3	t
56		9 x 20	3 x 3	15	2.5	10.2
63		11 x 23	4 x 4	15	4	12.5
71		14 x 30	5 x 5	20	6	16
80		19 x 40	6 x 6	30	6	21.5
90		24 x 50	8 x 7	40	6	27
100		28 x 60	8 x 7	50	6	31
112		28 x 60	8 x 7	50	6	31
132		38 x 80	10 x 8	70	6	41
160		42 x 110	12 x 8	100	6	45
180		48 x 110	14 x 9	90	5	51.5
200		55 x 110	16 x 10	90	5	59
225	2	55 x 110	16 x 10	90	5	59
225	4	60 x 140	18 x 11	110	5	64
250	2	60 x 140	18 x 11	110	5	64
250	4	65 x 140	20 x 11	110	5	74.5
280	2	65 x 140	18 x 11	110	5	69
280	4	75 x 140	20 x 12	140	5	85
315	2	65 x 140	18 x 11	125	5	69
315	4	80 x 170	22 x 14	160	5	85

Dimensions in mm.



**Figura 77** Tabla de dimensiones del eje.

Fuente: Manual de Motores LAFERT.

Según el mismo manual, se escoge el modelo de motor LAFERT AM 71Z BA4 IEC60034, que se indica en la Tabla 40:

**Tabla 41.**  
**Características Motor LAFERT**

Modelo	<b>TRIFÁSICA</b>	<b>4 polos</b>
Potencia	kW	0.37
	HP	0.50
Tensión	V	208-
		230/440- 460
Corriente	A	2.1/1.1
Frecuencia	Hz	60Hz
Velocidad angular	Rev/min	1630



**Figura 78 Motor LAFERT  
AM 71Z BA4 IEC60034**

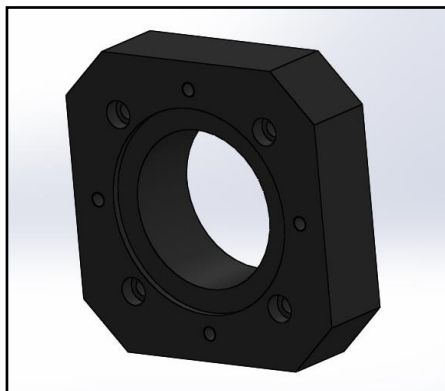
#### Dimensionamiento del acople

El acople que se necesita, debe cuadrar en esta parte de la máquina:



**Figura 79 Acople matrimonio.**

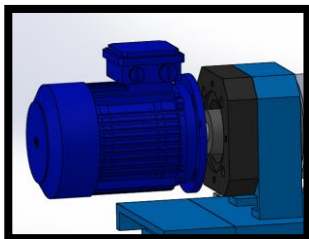
Por lo cual se diseña, un acople nuevo de material acero estructural A36, como se indica en la figura:



**Figura 80 Acople para motor LAFERT (matrimonio)**

Se obtiene un perfecto conjunto de elementos, mostrado en el diseño CAD de la figura:

**Tabla 42.**  
**Diseño de bobinado del hilo de molibdeno**



**Figura 81 Diseño CAD del sistema de bobinado del hilo de molibdeno**



**Figura 82 Sistema construido de bobinado del hilo de molibdeno**


### Dimensionamiento del variador de frecuencia

El variador de frecuencia ayuda a:

- Activación del motor AC.
- Controlar los fines de carrera tanto para cambio de dirección del motor AC, como para el paro de emergencia si el bobinado se sale de rango.
- Controlar la velocidad angular en RPM.

Se elige el variador de frecuencia ACS55 de ABB, como se muestra en la Tabla 43:

**Tabla 43.**  
**Variador de Frecuencia ABB y sus características**

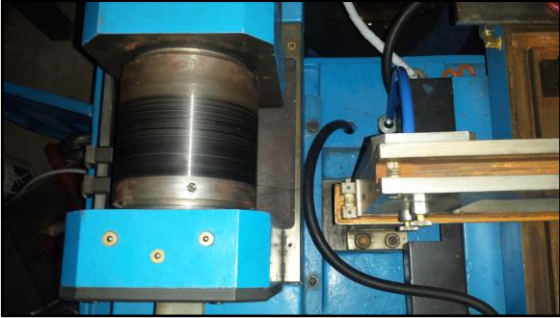


<b>Potencia</b>	<b>0.5kW</b>	
<b>Alimentación:</b>	Monofásica, 110 a 120VAC y 200 a 240VAC.	
<b>Filtro EMC integrado de 1er entorno (C1):</b>	Adecuado para aplicaciones residenciales y comerciales monofásicas.	
<b>Diseño</b>	Compacto y estilizado.	
<b>Montaje</b>	Con tornillos o carril DIN y lado con lado.	
<b>Reducción del ruido del motor</b>	Mediante frecuencia de conmutación elevada.	
<b>Configuración</b>	Mediante potenciómetros e interruptores.	

**Figura 83 Variador de frecuencia ABB.**

#### Recorrido del Hilo de Molibdeno

El hilo de molibdeno de 0.012 mm alcanza una tensión necesaria para el proceso, gracias al enhebrado que se realiza a través de poleas.

**Tabla 44.**  
**Recorrido del hilo de molibdeno**

<b>Imagen</b>	<b>Característica</b>
	Ingreso del hilo a las poleas para lograr la tensión adecuada.
	Recorrido del hilo por las poleas.
	Tensión del hilo de molibdeno entre las dos poleas principales, ubicadas en el área de trabajo.

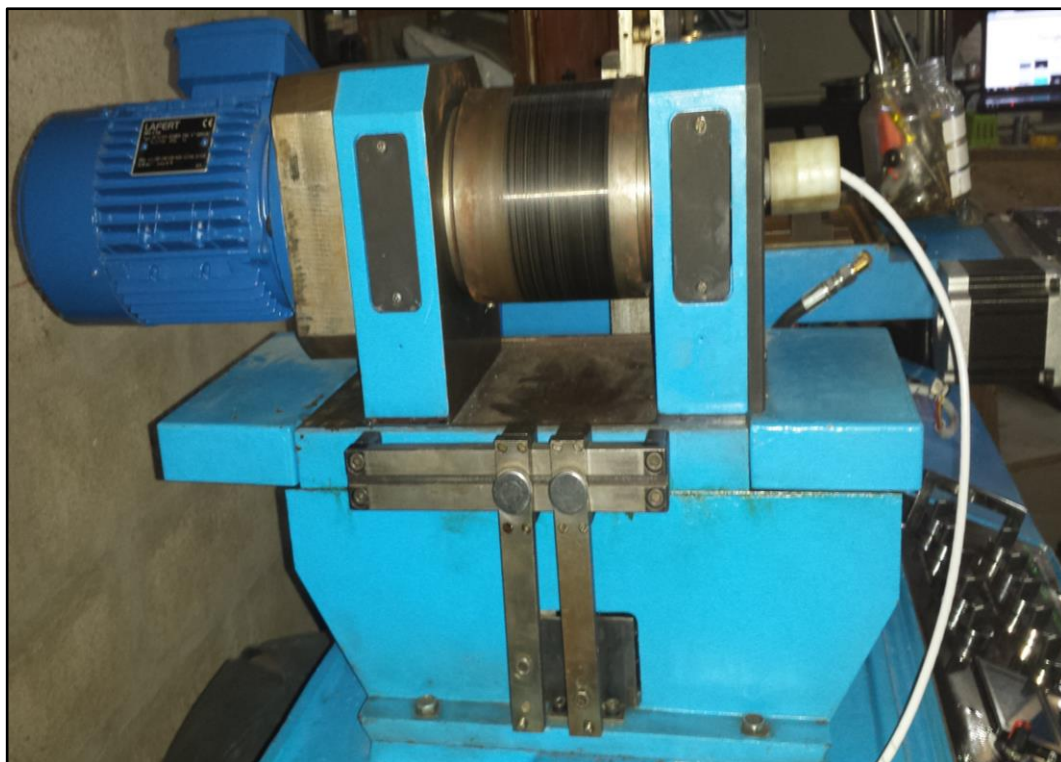
**Figura 84** Ingreso del hilo a las poleas.

**Figura 85** Recorrido del hilo de polea a polea.

**Figura 86** Tensión del hilo entre las poleas principales.



### Implementación del sistema de bobinado de hilo de molibdeno



**Figura 87 Sistema de Bobinado de hilo de molibdeno.**

### Selección del control numérico computarizado (CNC)

Este sistema debe cumplir con características indispensables para controlar y monitorear la máquina herramienta.

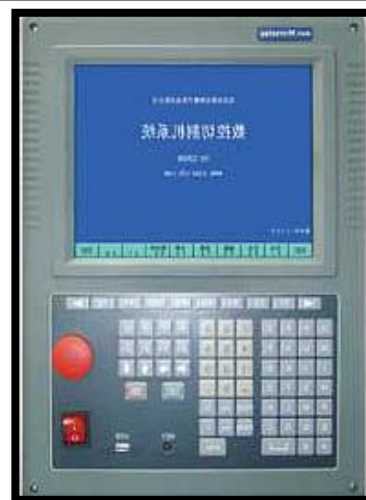
### *Selección de Equipos*

Se escoge el controlador numérico MICROSTEP SH-2200H, que se indica en la tabla 45:

Tabla 45.

**Diseño del sistema de circulación y filtrado de dieléctrico.**

<b>Alimentación:</b>	Posee un chip ARM de bajo consumo industrial a 220 VAC.
<b>Fiabilidad:</b>	Alta, muy usado para máquinas-herramientas de corte por descarga eléctrica.
<b>Funciones</b>	Compensación de corte, selección de puntos de trabajo para el inicio del corte y alineación de placa de trabajo. Ajuste de velocidad de corte y remoción de material.
<b>Ejecución:</b>	De esquemas programados en código G y librería de formas guardadas en la memoria del controlador.
<b>Control de Entradas:</b>	Fines de carrera y paro de emergencia para todo el sistema. 16 entradas a 24 V.
<b>Control de Salidas:</b>	4 motores a pasos y 16 salidas a 24 V, para manejo de elementos externos, como relés y otros.
<b>Manual:</b>	Completo para la conexión de elementos.
<b>Idiomas:</b>	Inglés y Chino
<b>Memoria:</b>	32MB de almacenamiento de memoria, por lo que un programa de corte puede tener hasta 10000 líneas de código.

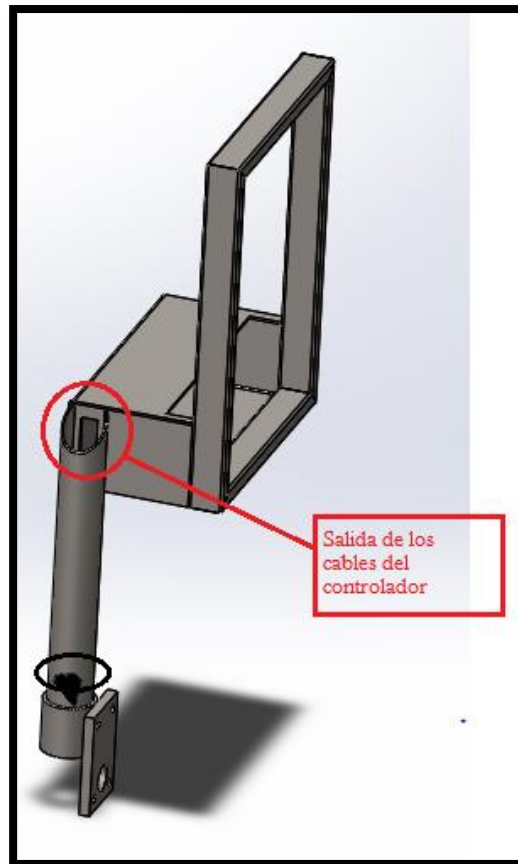


**Figura 88 Controlador numérico MICROSTEP SH-2200H**

Habiendo escogido el controlador, se procede con el diseño del soporte del mismo, este debe permitir al operador maniobrar el controlador cómodamente desde diferentes posiciones, además, debe acoplarse a la estructura de la máquina.

Por ello optamos por la siguiente estructura:





**Figura 89** Diseño CAD del soporte para el controlador



**Figura 90** Soporte del controlador acoplado en la máquina

## 4.2 DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO, ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

En el siguiente diagrama de bloques se detalla la configuración de los elementos del sistema de control y potencia de la máquina electroerosionadora:

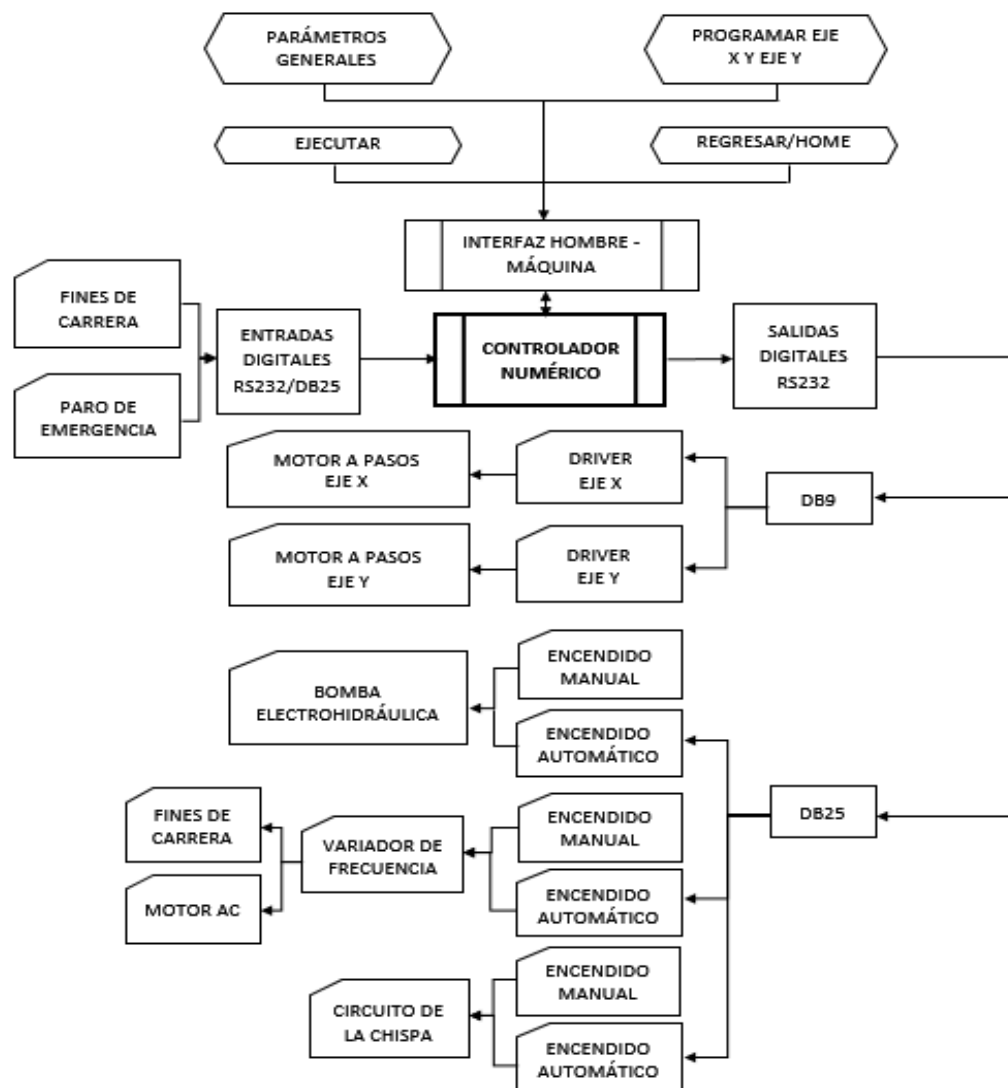


Figura 91 Diagrama de bloques del sistema eléctrico, electrónico y de potencia.

#### 4.2.1 Sistema de control

##### Controlador numérico

Para entrada y salida de datos, el controlador numérico usa el protocolo RS-232, que es un estándar mundial que rige parámetros de comunicación serial de datos.

