



**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: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT TIPO  
CARTESIANO PARA CORTE POR PLASMA”**

**AUTOR: LARA YÁNEZ, JONATHAN ENRIQUE  
MUSO CACHUMBA, ERIK ANDRÉS**

**DIRECTOR: ING. SEGURA SANGUCHO, LUIS JAVIER**

**SANGOLQUÍ**

**2018**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT TIPO CARTESIANO PARA CORTE POR PLASMA", fue realizado en su totalidad por Lara Yáñez Jonathan Enrique y Muso Cachumba Erik Andrés, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por lo tanto me permito acreditar y autorizar a los autores para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 06 de Febrero de 2018

---

Ing. Luis Segura Sangucho  
DIRECTOR



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

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, LARA YÁNEZ JONATHAN ENRIQUE y MUSO CACHUMBA ERIK ANDRÉS, con cédulas de identidad N° 1722194758 y N° 1718162116 respectivamente, declaramos que este trabajo de titulación "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT TIPO CARTESIADO PARA CORTE POR PLASMA", 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 ellos nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 06 de Febrero de 2018

Jonathan Enrique Lara Yáñez  
Cédula No. 1722194578

Erik Andrés Muso Cachumba  
Cédula No. 1718162116



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

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

### **AUTORIZACIÓN**

Nosotros, LARA YÁNEZ JONATHAN ENRIQUE y MUSO CACHUMBA ERIK ANDRÉS, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el repositorio institucional el trabajo de titulación, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT TIPO CARTESIADO PARA CORTE POR PLASMA", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 06 de Febrero de 2018

Jonathan Enrique Lara Yáñez  
Cédula No. 1722194578

Erik Andrés Muso Cachumba  
Cédula No. 1718162116

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo de titulación a todas aquellas personas que en algún momento de mi vida estudiantil, supieron brindarme su apoyo de cualquier manera, dedico el presente proyecto de manera especial a mi familia, a mis padres Marcelo y Ana, a mis hermanos Marlon y Gabriela y por último pero muy importante a mi sobrina valentina, LOS AMO, son lo mejor de mi vida.*

*Jonathan*

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco en primer lugar a Dios, quien fue el que permitió que culminara mis estudios y que siempre me ha brindado su ayuda de muchas maneras, agradezco a mis padres por su esfuerzo constante para sacar adelante a su hijo y haber conseguido un logro más para ellos como padres, agradezco a mis hermanos que son un apoyo fundamental en estos momentos de mi vida, agradezco a mis amigos con los que compartí la universidad los que hicieron de esta, un momento de mi vida inmemorable, los recordaré siempre.*

*Jonathan*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CARÁTULA</b>	
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Definición del problema .....	2
1.3. Justificación e importancia.....	5
1.4. Área de influencia.....	6
1.5. Objetivos.....	7
1.5.1. Objetivo general .....	7
1.5.2. Objetivos específicos.....	7
1.6. Alcance del proyecto.....	7
1.6.1. Componentes mecánicos.....	8
1.6.1.1. Chasis de soporte base para estructura de movimiento .....	8
1.6.1.2. Transmisión de movimiento.....	8
1.6.1.3. Subsistema de guías para desplazamiento lineal .....	9
1.6.1.4. Subsistema de soporte de pistola plasma.....	9
1.6.2. Componentes electrónicos/eléctricos .....	9
1.6.2.1. Actuadores .....	9
1.6.2.2. Subsistema sensorial .....	10
1.6.2.3. Indicadores .....	10
1.6.2.4. Protección.....	10
1.6.3. Componentes del sistema de control.....	11
1.6.3.1. Control.....	11
1.6.3.2. Interfaz entre computador y actuadores eléctricos .....	11
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>12</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>12</b>