El controlador numérico tiene 16 entradas y 16 salidas, que se habilitan cuando su estado es 1 y se inhabilitan cuando su estado es 0, como se muestra en la figura 92:

OUT:	M10	M12	M14	M16	M20	M18	M22	M24
	0	0	0	0	0	0	0	0
	M32	M34	M36	M38	M40	M42	M44	M46
	0	0	0	0	0	0	0	0
INPUT:	X>+	-<X	Y>+	-<Y	DLZ	STO	PAS	STA
	1	1	1	1	1	1	1	1
	SX+	SX-	SY+	SY-	SP+	SP-	DUP	DDN
	1	1	1	1	1	1	1	1

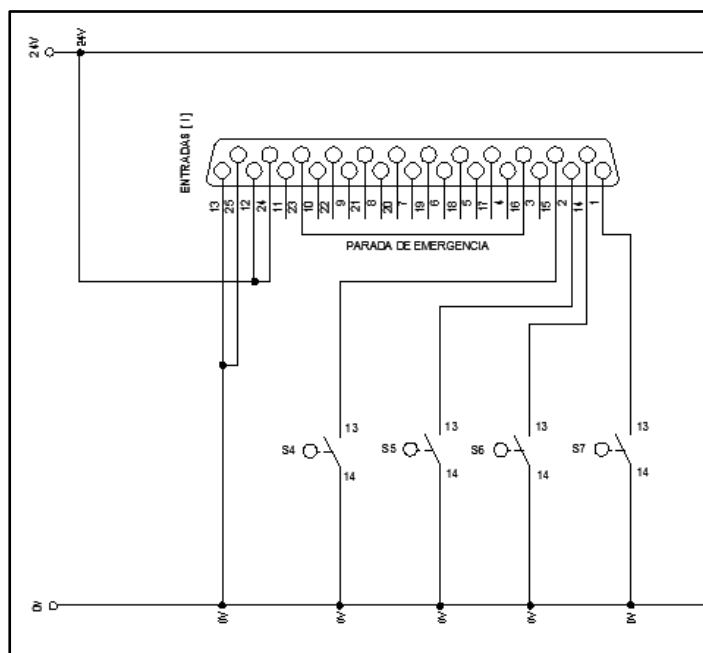
Figura 92 Entradas y Salidas del controlador numérico.

##### Entradas

Usa conectores DB25 y se conecta una fuente de 24 V, la cual energiza cuando se activan las entradas.

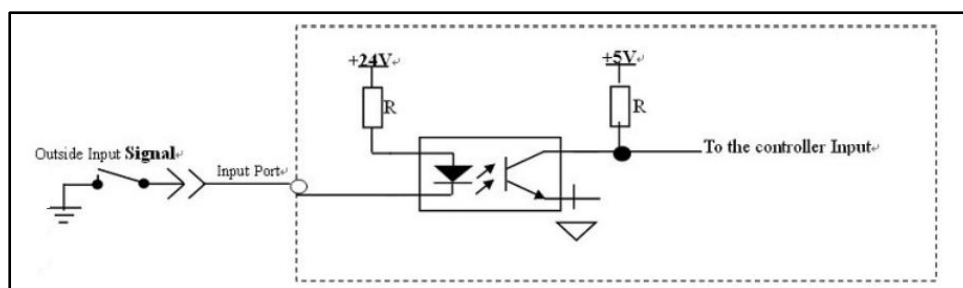
**Tabla 46.**  
**Descripción de los fines de carrera**

Fines de Carrera	Función
<b>S4</b>	Límite de desplazamiento 0 mm en Y.
<b>S5</b>	Límite de desplazamiento 200 mm en Y.
<b>S6</b>	Límite de desplazamiento 0 mm en X.
<b>S7</b>	Límite de desplazamiento 160 mm en X.



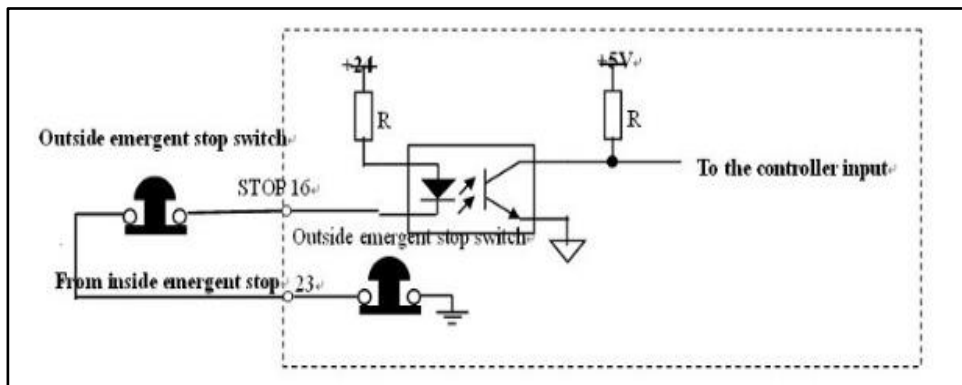
**Figura 93 Entradas – Finales de carrera.**

*Fines de carrera:* Ayudan a determinar los límites de desplazamiento tanto en el eje x, como en el eje y. A continuación se detalla el circuito de los pines de entrada al controlador (ver figura 94):



**Figura 94 Circuito de los pines de entrada al controlador numérico.**

*Parada de emergencia:* Es un pulsador con memoria. Ayuda a desconectar automáticamente el controlador numérico, en condiciones anormales de funcionamiento, es decir, cuando aparece una situación de peligro tanto para el operario como para la máquina. A continuación se detalla el circuito de paro de emergencia (ver figura 95):

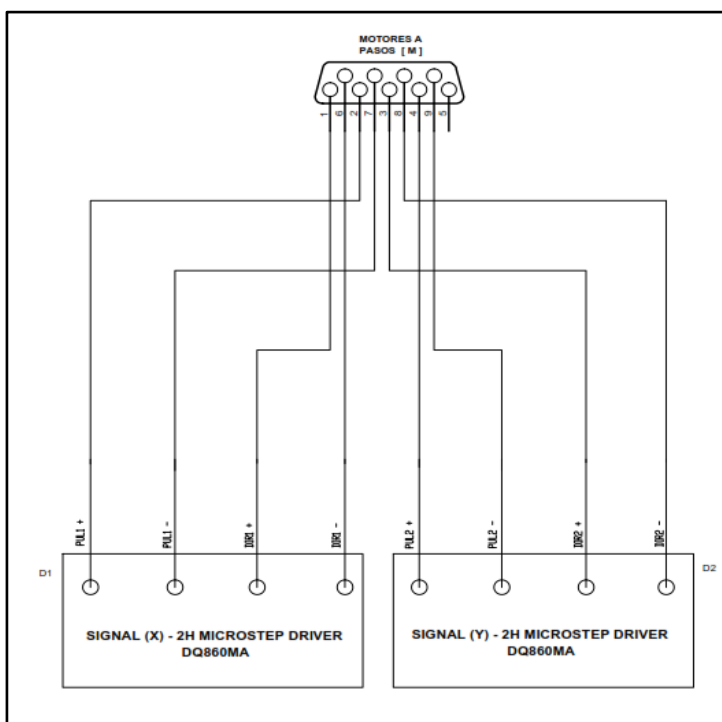


**Figura 95 Circuito del paro de emergencia.**

Salidas

Se usan 2 tipos de conectores, como se indica a continuación:

*Conector DB9:* Aquí se conectan las señales de pulsos y direcciones, vinculados a los drivers de los motores a pasos (ver figura 96).

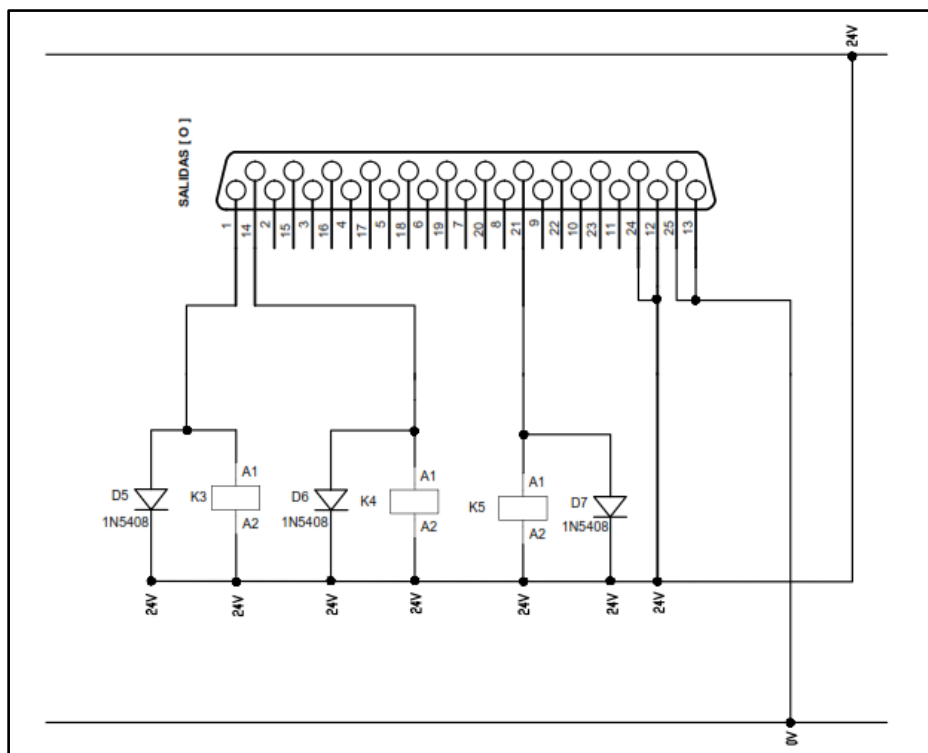


**Figura 96. Conector DB9**

*Conector DB25:* Aquí se conectan los relés que activarán el encendido automático de los controles de la máquina (ver tabla 46).

**Tabla 47.**  
**Descripción del circuito**

Elemento	Función
<b>Fuente de 24 V</b>	Energiza el circuito de control de bobinado de hilo de molibdeno.
<b>Diodo 1N5408</b>	Evita que se regrese la corriente de trabajo y dañe las bobinas. Se conecta de forma antiparalela al relé.
<b>Bobina de relé K3</b>	Encendido automático Bomba Pedrollo.
<b>Bobina de relé K4</b>	Encendido automático Circuito de la Chispa.
<b>Bobina de relé K5</b>	Encendido automático del Variador de frecuencia, fines de carrera y motor AC.

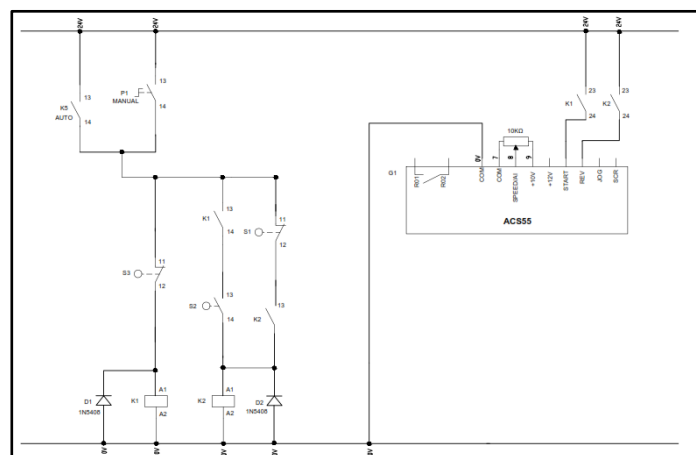


**Figura 97 Salidas a relés.**

## Circuito de Control de Bobinado de hilo de molibdeno

**Tabla 48.**  
**Elementos de control de bobinado de hilo de molibdeno**

<b>Elemento</b>	<b>Función</b>
<b>Fuente de 24 V</b>	Energiza el circuito de control de bobinado de hilo de molibdeno.
<b>Contacto normalmente abierto del relé K5</b>	Activa el encendido automático del circuito con la señal que viene del controlador numérico.
<b>Pulsador de enclavamiento P1</b>	Activa el encendido manual del circuito de control de bobinado de hilo de molibdeno.
<b>Diodo 1N5408</b>	Evita que se regrese la corriente de trabajo y dañe las bobinas. Se conecta de forma antiparalela al relé.
<b>Relé K1</b>	Activa el encendido del variador de frecuencia, que a su vez activa el motor AC.
<b>Relé K2</b>	Activa el cambio de giro del motor AC.
<b>Final de carrera S1</b>	Activa el cambio de giro en sentido horario.
<b>Final de carrera S2</b>	Activa el cambio de giro en sentido antihorario.
<b>Final de carrera S3</b>	Paro de emergencia del variador de frecuencia.
<b>Potenciómetro de 10KΩ</b>	Controla la velocidad angular (RPM) del motor AC.



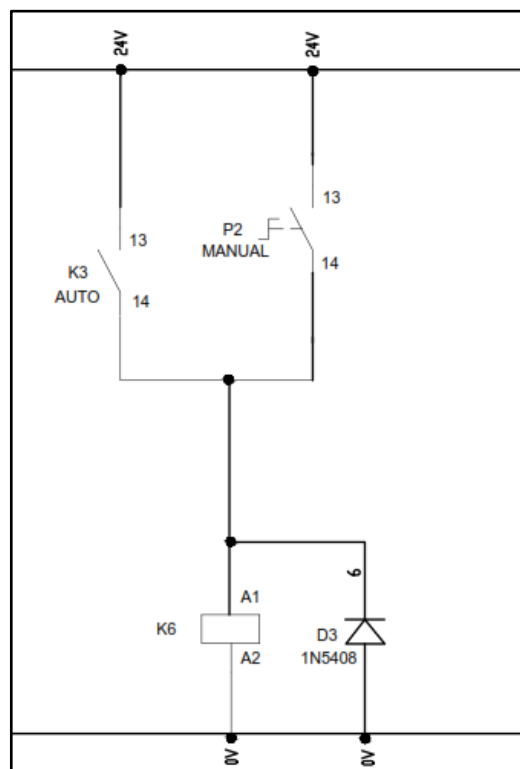
**Figura 98 Control de bobinado de hilo de molibdeno.**

### Circuito de Control de Circulación y filtrado de fluido dieléctrico

**Tabla 49.**

**Elementos de control de Circulación y filtrado de fluido dieléctrico**

<b>Elemento</b>	<b>Función</b>
<b>Fuente de 24 V</b>	Energiza el circuito de control de bobinado de circulación y filtrado de fluido dieléctrico.
<b>Contacto normalmente abierto del relé K3</b>	Activa el encendido automático del circuito con la señal que viene del controlador numérico.
<b>Pulsador de enclavamiento P2</b>	Activa el encendido manual del circuito de control de circulación y filtrado de fluido dieléctrico.
<b>Diodo 1N5408</b>	Evita que se regrese la corriente de trabajo y dañe las bobinas. Se conecta de forma antiparalela al relé.
<b>Relé K6</b>	Activa el contactor KM1, en el circuito de potencia.



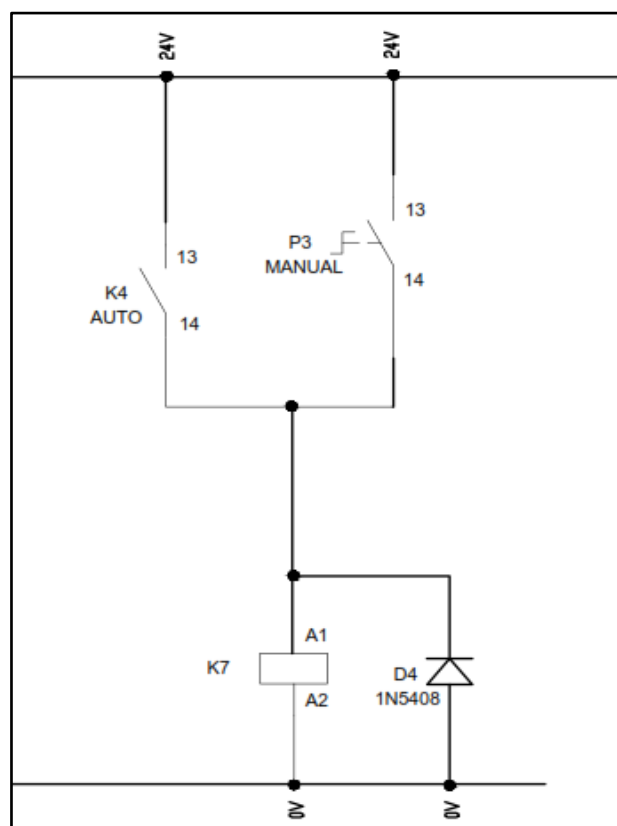
**Figura 99** Circuito de control de Circulación y filtrado de fluido dieléctrico



## Control de encendido del circuito de la chispa

**Tabla 50.**  
**Elementos de encendido del circuito de la chispa**

Elemento	Función
<b>Fuente de 24 V</b>	Energiza el circuito de control del encendido del circuito de la chispa.
<b>Contacto normalmente abierto del relé K4</b>	Activa el encendido automático del circuito de la chispa.
<b>Pulsador de enclavamiento P3</b>	Activa el encendido manual del circuito de la chispa.
<b>Diodo 1N5408</b>	Evita que se regrese la corriente de trabajo y dañe las bobinas. Se conecta de forma antiparalela al relé.
<b>Relé K7</b>	Activa el contactor KM2, en el circuito de potencia.



**Figura 100** Circuito de encendido del circuito de la chispa.

### Dimensionamiento de Relés

Los relés sirven para activar los circuitos de control, por lo que sus bobinas consumen 24 V a 0.5 A. Teniendo 7 relés, se obtiene la corriente de trabajo con la Ecuación 37:

$$I_{Relés} = \sum I_{Relé\ 1-7} \quad \text{Ecuación 37}$$

$$I_{Relés} = 0.5\ A * 7$$

$$I_{Relés} = 3.5\ A$$

## 4.2.2 Sistema de potencia

### Dimensionamiento de Elementos

#### Ventilador

El ventilador es un mecanismo que sirve para conservar la temperatura de los componentes del sistema de control y de potencia, lo que ayuda al funcionamiento eficiente de los mismos.

Se elige un ventilador de 110 VAC a 0.3 A, como se muestra en la figura:



**Figura 101 Ventilador 110 VAC.**

## Contactores

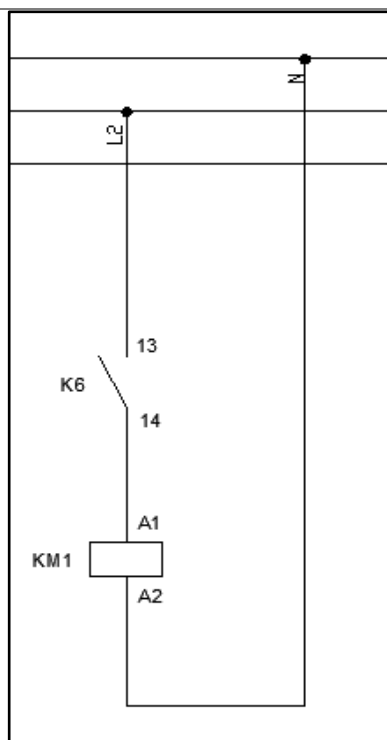
Se dimensionan de acuerdo a la corriente del elemento que controla. Se usa la ecuación 38:

$$I_{\text{Contactor}} = 1.25 * I_n \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde:  $I_n$  = Intensidad nominal del elemento

**Tabla 51.**  
**Dimensionamiento del Contactor KM1**

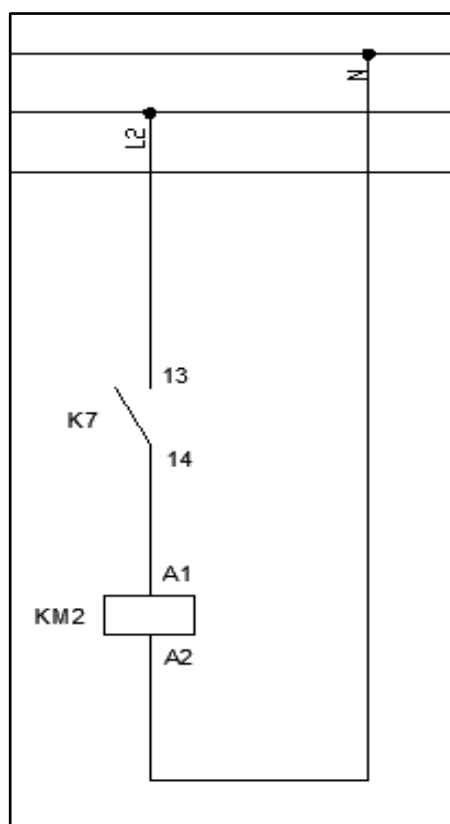
Contactor	Función	Dimensionamiento
<b>KM1</b>	Activa la bomba electrohidráulica Pedrollo.	$I_{n \text{ Bomba}}$ = Corriente de la bomba Pedrollo
		$I_{n \text{ bomba}} = 5.5 \text{ A}$
		Usando la ecuación 38:
		$I_{\text{Contactor KM1}} = 1.25 * 5.5 \text{ A}$
		$I_{\text{Contactor KM1}} = 6.875 \text{ A}$
		<b><math>I_{\text{Contactor KM1}} = 9 \text{ A}</math></b>



**Figura 102 Circuito del contactor KM1.**

**Tabla 52.**  
**Dimensionamiento del Contactor KM2**

Contactor	Función	Dimensionamiento
<b>KM1</b>	Activa el circuito de la chispa	$I_{n \text{ chispa}} = \text{Corriente del circuito de la chispa}$ $I_{n \text{ chispa}} = 3 \text{ A}$ Usando la ecuación 38: $I_{\text{Contactor KM2}} = 1.25 * 3 \text{ A}$ $I_{\text{Contactor KM2}} = 3.75 \text{ A}$ $I_{\text{Contactor KM2}} = 9 \text{ A}$



**Figura 103 Circuito del contactor KM2.**

En la siguiente tabla resumen se muestra las características para escoger los contactores:

**Tabla 53.**  
**Resumen de dimensionamiento de contactores.**

Símbolo	Corriente	
	Valor calculado	Valor comercial
KM1	6.88 A	9 A
KM2	3.75 A	9 A

### Fuentes de Poder

**Tabla 54.**  
**Dimensionamiento de las fuentes**

Fuente	Función	Dimensionamiento
		$I_{motora\ paso} =$ Corriente de los motores a pasos
<b>Fuente de 60 V:</b>	Alimenta a los drivers de los motores a paso:	$I_{motora\ paso} = 5.8\ A$ $I_{fuente60} = I_{motora\ paso}$ $I_{fuente60} = 5.8\ A$ $I_{fuente60} = \mathbf{5.85\ A}$
<b>Fuente de 24 V:</b>	Alimenta a todo el sistema de control.	$I_{fuente24} = I_{Relés}$ $I_{fuente24} = 3.5A$ $I_{fuente24} = 3.5\ A$ $I_{fuente24} = \mathbf{8.3\ A}$

En la siguiente tabla resumen se muestra las características para escoger las fuentes de poder:

**Tabla 55.**  
**Resumen de dimensionamiento de fuentes.**

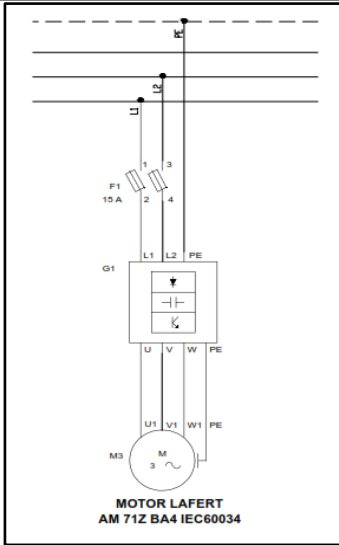
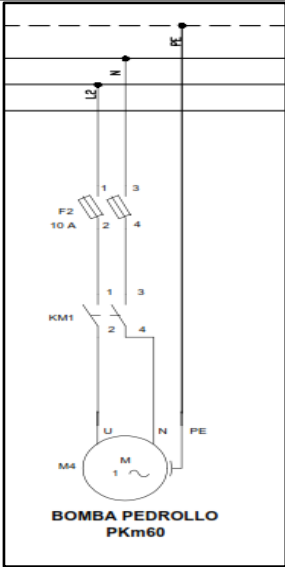
Símbolo	Corriente	
	Valor calculado	Valor comercial
<b>Fuente 60 V</b>	5.8 A	5.85 A
<b>Fuente 24 V</b>	3.5 A	8.3 A

Fusibles

Para escoger el fusible correcto se usa la ecuación 39:

$$I_{fusible} = (1.75 * I_{n\ mayor}) + \sum I_{n\ sobrantes} \quad \text{Ecuación 39}$$

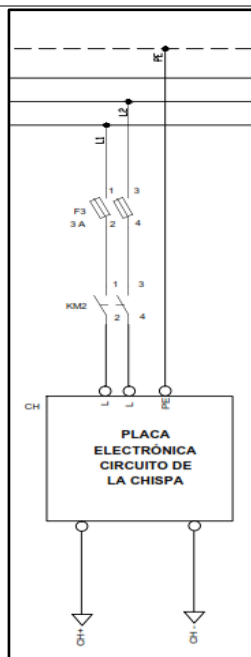
**Tabla 56.**  
**Dimensionamiento de los fusibles**

Circuito	Función	Dimensionamiento
<p><i>Circuito de potencia de Bobinado de hilo de molibdeno</i></p>		<p><math>I_{VF}</math> = Corriente del variador de frecuencia</p> <p><math>I_{n\ Motor\ AC}</math> = Corriente del motor AC Lafert</p> <p><math>I_{VF} = 6.9\ A</math></p> <p><math>I_{n\ Motor\ AC} = 1.25\ A</math></p> <p>Usando la ecuación 39:</p> <p><math>I_{fusible\ hilo} = (1.75 * I_{VF}) + I_{n\ Motor\ AC}</math></p> <p><math>I_{fusible\ hilo} = (1.75 * 6.9)A + 1.25A</math></p> <p><math>I_{fusible\ hilo} = 13.325\ A</math></p> <p><math>I_{fusible\ hilo} = 15\ A</math></p>
<p><i>Circuito de potencia de Circulación y filtrado de fluido dieléctrico</i></p>		<p><math>I_{n\ Bomba}</math> = Corriente de la bomba Pedrollo</p> <p><math>I_{n\ Bomba} = 5.5\ A</math></p> <p>Usando la ecuación 39:</p> <p><math>I_{fusible\ Bomba} = (1.75 * I_{n\ Bomba}) + 0</math></p> <p><math>I_{fusible\ Bomba} = (1.75 * 5.5)A</math></p> <p><math>I_{fusible\ Bomba} = 9.625\ A</math></p> <p><math>I_{fusible\ Bomba} = 10\ A</math></p>

**Figura 104 Fusibles circuito de bobinado de hilo.**

**Figura 105 Fusibles circuito de circulación de dieléctrico.**

*Circuito de potencia del encendido del circuito de la chispa*



$I_{n \text{ Chispa}} =$  Corriente del Circuito de la Chispa

$$I_{n \text{ Chispa}} = 3 \text{ A}$$

Usando la ecuación 39:

$$I_{\text{fusible Chispa}} = (1.75 * I_{n \text{ Chispa}}) + 0$$

$$I_{\text{fusible Chispa}} = (1.75 * 3) \text{ A}$$

$$I_{\text{fusible Chispa}} = 5.25 \text{ A}$$

$$I_{\text{fusible Chispa}} = 6 \text{ A}$$

**Figura 106 Fusibles circuito de la chispa.**

En la siguiente tabla resumen se muestra las características para escoger las fuentes de poder:

**Tabla 57. Resumen de dimensionamiento de fusibles.**

Símbolo	Corriente	
	Valor calculado	Valor comercial
<b>Fusible hilo – motor AC</b>	13.325 A	15 A
<b>Fusible bomba</b>	9.625 A	10 A
<b>Fusible chispa</b>	5.25 A	6 A

### Disyuntor

Para calcular la corriente que pasará por el disyuntor, es decir, la intensidad que pasará por el interruptor principal que alimentará al circuito, se usa la siguiente fórmula:

$$I_{disyuntor} = (1.25 * I_{n\ mayor}) + \sum I_{n\ sobrantes} \quad \text{Ecuación 40}$$

$$I_{disyuntor} = (1.25 * I_{Fuente\ 24}) + [I_{n\ Bomba} + (I_{Fuente\ 60} * 2) + I_{VF} + I_{Motor\ AC} + I_{n\ Chispa} + I_{n\ CNC} + I_{Ventilador}] A$$

$$I_{disyuntor} = [(1.25 * 8.3) + 5.5 + (5.85 * 2) + 6.9 + 1.25 + 3 + 0.7 + 0.3] A$$

$$I_{disyuntor} = 39.725$$

$$I_{disyuntor} = 40 A$$



**Figura 107 Disyuntor para 40 A.**

### Potencia Eléctrica

Para proteger la instalación eléctrica interna y recibir una calidad de servicio adecuada, es muy útil calcular la potencia eléctrica del consumo de la máquina.

Teniendo en cuenta que el valor mínimo de factor de potencia exigido por las empresas proveedoras de energía es de 0.95, se tiene la siguiente expresión:

$$P = V * I * \cos(\varphi) \quad \text{Ecuación 41}$$

**Tabla 58.**  
**Potencia eléctrica**

Símbolo	Variable	Valor
<b>P</b>	Potencia activa de consumo eléctrico	A calcular
<b>V</b>	Voltaje monofásico	220 [VAC]
<b>I</b>	Intensidad de la corriente que fluye por la máquina, que pasa por el disyuntor principal (ecuación 40)	40 [A]
$\cos(\phi)$	Factor de potencia	0.95



Usando la información de la tabla 57 y la ecuación 41, se obtiene:

$$P = 220V * 40A * 0.95$$

$$P = 8.4 [kW]$$

### Conductores Eléctricos

Es necesario dimensionar los conductores eléctricos de acuerdo al calibre AWG, que indica con un número el diámetro del conductor. En la Tabla 58 se muestran los principales parámetros para escoger conductores eléctricos.

**Tabla 59.**  
**Dimensionamiento de cables.**

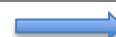
Calibre AWG ó MCM	Sección mm <sup>2</sup>	FORMACION	ESPEJOR AISLAMIENTO mm	DIAMETRO EXTERIOR mm	PESO TOTAL Kg/Km	Capacidad de corriente		TIPO CABLE	Altern. de embal.
		No. de Hilos por diámetro en mm.				Para 1 cond. al aire libre Amp.	Para 3 cond. en conduit Amp.		
20	0.52	1 x 0.813	0.76	2.33	9.81	6	7	TF	A,E
18	0.82	1 x 1,02	0.76	2.54	13.16	6	7	TF	A,E
16	1.31	1 x 1,29	0.76	2.81	18.10	10	8	TF	A,B
14	2.08	1 x 1,63	0.76	3.15	26.10	20	15	TW	A,B
12	3.31	1 x 2,05	0.76	3.57	38.30	25	20	TW	A,C
10	5.26	1 x 2,59	0.76	4.11	57.40	40	30	TW	A,D
8	8.34	1 x 3,26	1.14	5.54	95.20	60	40	TW	A,B

Fuente: (Disensa, 2013)

Según la tabla anterior, se obtiene una nueva tabla, donde se escoge el calibre de cada elemento del sistema de control y de potencia:

**Tabla 60.**  
**Resumen de dimensionamiento de cableado de toda la máquina.**

Símbolo	Componente	Corriente [A]		Tipo de calibre de cable
		Valor de trabajo	Valor comercial	
<b>K1 hasta K7</b>	Relé	0.5	6	AWG 18
<b>KM1 – KM2</b>	Contactador	9	10	AWG 16
<b>F1</b>	Fusible	15	20	AWG 14



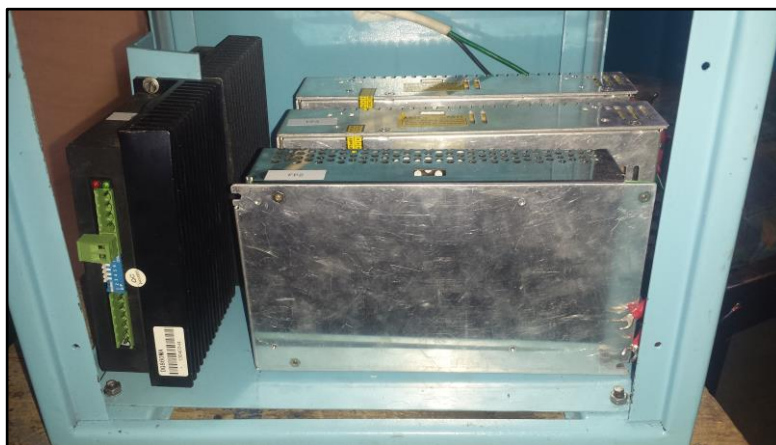
<b>F2</b>	Fusible	10	10	AWG 16
<b>F3</b>	Fusible	6	10	AWG 16
<b>G1</b>	Variador de frecuencia	6.9	10	AWG 16
<b>M1</b>	Motor a pasos	5.8	10	AWG 16
<b>M2</b>	Motor a pasos	5.8	10	AWG 16
<b>M3</b>	Motor AC	1.25	10	AWG 16
<b>M4</b>	Bomba electrohidráulica	5.5	10	AWG 16
<b>D1</b>	Driver de motor a pasos	5.8	10	AWG 16
<b>D2</b>	Driver de motor a pasos	5.8	10	AWG 16
<b>CN</b>	Control Numérico	1	10	AWG 16
<b>FP1</b>	Fuente de poder 24 V	8.3	10	AWG 16
<b>FP2</b>	Fuente de poder 60V	5.8	10	AWG 16
<b>FP3</b>	Fuente de poder 60V	5.8	10	AWG 16
<b>Q1</b>	Disyuntor	40	40	SUCRE 10x4
<b>P1</b>	Pulsador	0.5	6	AWG 18
<b>P2</b>	Pulsador	0.5	6	AWG 18
<b>P3</b>	Pulsador	0.5	6	AWG 18
<b>S1</b>	Fin de carrera	0.5	6	AWG 18
<b>S2</b>	Fin de carrera	0.5	6	AWG 18
<b>S3</b>	Fin de carrera	0.5	6	AWG 18
<b>S4</b>	Fin de carrera	0.5	6	AWG 18
<b>S5</b>	Fin de carrera	0.5	6	AWG 18
<b>S6</b>	Fin de carrera	0.5	6	AWG 18
<b>S7</b>	Fin de carrera	0.5	6	AWG 18

### 4.2.3 Implementación de los sistemas de control y potencia

**Tabla 61.**

#### **Implementación de los sistemas de control y potencia**

---

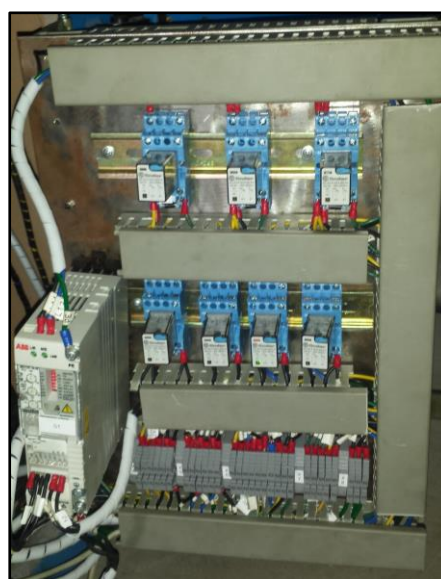


**Figura 108 Fuentes de alimentación y drivers para los motores a paso.**

---



**Figura 109 Parte delantera del Tablero de control.**



**Figura 110 Parte de atrás del Tablero de control.**

---

### 4.2.4 Circuito de la chispa

En el plano AZA 6702 = A2 del manual N° 4 de la máquina electroerosionadora, se encuentra el circuito con el cual trabajaba la máquina. Este es el punto de partida para

el rediseño del circuito de la chispa. Además, en el manual N°3, se encuentra la tabla de Voltajes, Amperajes y Anchos de banda, para los 5 rangos en las que funciona el circuito de mecanizado por descarga eléctrica de la máquina electroerosionadora.