2.1. Máquinas CNC.....	12
2.1.1. Esquema General.....	12
2.1.2. Características de las máquinas CNC.....	13
2.1.3. Grados de Libertad.....	15
2.1.4. Sistemas de transmisión.....	16
2.1.4.1. Transmisión por tornillo de bolas recirculantes (ballscrew).....	17
2.1.4.2. Transmisión por piñón y cremallera.....	18
2.1.4.3. Transmisión por correa de caucho .....	19
2.1.4.4. Transmisión por cadena y polea dentada .....	20
2.1.5. Actuadores .....	21
2.1.5.1. Servomotor .....	21
2.1.5.2. Motor a pasos .....	22
2.2. Corte por plasma .....	23
2.2.1. Equipamiento para el corte mediante plasma .....	25
2.3. Técnicas y Procedimientos para el corte por plasma .....	26
2.3.1. Corte mediante plasma convencional .....	26
2.3.2. Corte mediante plasma con medio secundario de agua .....	27
2.3.3. Corte mediante plasma con medio secundario de gas.....	28
2.4. Normas de seguridad.....	28
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>30</b>
<b>DISEÑO, SELECCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO .....</b>	<b>30</b>
3.1. Despliegue de la función de calidad (QFD).....	30
3.1.1. Requerimientos de calidad en términos del cliente .....	30
3.1.2. Alternativa de solución .....	31
3.1.3. Actividades del proceso.....	32
3.1.4. Matriz de relaciones entre requerimientos y actividades .....	34
3.1.5. Análisis de mercado (evaluación competitiva).....	36
3.1.6. Análisis de objetivos (evaluación competitiva interna) .....	37
3.1.7. Importancia técnica de los parámetros .....	38
3.1.8. Correlación entre parámetros .....	40
3.2. Diseño de la máquina .....	41
3.2.1. Dimensiones de la plancha.....	41
3.2.2. Velocidad de avance .....	41
3.2.3. Tipo de material de la estructura de soporte fijo.....	42
3.2.4. Tipo de Mesa de Corte.....	43
3.2.5. Tipo de transmisión.....	45



3.2.6.	Tipo de actuador para movimiento .....	46
3.2.7.	Tipo de sensores para el posicionamiento .....	47
3.2.8.	Tipo de guías para desplazamiento .....	48
3.3.	Diseño del sistema mecánico.....	49
3.4.	Diseño del Tornillo sin fin para el movimiento del eje Z .....	56
3.5.	Diseño de elementos de transmisión .....	62
3.6.	Cálculos para la selección de los motores “X” e “Y” .....	67
3.6.1.	Cálculos Motor Eje “X” .....	67
3.6.2.	Cálculos Motor Eje “Y” .....	71
3.7.	Análisis CAE .....	75
3.7.1.	Análisis de la viga sometida a mayor esfuerzo del sistema de soporte .....	75
3.7.2.	Análisis de la estructura de soporte .....	80
3.7.3.	Análisis de la viga de movimiento en el eje X .....	82
3.7.4.	Análisis de la mesa de soporte.....	85
3.8.	Resumen factores de seguridad de los elementos diseñados .....	89
3.9.	Dimensionamiento elementos eléctricos del panel de control .....	90
3.9.1.	Selección de driver para los motores.....	90
3.9.2.	Diseño del gabinete de control y del panel de controles e indicadores.....	91
3.9.2.1.	Diseño del gabinete de control .....	92
3.9.2.2.	Diseño del panel de control e indicadores .....	93
3.9.3.	Caída de tensión, selección de cables y protecciones .....	95
3.9.3.1.	Caída de tensión en el circuito de potencia .....	96
3.9.3.2.	Caída de tensión en el circuito de control .....	98
3.9.3.3.	Caída de tensión en el circuito de los motores.....	99
3.9.3.4.	Elementos de protección: Fusible para motores .....	100
3.9.3.5.	Elementos de protección: Fusible para fuente de alimentación.....	102
3.10.	Software de control MACH3.....	103
3.10.1	Pruebas para disipación de calor para driver Gecko G540 .....	105
3.11.	Construcción e instalación de la máquina .....	108
3.11.1.	Construcción de elementos del sistema mecánico .....	108
3.11.1.1.	Construcción de la estructura de soporte .....	108
3.11.1.2.	Construcción bandejas para cama de agua .....	109
3.11.1.3.	Construcción de elementos guía para el movimiento lineal.....	110
3.11.1.4.	Construcción de elementos de transmisión .....	112
3.11.1.5.	Construcción de elementos para el movimiento del eje Z.....	115
3.11.2.	Implementación de componentes .....	116