**Tabla 62.**  
**Rangos de trabajo del circuito de la chispa**

N° de Rango	1	2	3	4	5
<b>Voltaje pico (Vpp)</b>	62 V ( $\pm 5$ )	66 V ( $\pm 5$ )	70 V ( $\pm 5$ )	76 V ( $\pm 5$ )	82 V ( $\pm 5$ )
<b>Ancho de pulso (tiempo en alto)</b>	7 $\mu$ s ( $\pm 1$ )	12 $\mu$ s ( $\pm 2$ )	30 $\mu$ s ( $\pm 3$ )	38 $\mu$ s ( $\pm 4$ )	44 $\mu$ s ( $\pm 4$ )
<b>Intervalo de pulso (tiempo en bajo)</b>	25~100 $\mu$ s ( $\pm 20\%$ )	60~160 $\mu$ s ( $\pm 20\%$ )	150~250 $\mu$ s ( $\pm 20\%$ )	170~290 $\mu$ s ( $\pm 20\%$ )	120~220 $\mu$ s ( $\pm 20\%$ )
<b>Rango de corriente</b>	0.3 – 1.4 A	0.4 – 1.4 A	0.8 – 1.7 A	0.9 – 1.8 A	1.3 – 2.7 A

Las condiciones óptimas para el funcionamiento óptimo del circuito de la chispa son las siguientes:

- Los impulsos de tensión y corriente de trabajo deben ser del mismo signo.
- Para diferentes tipos de espesores de materiales, existe un ancho de banda puntual, por lo cual es importante disponer de un amplio margen de regulación.
- El intervalo de pulso, es mayor al tiempo del ancho de banda.
- El intervalo de pulso debe ajustarse según la cantidad de remoción de material en cada impulso en alto, a fin de hacer el proceso estable.

Para realizar el diseño del circuito de mecanizado por descarga eléctrica, se formaron las siguientes etapas:

### Etapa de Alimentación del Circuito

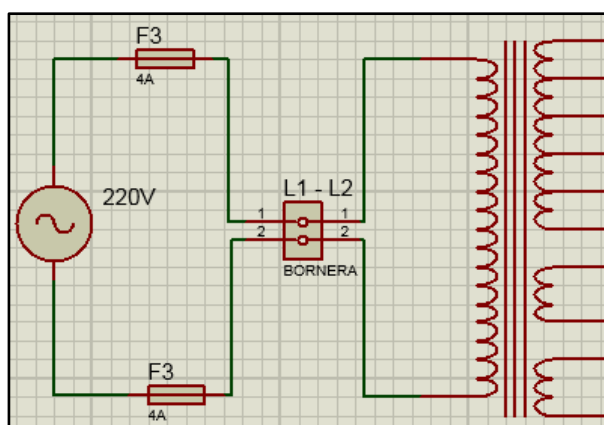
El transformador multietapa usado en la máquina estaba en óptimas condiciones y tiene las siguientes características:

**Tabla 63.**

#### Transformador multietapas

Ítem	Características
<i>Alimentación</i>	Monofásica 220 VAC
<i>Etapas</i>	5 Etapas Principales 2 Etapas Adicionales

El circuito de alimentación queda de la siguiente manera:



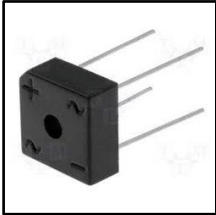
**Figura 111 Alimentación del circuito de la chispa.**

### Etapa de Rectificación y Filtrado

En esta etapa se obtiene diferentes voltajes, que pasarán de corriente alterna a corriente continua a través de un puente rectificador de diodos, con sus respectivos filtros para obtener una señal de voltaje DC más nítida.

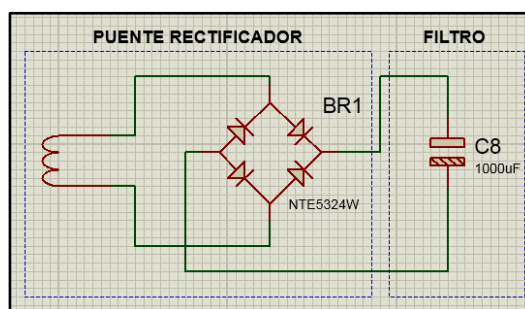
El puente rectificador tiene las siguientes características (ver tabla 61):

**Tabla 64.**  
**Puente rectificador**

<i>Marca</i>	NTE	
<i>Tipo</i>	5324W	
<i>Voltaje AC</i>	220 V – 480 V	
<i>Voltaje DC</i> <i>(salida)</i>	400 V	
<i>Amperaje</i>	25 A	

**Figura 112 NTE  
5324.**

Se tiene a continuación, el circuito rectificador de onda completa tipo puente (ver figura 113):



**Figura 113 Etapa de rectificación y filtrado.**

Los voltajes obtenidos con la medición del multímetro, se tienen en la Tabla 65:

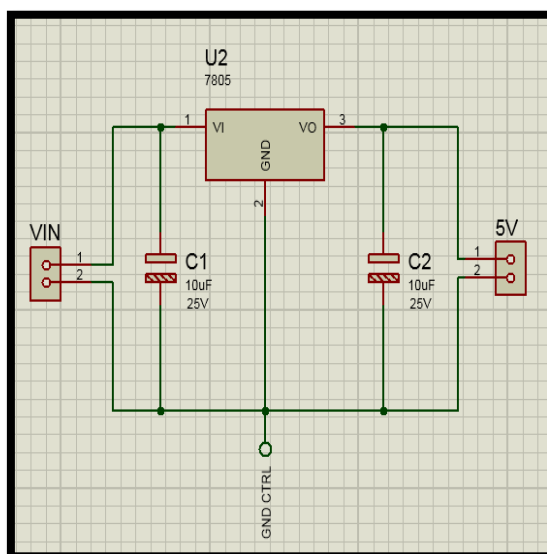
**Tabla 65.**  
**Etapas rectificadas**

<b>Etapas</b>	<b>Voltaje AC</b>	<b>Voltaje DC</b>
<b>Principal</b>	52 V	65 V
	55 V	71 V
	59 V	76 V
	63 V	81V
	68 V	87 V
<b>Secundaria</b>	28 V	33 V
	32 V	35 V

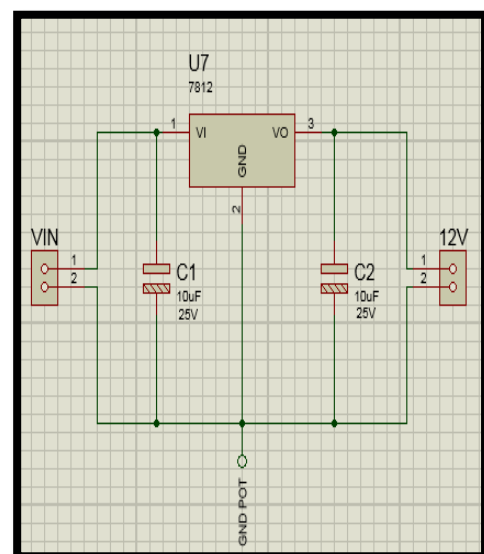
Los voltajes DC de la etapa principal sirven de alimentación a la polaridad positiva del corte.

Los voltajes DC de la etapa secundaria, pasan por un integrado 78XX y se tiene:

- Obtención de 5 V: para alimentar el circuito de control de PWM (microcontrolador y GLCD), (ver figura 114).
- Obtención de 12 V: Polarización del transistor y optoacoplador, (ver figura 115).



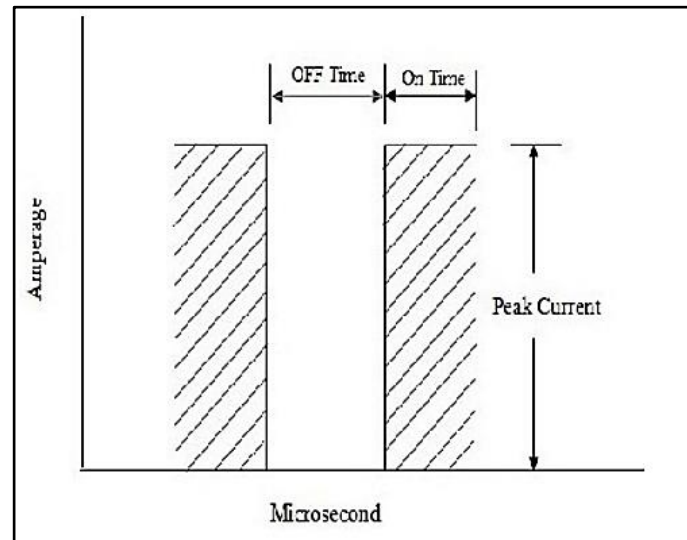
**Figura 114 Circuito para la obtención de 5 Voltios.**



**Figura 115 Circuito para la obtención de 12 Voltios.**

### **Etapa de diseño del circuito de control de PWM**

Cada ciclo EDM tiene un tiempo en alto (impulso) y un tiempo en bajo (pausa), que indican el número de ciclos de la chispa por segundo (frecuencia), expresados en microsegundos.



**Figura 116 Frecuencia de corte.**

Fuente: (Shaaz, 2014)

#### Tiempo en alto (Tiempo de impulso)

La eliminación de material es directamente proporcional a la cantidad de energía aplicada durante el tiempo en alto. Esta energía es controlada por el pico de amperaje y la longitud del tiempo en alto.

Mientras más largo es el tiempo de impulso existe más remoción de material, pero no se debe exceder pues la tasa de remoción de material (MRR) puede disminuir.

#### Tiempo en bajo (Tiempo de pausa)

El ciclo se completa cuando existe suficiente tiempo en bajo, antes del siguiente ciclo en alto. El tiempo en bajo afecta a la estabilidad del corte.

Mientras más corto sea el tiempo de apagado más rápido se cumple con la operación de mecanizado. Sin embargo, si el tiempo de desconexión demasiado corto, el material eyectado no será arrastrado por el flujo de dieléctrico. Por tal razón, es necesario que el tiempo de pausa sea mucho más largo que el tiempo de impulso.

Tal como se indica en la tabla 57, en cada uno de los 5 rangos de trabajo se tiene diferentes tiempos en alto y en bajo, dependiendo de la corriente y el voltaje de pico.



### Frecuencia

La frecuencia es el número de ciclos producidos a través del gap en un segundo. En la siguiente tabla se compara las características del uso de las frecuencias:

**Tabla 66.**  
**Características de las frecuencias en WEDM.**

<b>Frecuencias</b>	<b>Tiempo en alto</b>	<b>Eliminación de material</b>	<b>Efectos del hilo en la pieza</b>	<b>Proceso obtenido</b>
<b>Altas</b>	Corto	Poco	Crea cráteres pequeños	Menor daño térmico
<b>Bajas</b>	Largo	Bastante	Cráteres amplios y profundos	Mayor daño térmico

La frecuencia de trabajo viene determinado por la siguiente expresión:

$$F = \frac{1}{T} \rightarrow F = \frac{1}{T_{alto} + T_{bajo}} \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde:

F= Frecuencia [kHz]

T = Duración del ciclo o Período [ $\mu$ s]

De la Tabla 62 se utiliza los tiempos en alto y tiempos en bajo, de los rangos de trabajo N°1 y N° 5 y con la Ecuación 42, se obtiene los rangos de frecuencia de trabajo:

**Tabla 67.**  
**Rango de frecuencias de trabajo.**

<b>Tiempo en alto [<math>\mu</math>s]</b>	<b>Tiempo en bajo [<math>\mu</math>s]</b>	<b>Frecuencias obtenidas [kHz]</b>	<b>Rango de trabajo [kHz]</b>
7	25	$F = 33.25$	<b>3.8 – 33.25</b>
<b>44</b>	220	$F = 3.8$	

### Ciclo de trabajo

El ciclo de trabajo es un porcentaje del tiempo de impulso y la duración del ciclo total en segundos. En general, los ciclos de trabajo más altos implican un aumento de eficiencia en el corte y viene dado por la siguiente expresión:

$$\text{Ciclo útil (\%)} = \frac{T_{\text{alto}}}{T_{\text{alto}} + T_{\text{bajo}}} \times 100 \quad \text{Ecuación 43}$$

Usando los datos de la tabla 61, se obtiene:

**Tabla 68.**

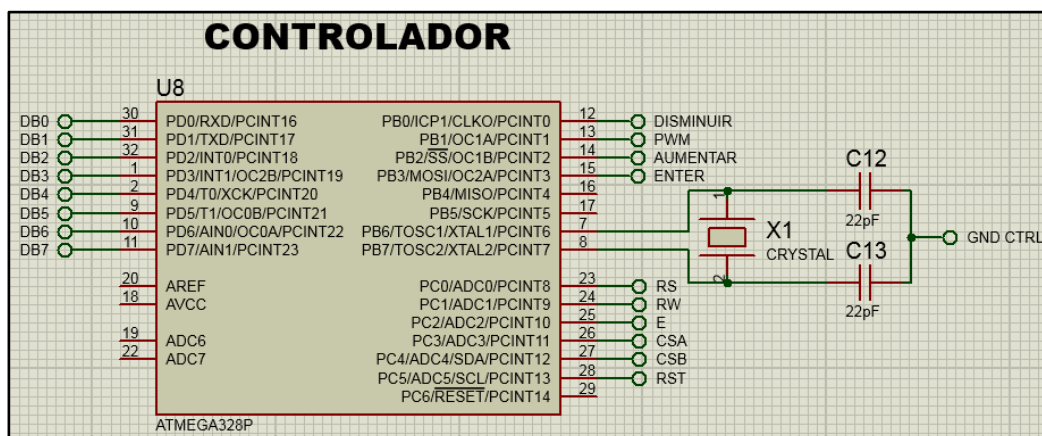
### Ciclo de trabajo

Tiempo en alto [μs]	Tiempo en bajo [μs]	Ciclo de trabajo [%]
7	25	21.88%
44	220	16.67%

Cada ciclo de trabajo, produce un arranque de material y una rugosidad determinados.

### Circuito de control de PWM

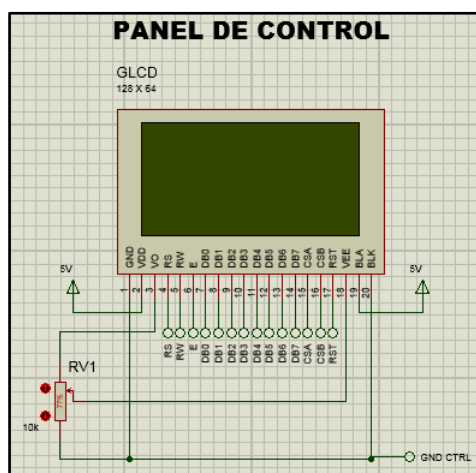
El control de PWM, es decir, el tiempo en alto y el tiempo en bajo, se realiza a través del controlador ATMEGA 328P. Para esta etapa además se usa un GLCD 128 x 64, donde se desplegarán las opciones para escoger el tiempo en alto y el tiempo en bajo.



**Figura 117 ATMEGA 328P.**

El desarrollo del código de programación se encuentra en el **ANEXO 3**.

**Tabla 69.**  
**Panel de control de PWM**



**Figura 118** Circuito del Panel de control de PWM.




**Figura 119** Implementación del Panel de control de PWM.

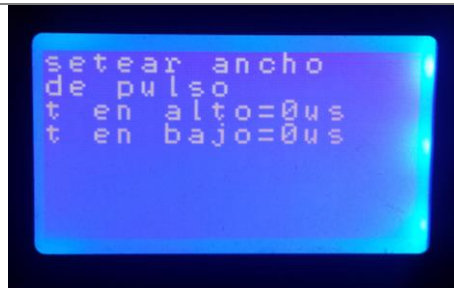
### Panel de control de PWM

En el GLCD, se despliega 3 pantallas de servicio:

**Tabla 70.**  
**Funciones de las pantallas de servicio de control de PWM**

Nº	Pantalla	Función
1		La pantalla de inicio indica el logo de la empresa, se presiona Aceptar para pasar a la siguiente pantalla.
2		Pantalla de seteo donde se puede escoger el tiempo en alto y tiempo en bajo. Se elige los

**Figura 120** Pantalla de inicio del control de PWM.



**Figura 121 Pantalla de seteo de control de PWM.**

rangos y se presiona  
Aceptar.

3

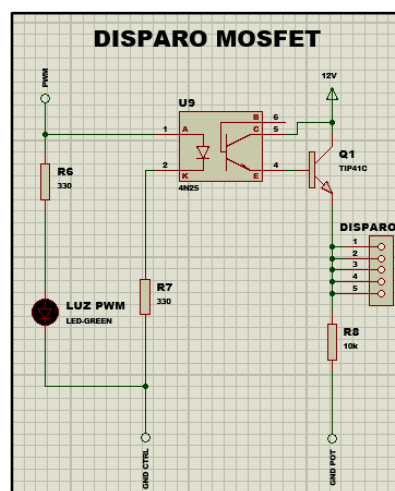


**Figura 122 Pantalla de Disparo de control de PWM.**

Pantalla de Disparo de PWM, indica que el tiempo en bajo y el tiempo en alto, están en marcha. Igualmente, el led encendido indica el disparo de PWM.

### **Etapas de diseño del circuito de potencia**

Para esta etapa se implementa el aislamiento de la parte de control con la parte de potencia, con el uso de un optoacoplador 4N25. Además, para el disparo de la parte de potencia se necesita un transistor TIP41C.



**Figura 123 Disparo del MOSFET.**

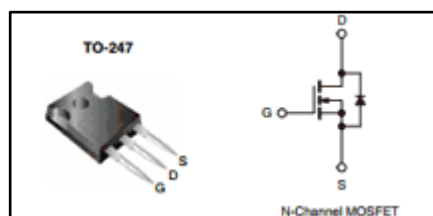
### Control del disparo de potencia de PWM a través del MOSFET.

El transistor MOSFET es un dispositivo controlado por tensión, la cual se aplica entre la puerta y la fuente para manejar intensidades de corrientes elevadas con señales de control débiles. También la velocidad de conmutación del MOSFET es de nanosegundos y no presenta segunda ruptura, por lo que son los transistores adecuados para manejar la conmutación del proceso de corte. (Albert Camprubí Graell, 2007)

El MOSFET que se escoge tiene las siguientes características:

**Tabla 71.**  
**MOSFET IRFP 460**

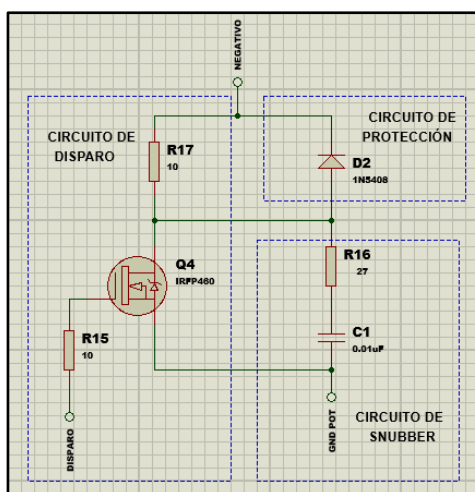
Característica	Valor
Voltaje Drenaje-Fuente	500 V
Voltaje Puerta-Fuente	$\pm 20V$
Voltaje DC (salida)	400 V
Amperaje	20 A



**Figura 124 IRFP460**

### Control de la intensidad de corriente

Se controla la corriente, a través de una resistencia de potencia de 10 ohmios en paralelo a un diodo de protección, la cual absorbe toda la potencia del proceso de corte.



**Figura 125 Circuito de potencia.**

**Tabla 72.****Explicación del circuito de potencia.**

<b>Circuito de disparo</b>	<b>Disparo de PWM, a través del MOSFET.</b>
Circuito de Snubber	Mejora la conmutación de encendido - apagado y filtra señales alternas parásitas.
Circuito de protección	Evita que la corriente de trabajo se regrese y dañe los MOSFETS.

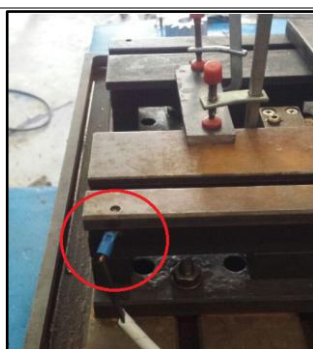
Se necesita 5 circuitos de potencia para cumplir con los 5 rangos de corriente de trabajo de la tabla 57. Dependiendo del rango usado, se activa tantas etapas como se necesite, así:

- Para el rango 1 se activa 1 etapa.
- Para el rango 5 se activan las 5 etapas en paralelo.

Mientras más etapas se activen se obtiene una mayor intensidad de corriente pico.

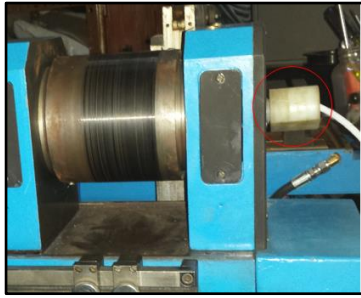
**Polaridad de Corte**

A continuación, se observa la conexión de la polaridad para el proceso de corte:

**Tabla 73.****Polaridad del corte de trabajo.****Figura 126** Polaridad del corte de trabajo.**Figura 127** Polaridad positiva.

Conexión del Voltaje de alimentación a la pieza de trabajo.

5 rangos de voltaje DC obtenido de la parte positiva de la rectificación y filtrado.



**Figura 128 Polaridad negativa.**

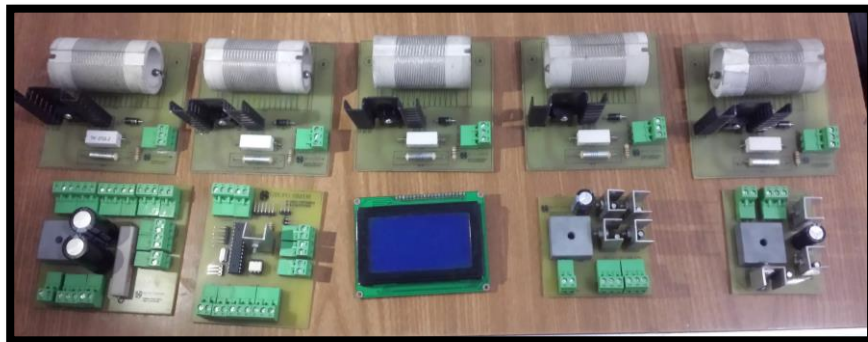
Conexión del disparo de las etapas de potencia al hilo de molibdeno.

Conexión por medio de una escobilla.

---

Los planos completos del circuito de la chispa, se encuentran en el **ANEXO 2**.

**Placas electrónicas del circuito de la chispa.**



**Figura 129 Placas electrónicas del circuito de la chispa.**

**Ubicación del circuito de la chispa en la máquina.**



**Figura 130 Ubicación y cableado de las placas electrónicas de la chispa.**

#### 4.2.5 Panel de control principal



Figura 131 Panel de control.

Tabla 74.

#### Explicación del Panel de control principal

<b>Selectores Manual/Automático</b>	<b>Encendido manual o automático de los sistemas de la máquina.</b>
<b>Control de PWM</b>	Botón rojo: Enter. Botones azules: aumentar o disminuir ancho de banda.
<b>Control de rangos de voltaje y amperaje</b>	Selección de rangos de voltajes y etapas de corriente de trabajo.



#### 4.2.6 Implementación total de la máquina de electroerosión de corte por hilo

Se observa la máquina implementada con todos los sistemas repotenciados:



**Figura 132 Máquina electroerosionadora repotenciada.**

Además, en el **ANEXO 1**, se encuentra el ensamblaje total de la máquina.

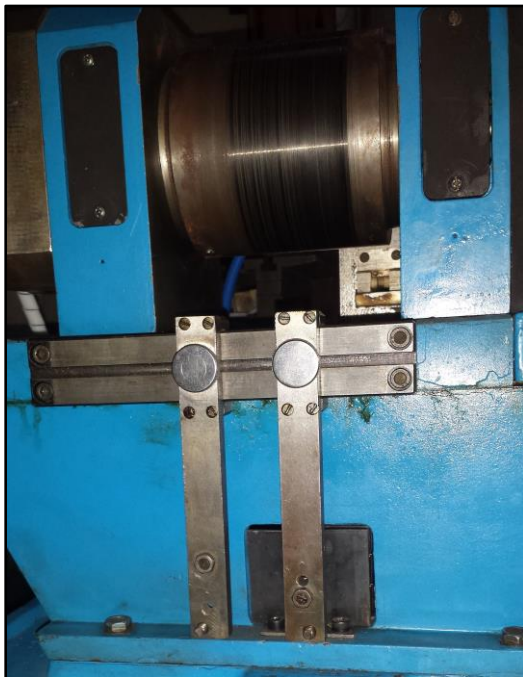
## CAPÍTULO 5. PRUEBAS Y RESULTADOS

### 5.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Estas pruebas de los sistemas de la máquina electroerosionadora ayudarán a la ejecución, revisión y retroalimentación del funcionamiento de cada elemento mecánico, electrónico, eléctrico y control.

#### 5.1.1 Pruebas del Sistema de bobinado de Hilo de molibdeno

La verificación del sistema de bobinado de hilo de molibdeno, se hizo a través del variador de frecuencia y los fines de carrera.



**Figura 133** Movimiento del rodete de hilo y fines de carrera.



**Figura 134** Trabajo de los fines de carrera.

**Tabla 75.**  
**Pruebas del sistema de bobinado de hilo con función rampa de 2.5 [s] y 1[s]**

Pruebas de frecuencia		Baja frecuencia 0-539 RPM		Media frecuencia 540-1085 RPM		Alta frecuencia 1086-1630 RPM	
		Rápido	Lento	Rápido	Lento	Rápido	Lento
Respuesta del pulso y frenado							
<i>Final de carrera S1</i>	Horario	X		X		X	
<i>Final de carrera S2</i>	Antihorario	X		X		X	
<i>Final de carrera S3</i>	Paro de emergencia	X		X		X	

Se observa que los fines de carrera, a cualquier velocidad angular, tienen una respuesta rápida de funcionamiento.

**Tabla 76.**  
**Pruebas del sistema de bobinado de hilo con función rampa de 5 [s] y 10 [s]**

Pruebas de frecuencia		Baja frecuencia 0-539 RPM		Media frecuencia 540-1085 RPM		Alta frecuencia 1086-1630 RPM	
		Rápido	Lento	Rápido	Lento	Rápido	Lento
Respuesta del pulso y frenado							
<i>Final de carrera S1</i>	Horario		X		X		X
<i>Final de carrera S2</i>	Antihorario		X		X		X
<i>Final de carrera S3</i>	Paro de emergencia		X		X		X

Se observa que los fines de carrera, a cualquier velocidad angular, tienen una respuesta lenta de funcionamiento.

- Se usará la función rampa de 1 s y 2.5 s, por tener una respuesta.

### 5.1.2 Pruebas del Sistema de Circulación y Filtrado de fluido dieléctrico

Para la evaluación del sistema de Circulación y filtrado de fluido dieléctrico se tiene en cuenta estos puntos:

- Uso de las válvulas reguladoras de caudal.
- Funcionamiento del sistema de mangueras y bomba electrohidráulica.
- Funcionamiento del indicador de nivel de agua en el tanque.
- Fugas de fluido.

**Tabla 77.**

#### **Pruebas de funcionamiento del Sistema de Circulación de dieléctrico**



**Figura 135 Prueba de la bomba electrohidráulica y los reguladores de caudal.**

La bomba hidráulica funciona con las especificaciones del manual, con total normalidad. Además, se reguló la circulación de salida de la bomba con la válvula globo que nos permitía mandar un caudal regulable de 40 l/s.



**Figura 136 Prueba de mangueras endurecidas y reguladores de caudal.**

Se usaron mangueras azules de ID 6 mm endurecidas, pero estas tuvieron problemas al momento del desfogue hacia el filtrado, puesto que el fluido dieléctrico no circulaba.





**Figura 137 Prueba con mangueras flexibles.**

Se cambió la manguera endurecida con sus reductores, por una manguera negra flexible de ID 6mm. Esta manguera permitió que el dieléctrico circule al filtrado y posteriormente al reservorio.



**Figura 138 Prueba del indicador de nivel.**

El indicador de manguera transparente, mostró el nivel de fluido dieléctrico que se encuentra en el tanque.

Las pruebas del sistema de circulación y filtrado de fluido dieléctrico, dejaron como resultado un excelente sistema de aspersion o flushing como se muestra en la.



**Figura 139 Funcionamiento correcto del sistema flushing.**

### 5.1.3 Pruebas del Sistema de Transmisión de Movimiento en los ejes X e Y

Para estas pruebas se programó movimientos de diferentes distancias, hasta llegar a los finales de carrera que determinan paro de emergencia.



**Figura 143 Pruebas en los sistemas de transmisión de movimiento.**

Esto se muestra en la siguiente Tabla 78:

**Tabla 78.**

#### **Primeras Pruebas Eje X**

Valor ingresado (mm)	Valor medido (mm)	Visualización del controlador en milésimas
<b>2000</b>	20.01	2000
<b>4000</b>	40.01	4000
<b>6000</b>	60.01	6000
<b>8000</b>	80.01	8000
<b>10000</b>	100.01	10000
<b>12000</b>	120.01	12000
<b>14000</b>	140.01	14000
<b>16000</b>	160.01	16000



**Tabla 79.**  
**Primeras Pruebas Eje Y**

Valor ingresado (mm)	Valor medido (mm)	Visualización del controlador en milésimas
<b>2000</b>	20.01	2000
<b>4000</b>	40.01	4000
<b>6000</b>	60.01	6000
<b>8000</b>	80.01	8000
<b>10000</b>	100.01	10000
<b>12000</b>	120.01	12000
<b>14000</b>	140.01	14000
<b>16000</b>	160.01	16000

### 5.1.7 Pruebas del Sistema de Circuito de la Chispa

Para estas pruebas se realizó las mediciones de voltajes, corrientes, frecuencias y disparo de ancho de pulso en control y potencia.

#### **Pruebas del circuito de disparo de PWM**

Se usó un osciloscopio para visualizar los tiempos en alto, tiempos en bajo y frecuencia de trabajo.

En cada uno de los cinco rangos de trabajo de la máquina, se tomó un valor de impulso y uno de pausa.

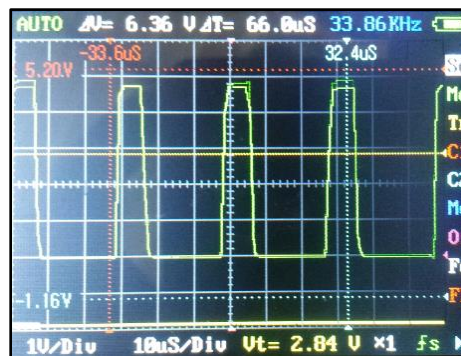
La punta del osciloscopio se colocó así:

- La punta de prueba, a la salida del pin 15 (PIN B1) o a la entrada del pin 1 del octoacoplador.
- La punta lagarto, se la coloca en un pin de la tierra de control (GND CTRL).

En la Tabla 80, se puede observar las pruebas del circuito de disparo de PWM:

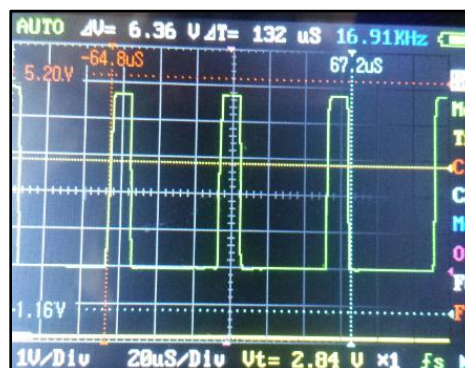
**Tabla 80.**  
**Pruebas de Disparo de PWM**

N° de Rango	Gráfica en el osciloscopio	Frecuencia práctica
1	Tiempo en alto = 7 [μs] Tiempo en bajo = 25 [μs]	33.86 [kHz]



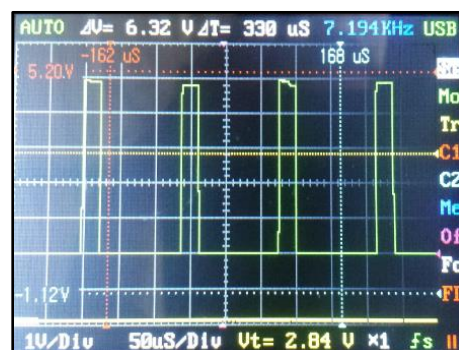
**Figura 140** Tiempo en alto y bajo en el rango 1.

2	Tiempo en alto = 7 [μs] Tiempo en bajo = 25 [μs]	16.91 [kHz]
---	---	-------------



**Figura 141** Tiempo en alto y bajo en el rango 2.

3		7.19 [kHz]
---	--	------------



**Figura 142** Tiempo en alto y bajo en el rango 3.





4

6.25 [kHz]

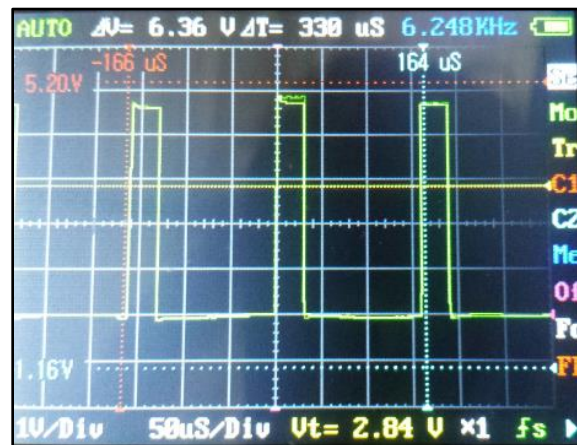


Figura 143 Tiempo en alto y bajo en el rango 4.

5

4.97 [kHz]

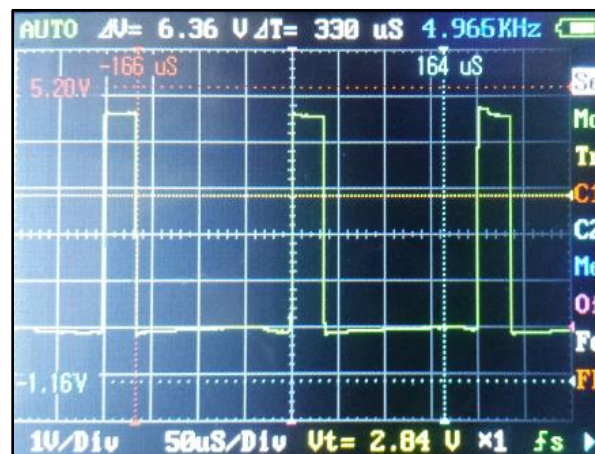


Figura 144 Tiempo en alto y bajo en el rango 5.

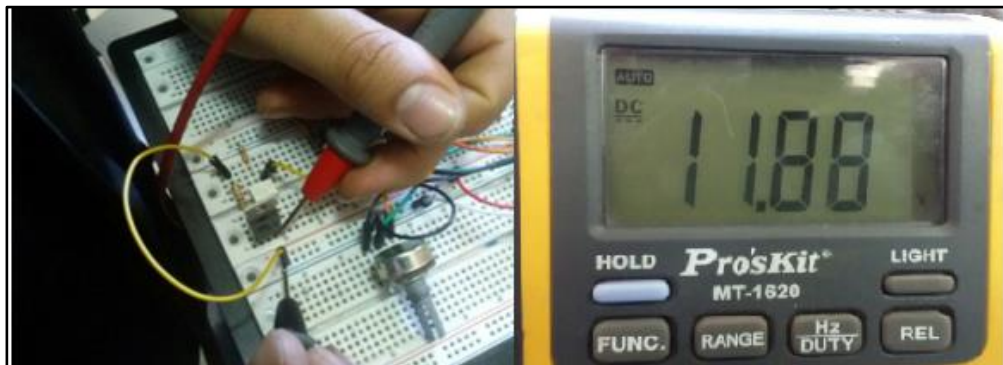
Se cumple con los regímenes del corte de electroerosión por hilo:

- Si el tiempo de impulso es corto, se tiene frecuencias más altas, que servirán para operaciones de acabado.
- Si el tiempo de impulso es más largo, se tiene frecuencias más bajas, que servirán para operaciones de desgaste.
- Además las gráficas muestran que la frecuencia se encuentra dentro del rango de trabajo entre 3 kHz y 33kHz, calculado en la tabla 63.
- Las gráficas nos permiten visualizar el amplio rango de control de PWM para las 5 etapas de corte.

### Pruebas de disparo del TIP 41 C

Para medir el disparo del TIP 41C, que es polarizado con 12 VDC y con configuración NPN, se hace lo siguiente:

- Se realiza el disparo de tiempo en alto y tiempo en bajo.
- Se coloca la punta positiva del multímetro en el emisor del transistor.
- Se coloca la punta negativa del multímetro en la tierra de potencia (GND POT).



**Figura 145 Disparo del TIP 41C.**

En la figura 145, se visualiza la manera de comprobar la conmutación y el resultado indica que el voltaje de emisor es de 11.88 V~12 V, por lo que esta prueba indica que el disparo del TIP 41C está funcionando correctamente.

### Pruebas del circuito de la chispa sin carga



**Figura 146 Circuito de la chispa en vacío, sin carga.**

Con ayuda de medición del multímetro se pudo constatar los valores indicados en la tabla 65.

**Tabla 81.**

**Rangos de trabajo sin carga**

N° de Rango	1	2	3	4	5
<b>Voltaje a la salida del filtro</b>	72 V	76 V	83 V	89 V	95 V
<b>Intensidad de corriente</b>	0.9 A	1.2 A	1.5 A	1.8 A	2.5 A

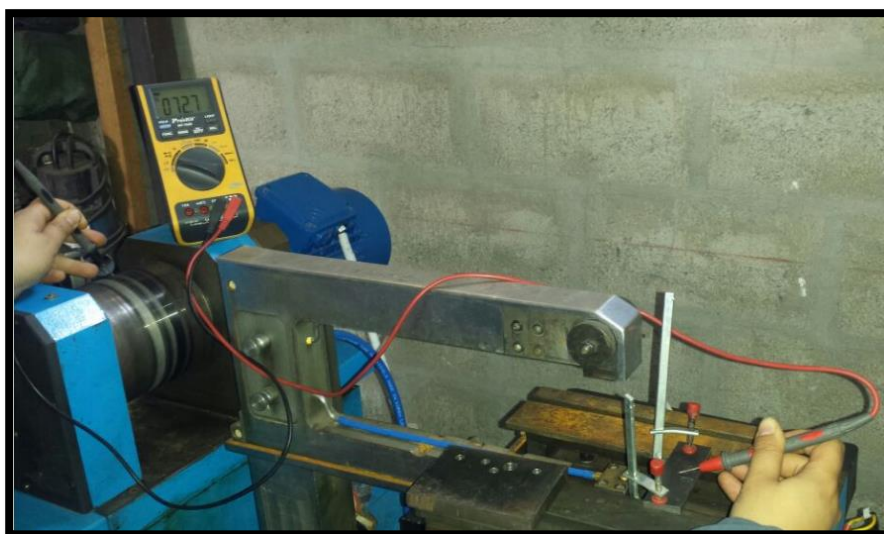
El voltaje se mide a la salida del filtro, puesto que aún no se conecta a la carga (hilo) y la polaridad se encuentra en circuito abierto.

**Pruebas del circuito de la chispa con carga y Disparo del MOSFET**

Para la medición del circuito de la chispa con carga, se utilizó solo dos etapas del circuito de potencia para comprobar la conmutación del Mosfet IRFP460 y no se utilizó fluido dieléctrico.

Se midió con el multímetro en la polaridad de corte:

- Punta positiva en la pieza.
- Punta negativa en el hilo.



**Figura 147 Circuito de la chispa, con carga.**

**Tabla 82.**  
**Rangos de trabajo con carga**

N° de Rango	1	2	3	4	5
Voltaje en la polaridad de corte	66 V	72V	78 V	82 V	87 V
Intensidad de corriente	1.2 A	1.2 A	1.2 A	1.2 A	1.2 A

Se observa que las mediciones obtenidas, se encuentran dentro de los 5 rangos de la tabla 57 y dentro de los rangos para electroerosión de corte por hilo que son de 40 a 400 V y de 0.5 a 500 A. (Albert Camprubí Graell, 2007)

### 5.1.8 Pruebas del Tablero de Control

Las pruebas realizadas al tablero de control constaron de los siguientes puntos:

- Control manual y automático de encendido de los sistemas.
- Selectores de corriente y voltaje.
- Selección de PWM en el GLCD.

Se observan las tablas a continuación:

**Tabla 83.**  
**Pruebas del encendido de los sistemas de la máquina electroerosionadora.**

Sistema	Selección Automática	Selección Automática (desde la salidas del controlador)
<i>De Circulación y filtrado de fluido dieléctrico</i>	Encendido correcto	Encendido correcto (M10)
<i>Del circuito de la chispa</i>	Encendido correcto	Encendido correcto (M24)
<i>De bobinado de hilo de molibdeno</i>	Encendido correcto	Encendido correcto (M42)

En la siguiente tabla de selección de voltajes para la descarga eléctrica se puede escoger solo un voltaje, mientras los otros deben permanecer apagados, como se indica en la tabla:

**Tabla 84.**  
**Pruebas del encendido de los selectores de voltaje para la chispa.**

Selectores	V1	V2	V3	V4	V5
V1	E	A	A	A	A
V2	A	E	A	A	A
V3	A	A	E	A	A
V4	A	A	A	E	A
V5	A	A	A	A	E

**Donde E= Encendido y A=Apagado.**

Si dos voltajes están seleccionados, causa conflicto y el circuito se apaga. En la siguiente tabla de selección de corrientes para la descarga eléctrica se puede escoger más de una etapa de corriente, como se indica en la tabla:

**Tabla 85.**  
**Pruebas del encendido de los selectores de Voltaje para la chispa.**

Selectores	I1	I2	I3	I4	I5	Corriente
I1	E	E	A	E	A	0.8 – 1.7 A
I2	A	E	E	A	A	0.4 – 1.4 A
I3	A	A	E	A	A	0.3 – 1.4 A
I4	E	E	E	E	E	1.3 – 2.7 A
I5	E	E	A	E	E	0.9 – 1.8 A

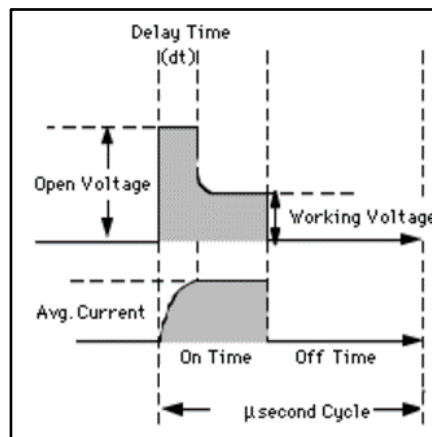
**Donde E= Encendido y A=Apagado.**

Mientras más etapas de corriente estén activadas, el rango de corriente aumenta y viceversa.

### 5.1.9 Pruebas de Corte

Para realizar las pruebas de corte se toma en cuenta:

- El voltaje de alimentación a la pieza, es el voltaje entregado por los capacitores (filtro). Al momento de la descarga, usando un multímetro la tensión de corte baja entrando en la etapa de voltaje de trabajo, como se muestra en la figura 148.



**Figura 148 Factores de voltaje y corriente de corte.**

Fuente: (MAKINO, 2016)

- Al medir la intensidad de corriente en el proceso de corte con el multímetro, no corresponde al valor pico. La medida encontrada es la intensidad media que es el promedio de la corriente que circula por cada ciclo de descarga. Este valor viene dado por la siguiente expresión:

$$I_m = \frac{I_p \times t_i}{T_c} \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde:

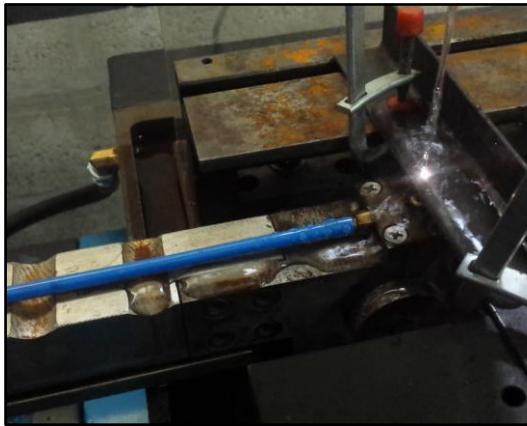
$I_m$  = Intensidad media

$I_p$  = Intensidad de pico

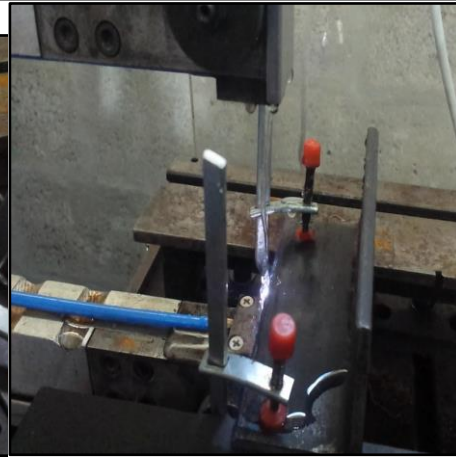
$t_i$  = Tiempo de impulso

$T_c$  = Duración del ciclo útil ( $T_i + T_p$ )

**Tabla 86.**  
**Proceso de corte por descarga eléctrica – Visualización de la chispa**



**Figura 149** Proceso de corte de placa de 2mm de espesor.



**Figura 150** Proceso de corte de placa de 6mm de espesor.

### **Primeras pruebas**

Se realizaron las primeras pruebas con los siguientes parámetros:

- Tiempos cortos de proceso, solo para comprobar el giro del hilo y el máximo espesor de corte por etapa y cortes de líneas verticales. Entonces se definieron diferentes parámetros de corte, para las pruebas (ver tabla 87):

Después de las primeras pruebas se obtiene:

- Cuando se produce la rotura de hilo como en las pruebas 3, 6, 12 y 20; se debe a que se escoge parámetros de corte errados.
- Para espesores más pequeños se debe escoger frecuencias altas de corte, correspondiendo esto a procesos de acabado.
- Para espesores más pequeños se debe escoger frecuencias bajas de corte, correspondiendo esto a procesos de desbaste.

**Tabla 87.**  
**Primeras pruebas de corte por descarga eléctrica**

<i>DATOS INICIALES DE CORTE POR DESCARGA ELÉCTRICA</i>										<i>DATOS DEL PROCESO DE CORTE POR DESCARGA ELÉCTRICA</i>				
N°	Voltaje pico	Corriente pico	Tiempo en alto	Tiempo en bajo	Frecuencia de corte	Velocidad del motor AC	Rampa del variador de frecuencia	Velocidad de avance	Espesor de la pieza	Voltaje de trabajo	Corriente media	Tiempo de corte	Distancia cortada	Observaciones
1	63 V	0.7 A	7 $\mu$ s	25 $\mu$ s	33 kHz	700 RPM	5 s	0.21 mm/s	2 mm	33 V	0.20 A	30 minutos	21 mm	Proceso normal
2	63 V	0.7 A	7 $\mu$ s	25 $\mu$ s	33 kHz	700 RPM	2.5 s	0.21 mm/s	2 mm	33V	0.20 A	20 minutos	13 mm	Proceso normal
3	63 V	0.7 A	7 $\mu$ s	25 $\mu$ s	33 kHz	700 RPM	5 s	0.21 mm/s	6 mm	33 V	0.20 A	1 minuto	0.7 mm	Rotura de hilo
4	63 V	0.7 A	8 $\mu$ s	50 $\mu$ s	19 kHz	700 RPM	2.5 s	0.21 mm/s	6 mm	33 V	0.20 A	30 minutos	20 mm	Proceso normal
5	63 V	0.7 A	8 $\mu$ s	80 $\mu$ s	13 kHz	800 RPM	2.5 s	0.21 mm/s	12 mm	33 V	0.22 A	18 minutos	12 mm	Proceso normal
6	63 V	0.7 A	8 $\mu$ s	100 $\mu$ s	10 kHz	800 RPM	2.5 s	0.21 mm/s	15 mm	33 V	0.20 A	1 minuto	0.5 mm	Rotura de hilo
7	67 V	1.2 A	10 $\mu$ s	100 $\mu$ s	10 kHz	900 RPM	2.5 s	0.21 mm/s	15 mm	36 V	0.22 A	35 minutos	24 mm	Proceso normal
8	67 V	1.2 A	12 $\mu$ s	120 $\mu$ s	9 kHz	900 RPM	2.5 s	0.21 mm/s	16 mm	36 V	0.22 A	35 minutos	23 mm	Proceso normal
9	67 V	1.2 A	13 $\mu$ s	140 $\mu$ s	8 kHz	1000 RPM	2.5 s	0.21 mm/s	22 mm	36 V	0.24 A	25 minutos	17 mm	Proceso normal
10	67 V	1.2 A	13 $\mu$ s	150 $\mu$ s	7 kHz	1000 RPM	2.5 s	0.21 mm/s	25 mm	36 V	0.24 A	30 minutos	19 mm	Proceso normal
11	67 V	1.2 A	14 $\mu$ s	160 $\mu$ s	7 kHz	1100 RPM	2.5 s	0.21 mm/s	30 mm	36 V	0.24 A	20 minutos	13 mm	Proceso normal
12	67 V	1.2 A	14 $\mu$ s	160 $\mu$ s	7 kHz	1200 RPM	2.5 s	0.21 mm/s	35 mm	36 V	0.24 A	1 minuto	0.4 mm	Rotura de hilo
13	72 V	1.5 A	27 $\mu$ s	150 $\mu$ s	6 kHz	1400 RPM	1 s	0.21 mm/s	35 mm	39 V	0.24 A	25 minutos	16 mm	Proceso normal
14	72 V	1.5 A	28 $\mu$ s	180 $\mu$ s	6 kHz	1400 RPM	1 s	0.21 mm/s	40 mm	39 V	0.24 A	35 minutos	23 mm	Proceso normal
15	72 V	1.5 A	30 $\mu$ s	220 $\mu$ s	5 kHz	1400 RPM	1 s	0.21 mm/s	45 mm	39 V	0.28 A	15 minutos	10 mm	Proceso normal
16	72 V	1.5 A	32 $\mu$ s	220 $\mu$ s	5 KHz	1500 RPM	1 s	0.21 mm/s	50 mm	39 V	0.25 A	1 minuto	0.4 mm	Proceso normal





<b>17</b>	78 V	1.8 A	34 $\mu$ s	200 $\mu$ s	5 kHz	1500 RPM	1 s	0.21 mm/s	50 mm	42 V	0.28 A	10 minutos	7 mm	Proceso normal
<b>18</b>	78 V	1.8 A	36 $\mu$ s	220 $\mu$ s	5 kHz	1500 RPM	1 s	0.21 mm/s	60 mm	42 V	0.30 A	30 minutos	20 mm	Proceso normal
<b>19</b>	78 V	1.8 A	38 $\mu$ s	250 $\mu$ s	5 kHz	1500 RPM	1 s	0.21 mm/s	65 mm	42 V	0.33 A	20 minutos	12 mm	Proceso normal
<b>20</b>	78 V	1.8 A	40 $\mu$ s	250 $\mu$ s	5 kHz	1500 RPM	1 s	0.21 mm/s	70 mm	42 V	0.33 A	1 minuto	0.4 mm	Rotura de hilo
<b>21</b>	87 V	2.5 A	44 $\mu$ s	120 $\mu$ s	7 kHz	1600 RPM	1 s	0.21 mm/s	70 mm	45 V	0.45 A	30 minutos	20 mm	Proceso normal
<b>22</b>	87 V	2.5 A	46 $\mu$ s	180 $\mu$ s	6 kHz	1600 RPM	1 s	0.21 mm/s	75 mm	45 V	0.38 A	20 minutos	12 mm	Proceso normal
<b>23</b>	87 V	2.5 A	48 $\mu$ s	220 $\mu$ s	4 kHz	1600 RPM	1 s	0.21 mm/s	78 mm	45 V	0.43 A	15 minutos	10 mm	Proceso normal

**Distancia cortada: 21 mm**

**Frecuencia: 33 k Hz (Alta)**

**Proceso: Acabado**

**Menor espesor cortado**



**Figura 151** Proceso de corte de placa de 2mm de espesor.

**Distancia cortada: 10 mm**

**Frecuencia: 4 kHz (Baja)**

**Proceso: Desbaste**

**Mayor espesor cortado**



**Figura 152** Proceso de corte de placa de 78 mm de espesor.

### 5.1.10 Resultados

Después de realizadas las mediciones y primeras pruebas de corte, se obtiene la siguiente tabla para cada rango de trabajo:

**Tabla 88**  
**Tabla resumen para el proceso de corte de la Máquina de Electroerosión de Corte por hilo NC WIRE J0780**

Nº de Rango	1	2	3	4	5
<i>Voltaje pico (Vpp)</i>	62 V ( $\pm 5$ )	66 V ( $\pm 5$ )	70 V ( $\pm 5$ )	76 V ( $\pm 5$ )	82 V ( $\pm 5$ )
<i>Voltaje de trabajo</i>	33 V	36 V	39 V	42 V	45 V
<i>Rango de corriente pico</i>	0.3 – 1.4 A	0.4 – 1.4 A	0.8 – 1.7 A	0.9 – 1.8 A	1.3 – 2.7 A
<i>Rango de Corriente media</i>	0.2 – 0.22 A	0.22 -0.24 A	0.24 - 0.28 A	0.28 - 0.33 A	0.38 - 0.45 A
<i>Tiempo en alto</i>	7 $\mu$ s ( $\pm 1$ )	12 $\mu$ s ( $\pm 2$ )	30 $\mu$ s ( $\pm 3$ )	38 $\mu$ s ( $\pm 4$ )	44 $\mu$ s ( $\pm 4$ )
<i>Tiempo en bajo</i>	25~100 $\mu$ s ( $\pm 20\%$ )	60~160 $\mu$ s ( $\pm 20\%$ )	150~250 $\mu$ s ( $\pm 20\%$ )	170~290 $\mu$ s ( $\pm 20\%$ )	120~220 $\mu$ s ( $\pm 20\%$ )
<i>Frecuencia de corte</i>	10- 33 kHz	7 – 10 kHz	5 – 6 kHz	5 kHz	4 – 7 kHz
<i>Velocidad del motor AC</i>	700 – 800 RPM	900 – 1200 RPM	1400 – 1500 RPM	1500 RPM	1600 RPM
<i>Velocidad de avance</i>	0.21 mm/s	0.21 mm/s	0.21 mm/s	0.21 mm/s	0.21 mm/s
<i>Espesor de la pieza de trabajo</i>	0-14 mm	15-32 mm	33-46 mm	47-65 mm	66-80 mm

De la Tabla 87, se usan los 5 rangos de trabajo para realizar piezas de diferentes espesores, como se indica a continuación:



**Figura 153** Pieza cortada  
N° 1.



**Figura 154** Pieza  
cortada N° 2.



**Figura 155** Pieza  
cortada N° 3.



**Figura 156** Pieza cortada  
N° 4.



**Figura 157** Pieza  
cortada N° 5.



**Figura 158** Pieza  
cortada N° 6.

---

## CAPÍTULO 6.

### ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

#### 6.1 ANÁLISIS FINANCIERO

Para realizar el análisis financiero debemos considerar tres aspectos:

- Costos Directos
- Costos Indirectos
- Costos de Fabricación y Ensamblaje

##### 6.1.1 Costos directos

Los costos directos, corresponden a la suma de los gastos realizados por materiales, accesorios y mano de obra.

**Tabla 89.**  
**Materiales y accesorios mecánicos**

<b>COSTOS DIRECTOS: MATERIALES Y ACCESORIOS MECÁNICOS</b>				
	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
<b>Sistema de circulación y filtrado de dieléctrico</b>	Filtro Marca Kuboshi	1	10	10
	Bisagra comercial	2	1	2
	Rueda comercial	4	1	4
	Pasamuro 1"	2	1.5	3
	Pasamuro 3/4"	2	1.25	2.5
	Pasamuro 1/2"	2	1	2
	Codo 1"	1	1.5	1.5
	Codo 3/4"	1	1.33	1.33
	Unión en T 1"	1	0.6	0.6
	Junta universal 1"	1	0.6	0.6
	Tapón 1"	1	0.64	0.64
	Acople rápido 1"-1/2"	2	2.5	5
	Acople rápido 3/4"-1/2"	2	2.3	4.6



	Adaptador hembra-hembra	4	0.75	3
	Adaptador macho-hembra 90°	4	1	4
	Válvula de globo 1"	1	2.25	2.25
	Manguera 10 x 6.5	5	0.5	2.5
	Manguera 6 x 4	3	0.4	1.2
	Agua destilada (lt)	21	0.91	19.11
	Manguera hidráulica 10	3	3.15	9.45
<b>Sistema de transmisión de movimiento para ejes X e Y</b>	Acero AISI 4340 Ø4-3/4" x 55 [mm]	1	30	30
	Acero AISI 4340 Ø2" x 150 [mm]	1	30	30
	Acero AISI 1018 Ø1/2" x 360 [mm]	1	15	15
	Acero ASTM A36 500 x 400 x 24	1	15	15
	Acero ASTM A36 500 x 400 x 10	1	8	8
	Rodamientos FAG 6000	8	4	32
<b>Sistema de enrollamiento de hilo</b>	Acero ASTM A36 150 x 150 x 40	1	30	30
	Carrete de hilo de molibdeno	1	135	135
<b>TOTAL</b>				<b>374.28</b>

**Tabla 90.**  
**Materiales y accesorios eléctricos/electrónicos**

<b>COSTOS DIRECTOS: MATERIALES Y ACCESORIOS ELÉCTRICOS/ELECTRÓNICOS</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Controlador CNC</b>	1	1000	1000
<b>Bomba Pedrollo 0.5 HP</b>	1	120	120
<b>Microstep driver stepper NEMA 34</b>	2	20	40
<b>Motor Lafert 0.5 HP</b>	2	100	200
<b>Variador de frecuencia</b>	1	190.24	190.24
<b>Contactador bobina 110V</b>	2	200	400
	1	40.4	40.4



<b>Contactora bobina 220V</b>	1	76.4	76.4
<b>Relé</b>	7	3	21
<b>Fusible 10A</b>	2	0.88	1.76
<b>Fusible 15A</b>	2	0.88	1.76
<b>Fusible 3A</b>	2	0.44	0.88
<b>Diodo 1N5408</b>	7	0.15	1.05
<b>Selector</b>	13	6	78
<b>Micro-switch</b>	4	1.25	5
<b>Potenciómetro</b>	2	0.25	0.5
<b>Fuente de poder 60V</b>	2	24.75	49.5
<b>Fuente de poder 24V</b>	1	39	39
<b>Portafusibles</b>	6	6.59	39.54
<b>Disyuntor</b>	1	20.6	20.6
<b>Borneras para riel DIN</b>	80	1.36	108.8
<b>Tornillos M2</b>	25	0.8	20
<b>Tornillos M3</b>	20	1	20
<b>Varilla roscada M2</b>	2	1	2
<b>Tuercas M2</b>	25	0.2	5
<b>Tuercas M3</b>	50	0.5	25
<b>Cable Sucre 12x3</b>	3	2.2	6.6
<b>Riel DIN</b>	3	1	3
<b>Canaleta 40x40</b>	4	1	4
<b>Resistencia de potencia 2.4kOHM/10W</b>	1	1.02	1.02
<b>Puente rectificador NTE 5324W</b>	3	8.45	25.35
<b>Borneras macho/hembra</b>	30	0.54	16.2
<b>Capacitores electrolíticos 1000uF/50V</b>	2	0.97	1.94
<b>Capacitores electrolíticos 10uF/50V</b>	2	0.07	0.14
<b>Capacitores electrolíticos 10uF/25V</b>	6	0.07	0.42
<b>Regulador de voltaje 7824</b>	2	0.45	0.9
<b>Regulador de voltaje 7818</b>	2	0.45	0.9
<b>Regulador de voltaje 7812</b>	2	0.4	0.8
<b>Regulador de voltaje 7805</b>	1	0.4	0.4
<b>Capacitores cerámicos SMD 22pF</b>	2	0.04	0.08
<b>Resistencia en SMD 10kOHM</b>	2	0.03	0.06
<b>Resistencia 10K/0.5W</b>	5	0.03	0.15
<b>Resistencia 330 OHM /0.5W</b>	5	0.03	0.15
<b>Circuito integrado ATMEGA 328</b>	1	6	6



<b>Optoacoplador 4N25</b>	1	0.4	0.4
<b>Transistor TIP41C</b>	1	0.8	0.8
<b>Cristal 20MHz</b>	1	0.49	0.49
<b>Pulsadores</b>	3	0.65	1.95
<b>Led alto brillo</b>	1	0.2	0.2
<b>Espadines</b>	14	0.25	3.5
<b>Disipadores pequeños</b>	8	0.25	2
<b>MOSFETS IRF460</b>	5	6.58	32.9
<b>Resistencia 24 o 27 OHMS &gt; 0.5W</b>	5	0.83	4.15
<b>Resistencia 10 OHMS /0.5W</b>	5	0.03	0.15
<b>Papel termotransferible</b>	15	0.5	7.5
<b>Baquelas</b>	6	6.75	40.5
<b>Disipadores grandes</b>	5	0.5	2.5
<b>Broca 2M</b>	1	1.8	1.8
<b>Broca 3M</b>	1	0.8	0.8
			2674.18

**Tabla 91.**  
**Mano de obra**

<b>Costos directos: Mano de obra</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
<b>Ingeniería y diseño</b>	220	6	1320
<b>Servicios metalmecánicos</b>	100	3	300
<b>Total</b>			1620

**Tabla 92.**  
**Costos directos totales**

<b>Costos directos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
<b>Materiales y elementos mecánicos</b>	374.28
<b>Mano de obra</b>	1620
<b>Máquina electroerosionadora</b>	750
<b>Materiales y elementos electrónicos</b>	2674.18
<b>Total</b>	5418.46

### 6.1.2 Costos Indirectos

Los costos indirectos, corresponden a la sumatoria de los gastos producidos por los materiales y costos operativos.

**Tabla 93.**  
**Materiales**

<b>Costos indirectos: materiales</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
<b>Cinta aislante</b>	1	2.5	2.5
<b>Pulsadores</b>	10	0.75	7.5
<b>Micro-switch</b>	2	1.25	2.5
<b>Electrodos AGA 6011</b>	4	3.4	13.6
<b>Teflón</b>	1	1.5	1.5
<b>Total</b>			<b>27.6</b>

**Tabla 94.**  
**Costos operativos**

<b>Costos operativos</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Costo</b>
<b>Agua potable</b>	60
<b>Energía eléctrica</b>	120
<b>Internet</b>	50
<b>Teléfono</b>	40
<b>Total</b>	<b>270</b>

**Tabla 95.**  
**Costos indirectos totales**

<b>Costos indirectos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
<b>Materiales</b>	27.6
<b>Costos operativos</b>	270
	<b>297.6</b>



### 6.1.3 Costos de Fabricación y Ensamblaje

**Tabla 96.**  
**Costos de Fabricación y Ensamblaje**

<b>Costos de Fabricación y Ensamblaje</b>			
<b>Máquina/Herramienta</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
<b>Cortadora por plasma</b>	2	35	70
<b>Taladro de banco</b>	5	5	25
<b>Taladro manual</b>	15	1	15
<b>Fresadora</b>	5	6	30
<b>Torno</b>	5	6	30
<b>Soldadura eléctrica</b>	5	5	25
<b>Herramientas</b>	50	4.5	225
<b>Dobladora de tol</b>	2	5	10
<b>Compresor con aerógrafo</b>	10	2.5	25
<b>Ensamblaje de la máquina</b>	50	4	200
<b>Total</b>			655

**Tabla 97.**  
**Costos totales**

<b>Costos totales</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
<b>Costos directos</b>	5418.46
<b>Costos indirectos</b>	297.6
<b>Costos de fabricación</b>	655
	6371.06

En la Tabla 97, se puede apreciar que el costo total de la máquina es de 6371.06 USD, cabe mencionar que una máquina con características similares tiene un costo en el mercado de 15000 USD, es decir que a SIMYM CIA. LTDA. Le representa un ahorro del 57.53% en dólares significa 8628.94 USD.

## 6.2 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el análisis económico, se considerarán estos parámetros:

- Valor Actual Neto (VAN)
- Tasa Interna de Retorno (TIR)

Para ello se realiza un cálculo del flujo de caja proyectada para 5 años. Con ello se puede apreciar la viabilidad del proyecto. Tomando en cuenta un incremento anual del 10% tenemos que:

**Tabla 98.**  
**Flujo de caja proyectada a 5 años**

AÑO	0	1	2	3	4	5
<b>Flujo de caja nominal</b>	-\$ 6,371.06	\$ 3,360.00	\$ 3,914.40	\$ 4,740.16	\$ 5,681.91	\$ 6,792.56
<b>Tasa de descuento en (%)</b>	24.87%	24.87%	24.87%	24.87%	24.87%	24.87%
<b>Flujo de caja actual</b>	-\$ 6,371.06	\$ 2,690.80	\$ 2,510.43	\$ 2,434.55	\$ 2,337.02	\$ 2,237.40
<b>Valor Actual Neto (VAN)</b>	\$ <b>5,839.14</b>					
<b>Tasa Interna de Retorno (TIR)</b>	<b>59.3%</b>					

En conclusión, la obtención de un VAN positivo y un TIR alto, indica que el proyecto es rentable y por lo tanto recomendable implementar. Además la inversión realizada se recupera al primer año de poner en marcha la máquina electroerosionadora.

## CAPÍTULO 7.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

- Se repotenció y se puso en marcha la máquina de electroerosión de corte por hilo NC WIRE CUT MACHINE J0780 en la empresa SIMYM CIA. LTDA., cumpliendo y actualizando los parámetros de corte impuestos en los manuales del uso pasado.
- Se diseñó y se construyó un sistema compacto para la circulación en circuito cerrado de fluido dieléctrico, empleando como actuador una bomba centrífuga de ½ HP. Además, se incluyó una etapa de filtrado para retener las partículas impuras que se obtienen del proceso de descarga eléctrica. En este sistema de circulación de fluido dieléctrico se despreciaron las pérdidas en las tuberías, por el uso de válvulas reguladoras de caudal. Se eligió agua destilada como fluido dieléctrico, por su baja viscosidad y carencia de iones metálicos, lo que ayuda a crear un campo de concentración de cargas para el corte y el arrastre de partículas removidas al momento de la electroerosión.
- Para la transmisión de movimiento en los ejes X e Y se implementaron motores a pasos con un mecanismo de engranajes cuya relación es 1:1 y 5:2 respectivamente, obteniendo una velocidad de avance máxima de 20.94 mm/s y mínima de 0.21 mm/s, en cada uno de los ejes. Con una tolerancia de  $\pm 0.01$  mm.
- El actuador en DC del sistema de bobinado del hilo fue reemplazado por un motor AC de ½ HP, cuya velocidad angular que corresponde a la velocidad de corte es controlada mediante un variador de frecuencia con un rango de trabajo establecido entre 700 a 1650 RPM y la rampa de aceleración con un tiempo de 1 a 2.5 segundos, dependiendo la etapa de corte.
- Se rediseñó y actualizó el circuito de la chispa, donde el voltaje DC obtenido en los filtros actúa como fuente de alimentación de la polaridad positiva de la electroerosión que se ubica en la pieza; y una etapa de conmutación controlada por MOSFETS que proporciona el ciclo de trabajo con tiempos de impulso y

pausa, que corresponde a la polaridad negativa de la descarga eléctrica que se transmite a través de una escobilla conectada al hilo de molibdeno. El circuito de la chispa quedó establecido para las 5 etapas de trabajo, con los siguientes rangos de control: voltaje de 62 a 87 V, corriente de 0.3 a 2.7 A y un ancho de pulso de 7 a 290  $\mu$ s.

- Debido a que es una máquina industrial que trabajará largas horas en una jornada, sus componentes eléctricos/electrónicos tienen un costo elevado, por lo que se utilizaron protecciones eléctricas para los elementos electrónicos, contactores, variador de frecuencia, así como la separación de etapa de control y etapa de potencia en el circuito de la chispa.
- Se logró integrar la activación y desactivación de los actuadores en un controlador numérico computarizado.
- Con las pruebas se determinó que se usan altas frecuencias de electroerosión con valores que oscilan entre 15 a 33 kHz, para realizar el corte con un acabado suave en espesores pequeños, mientras que se utilizan bajas frecuencias que oscilan entre 4 KHz a 14 kHz, para el corte con operaciones de desbaste en espesores grandes.
- Con el análisis económico, se logró determinar que el precio mínimo por milímetro cuadrado que debe tener el corte por hilo es de 0.3 centavos de dólar.

## 7.2 RECOMENDACIONES

- Es necesario leer los manuales de usuario y de operación de la máquina, antes de realizar cualquier operación, estos se encuentran en los ANEXO 10, mismos en los que se detalla aspectos importantes a tomar en cuenta para el proceso de electroerosión
- Asegurarse que los topes que accionan los fines de carrera limitadores del recorrido del hilo se encuentren en una posición adecuada, con el fin de que el hilo no se rompa por salir del rango.
- Asegurarse de que las mangueras de desfogue no obstruyan la circulación del agua hacia la etapa de filtrado, durante el proceso de corte.
- El operador no debe girar con las manos ningún eje cuando los drivers estén encendidos, esto provocaría daños en los motores.
- Lubricar por goteo los ejes X e Y y el sistema de bobinado de hilo para evitar el desgaste mecánico, debido a las largas jornadas de trabajo.
- No tocar el electrodo (hilo) y la pieza de trabajo simultáneamente, se podrían producir descargas eléctricas en el cuerpo.
- Asegurarse que todos los selectores del panel de control, se encuentren en modo OFF y que el botón de paro de emergencia esté activado, antes de prender la máquina.
- Revisar que las puertas de la máquina estén cerradas para comenzar con el proceso de corte.

## BIBLIOGRAFÍA

- Albert Camprubí Graell. (2007). *Electro-erosión: Fundamentos de su física y su técnica*. Barcelona: Marcombo, S.A.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Octava ed.). México: McGraw-Hill.
- Groover, M. (2013). *FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING: Materials, Processes and System* (Fifth ed.). USA: WILEY.
- Jameson, E. (2001). *Electrical Discharge Machine*. USA.
- Madou, M. (2011). *Fundamentals of MICROFABRICATION AND NANOTECHNOLOGY* (Third ed., Vol. II). CRC Press.
- Mott, R. (2006). *DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS* (Cuarta ed.). México: PEARSON.
- Norton, R. (s.f.). *Diseño de máquinas*. PRENTICE HALL.
- Senplades. (2013). *Plan Nacional del Buen Vivir*. Quito.

## REFERENCIAS EXTERNAS

- ANAHEIM AUTOMATION. (2016). *34Y*. Recuperado el 10 de Febrero de 2016, de MOTION CONTROL: <https://anaheimautomation.com/products/stepper/stepper-motor-item.php?sID=15&pt=i&tID=75&cID=19F>

- Azcondo, F., Casanueva, R., Leone, M., & Schulze, H. (2007). Fuentes de alimentación de electroerosión: aplicaciones y propuestas. En M. Sebastián (Ed.), *2nd Manufacturing Engineering Society International Conference*. Madrid. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/267921472\\_Fuentes\\_de\\_alimentacion\\_de\\_electroerosion\\_aplicaciones\\_y\\_propuestas](https://www.researchgate.net/publication/267921472_Fuentes_de_alimentacion_de_electroerosion_aplicaciones_y_propuestas)
- Cetronic. (2016). *FINAL DE CARRERA*. Recuperado el 11 de Febrero de 2016, de Cetronic: <http://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/Catalogo.jsp?idIdioma=&idTienda=93&cPath=1160>
- Del Castillo, F. (2007). *electroerosión*. Recuperado el 30 de Octubre de 2015, de UNAM: [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m2/electroerosion.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m2/electroerosion.pdf)
- direct industry. (2016). *Disyuntor en caja moldeada*. Recuperado el 11 de Febrero de 2016, de CIRCUTOR: <http://www.directindustry.es/prod/circutor/product-11644-438752.html>
- distrivalvulas. (18 de Abril de 2012). *INSTRUMENTACIÓN*. Recuperado el 17 de Enero de 2016, de distrivalvulas: [http://distrivalvulas.com/portal/product\\_info.php?products\\_id=105](http://distrivalvulas.com/portal/product_info.php?products_id=105)
- ebay. (25 de Noviembre de 2015). *10.4" LCD CNC Cutting System Flame/plasma*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2015, de ebay: [http://www.ebay.com/itm/10-4-Lcd-Cnc-De-Corte-Sistema-flame-plasma-Cnc-Corte-Controladora-2-Version-4gb-/161349468048?nma=true&si=YSF74zj8tcm8YTJcW%252FgTFhup0eg%253D&orig\\_cvip=true&rt=nc&\\_trksid=p2047675.l2557](http://www.ebay.com/itm/10-4-Lcd-Cnc-De-Corte-Sistema-flame-plasma-Cnc-Corte-Controladora-2-Version-4gb-/161349468048?nma=true&si=YSF74zj8tcm8YTJcW%252FgTFhup0eg%253D&orig_cvip=true&rt=nc&_trksid=p2047675.l2557)
- Espinosa, M. d. (15 de Abril de 2002). *La Electroerosión: un tutorial*. Obtenido de Interempresas/Metalmecánica:

<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1914-La-Electroerosion-un-tutorial.html>

- Etitudela. (15 de Enero de 2014). *Introducción a la Electroerosión*. Obtenido de CIP ETI Tudela: <http://www.etitudela.com/profesores/jfcm/mipagina/downloads/electroerosionamio.pdf>
- Ferretería Industrial León. (2016). *Bomba Pedrollo 1/2 HP*. Recuperado el 11 de Febrero de 2016, de Ferretería Industrial León: <http://www.ferreteriaindustrialleon.com/2013/04/bomba-pedrollo-italy-12-hp.html>
- Focus Technology Co. Ltd. (2016). *Changzou Changhua Electric Motor Co. Ltda.* Recuperado el 18 de Junio de 2016, de Made-in-China.com: [http://es.made-in-china.com/co\\_cnchanghua/product\\_75bf006A-Stepping-Motor-for-CNC-Wire-Cutting-EDM-Machine\\_engrsohg.html](http://es.made-in-china.com/co_cnchanghua/product_75bf006A-Stepping-Motor-for-CNC-Wire-Cutting-EDM-Machine_engrsohg.html)
- Huang, J., Liao, Y., & Su, H. (1996). A Study on the machining-parameters optimization of wire electrical discharge machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 487-493. doi:doi:10.1016/S0924-0136(97)00117-9
- IADA. (19 de Junio de 2013). *Ficha de datos de seguridad*. Obtenido de IADA: [http://www.iada.es/es/fds-agua-destilada\\_10942.pdf](http://www.iada.es/es/fds-agua-destilada_10942.pdf)
- Intel. (2014). *Intel*. Recuperado el 05 de Noviembre de 2015, de Intel® Edison: <http://www.intel.es/content/www/es/es/do-it-yourself/edison.html>
- Jiang, M. (2005). *DK7716 NC WIRE CUT EDM*. Obtenido de JianZhou CNC: [http://www.jzcnc.net/ProductShow\\_61.html](http://www.jzcnc.net/ProductShow_61.html)
- Kern, R. (Enero de 2007). *EDM Wire Primer*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2015, de TechTips: <http://www.gedms.com/technicalArticles/TechTipsJ-F-7.pdf>



- lafert. (2016). *COMMUNICATIONS*. Recuperado el 11 de Febrero de 2016, de LAFERT GROUP: <http://www.lafert.com/eng/comunicazione-news.php?page=3&y=2012>
- León, O. (2013). *DISEÑO DE UN GENERADOR DE PULSOS PARA UN SISTEMA DE MICROMANUFACTURA POR ELECTROEROSIÓN*. México D.F. Obtenido de [http://132.248.246.25/tesigrado/consulta/detpaterno.cfm?al\\_cuenta=511006409](http://132.248.246.25/tesigrado/consulta/detpaterno.cfm?al_cuenta=511006409)
- LIKO MOTOR. (s.f.). *SH-8611A Hybrid stepping motor*. Obtenido de ChangZhou LIKO MOTOR Co., Ltd: <http://www.likomotor.com/en/uploadfile/2bcf7a9b1ad34916a1161263d6666be8.pdf>
- *LIST OF TOP FILTROS PURIFICADORES DE AGUA IMAGES*. (s.f.). Obtenido de STYLEPINNERS: <http://www.stylepinner.com/filtros-purificadores-de-agua/ZmlsdHJvcy1wdXJpZmljYWRvcmlWZLWRLWFndWE/>
- Liu, F., Wu, J., Xi, C., & Yang, J. (Diciembre de 2014). Introduction to WEDM and Constant Tension Control. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, 2(12), 34-38. Obtenido de [http://www.academia.edu/10136048/Introduction\\_to\\_WEDM\\_and\\_Constant\\_Tension\\_Control](http://www.academia.edu/10136048/Introduction_to_WEDM_and_Constant_Tension_Control)
- Madou, M. (2011). *Fundamentals of MICROFABRICATION AND NANOTECHNOLOGY* (Third ed., Vol. II). CRC Press.
- MAKINO. (2016). *RAM EDM*. Obtenido de MAKINO: <https://www.makino.com/about/news/RAM-EDM/211/>
- Mechanical Engineering. (2016). *Electrical Discharge Machining (EDM) Principles*. Obtenido de Mechanical Engineering: <http://mechanicalinventions.blogspot.com/2016/01/electrical-discharge-machining-edm.html>

- MICRO-TRONICS. (2015). *Wire EDM*. Recuperado el 17 de Enero de 2016, de MICRO-TRONICS: <http://www.micro-tronics.com/capabilities/wire-edm.html>
- Mohd, B. (2008). *Study the Effect of Wire-EDM Parameters on Surface Roughness for Machining Die-Steel*. Malaysia. Obtenido de [http://library.utem.edu.my/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=5183&Itemid=208](http://library.utem.edu.my/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=5183&Itemid=208)
- Ordóñez, J. L. (s.f.). Electroerosionadoras por hilo de molibdeno, una opción de calidad. *METAL ACTUAL*, 32-37. Obtenido de [http://www.metalactual.com/revista/32/maquinaria\\_molibdeno.pdf](http://www.metalactual.com/revista/32/maquinaria_molibdeno.pdf)
- Rodríguez, M. (19 de Marzo de 2013). *Diferencia entre relés y contactores, "primos hermanos"*. Recuperado el 11 de Febrero de 2016, de Revistadigital: <http://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/diferencia-reles-contactores/>
- Secretaria de Educación Superior. (2013). *Objetivos*. Recuperado el 20 de Agosto de 2015, de Secretaria de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación: <http://www.educacionsuperior.gob.ec/objetivos/>
- Shaaz, A. (2014). Current Research trends in Electric Discharge Machining (EDM):Review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695506002148>
- SIDE. (2016). *ACS550*. Recuperado el 11 de Febrero de 2016, de SIDE: <http://www.side-automatizacion.com/es/abb/variador-velocidad-ac550>
- Sommer, C., & Sommer, S. (2016). *Free COMPLETE EDM HANDBOOK*. Obtenido de RELIABLE EDM: <http://www.reliableedm.com/Complete-EDM-Handbook.php>
- TecnologiaArea. (s.f.). *CONTACTOR*. Recuperado el 10 de Febrero de 2016, de **TECNOLOGÍA** **ÁREA:** <http://www.areatecnologia.com/electricidad/contactor.html>

- Tisalema, A. (2 de Marzo de 2012). *"REPOTENCIACIÓN Y MANTENIMIENTO MEJORATIVO DE LA MÁQUINA EXTRUSORA DE POLIETILENOS DE LA EMPRESA EDUPLASTIC DE LA CIUDAD DE LATACUNGA"*. Recuperado el 19 de Octubre de 2015, de Repositorio Institucional de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/2401>
- Universidad Técnica de Navarra. (24 de Agosto de 2015). *Mecanizado de piezas mediante electroerosión por hilo*. Obtenido de TECNUN: <http://www4.tecnun.es/asignaturas/labfabricacion/LCSF/pdfs/Practica%20WEDM.pdf>

## **ANEXOS**

***ANEXO 1. PLANOS MECÁNICOS***

***ANEXO 2. PLANOS ELÉCTRICOS/ELECTRÓNICOS***

***ANEXO 3. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN***

***ANEXO 4. MANUAL DE SERVICIO Y MANTENIMIENTO***

***ANEXO 5. EVIDENCIA FOTOGRÁFICA***

***ANEXO 6. CARTA DE CONFORMIDAD***