3.11.2.1.	Implementación de componentes mecánicos.....	116
3.11.2.2.	Implementación de componentes eléctricos y electrónicos .....	119
3.12.	Presupuesto de la máquina.....	120
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>122</b>
<b>PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>		<b>122</b>
4.1.	Control estadístico de procesos.....	122
4.1.1.	Control estadístico de procesos Eje X .....	124
4.1.2.	Control estadístico de procesos Eje Y .....	129
4.1.3.	Control estadístico de procesos Eje X e Y .....	134
4.1.3.1.	Control estadístico de procesos para circunferencias .....	134
4.1.3.2.	Carta de control y regresión lineal (B.J. Mandel) .....	140
<b>CAPÍTULO V .....</b>		<b>143</b>
5.1.	Conclusiones.....	143
5.2.	Recomendaciones.....	145
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>146</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<i>Alcance del proyecto .....</i>	<b>8</b>
<b>Tabla 2</b>	<i>Datos característicos de las piezas consumibles utilizadas con quemadores de plasma .....</i>	<b>25</b>
<b>Tabla 3</b>	<i>Principales propiedades de gases de corte .....</i>	<b>26</b>
<b>Tabla 4</b>	<i>Listado de necesidades del Laboratorio de Procesos de Manufactura.....</i>	<b>30</b>
<b>Tabla 5</b>	<i>Listado de actividades del proceso de corte por plasma.....</i>	<b>32</b>
<b>Tabla 6</b>	<i>Matriz de relaciones entre requerimientos y actividades.....</i>	<b>34</b>
<b>Tabla 7</b>	<i>Matriz de evaluación competitiva .....</i>	<b>36</b>
<b>Tabla 8</b>	<i>Matriz de evaluación competitiva interna .....</i>	<b>38</b>
<b>Tabla 9</b>	<i>Matriz de importancia técnica de los parámetros.....</i>	<b>39</b>
<b>Tabla 10</b>	<i>Matriz de correlación entre los parámetros.....</i>	<b>40</b>
<b>Tabla 11</b>	<i>Rangos de Operación .....</i>	<b>41</b>
<b>Tabla 12</b>	<i>Velocidad de corte recomendada para corte de acero al carbono.....</i>	<b>42</b>
<b>Tabla 13</b>	<i>Porcentaje de importancia parámetros estructura de soporte fijo.....</i>	<b>42</b>
<b>Tabla 14</b>	<i>Matriz de selección estructura de soporte fijo.....</i>	<b>43</b>
<b>Tabla 15</b>	<i>Porcentaje de importancia parámetros tipo de mesa de corte.....</i>	<b>44</b>
<b>Tabla 16</b>	<i>Matriz de selección tipo de mesa de corte.....</i>	<b>44</b>
<b>Tabla 17</b>	<i>Porcentaje de importancia parámetros tipo de transmisión .....</i>	<b>45</b>
<b>Tabla 18</b>	<i>Matriz de selección tipo de transmisión.....</i>	<b>45</b>
<b>Tabla 19</b>	<i>Porcentaje de importancia parámetros tipo de actuador para movimiento .....</i>	<b>46</b>
<b>Tabla 20</b>	<i>Matriz de selección tipo de actuador de movimiento .....</i>	<b>46</b>
<b>Tabla 21</b>	<i>Porcentaje de importancia parámetros sensores para posicionamiento .....</i>	<b>47</b>
<b>Tabla 22</b>	<i>Matriz de selección tipo de sensor de posicionamiento .....</i>	<b>47</b>
<b>Tabla 23</b>	<i>Porcentaje de importancia parámetros tipo de guías para desplazamiento.....</i>	<b>48</b>
<b>Tabla 24</b>	<i>Matriz de selección tipo de guías para el desplazamiento.....</i>	<b>49</b>
<b>Tabla 25</b>	<i>Peso de los elementos.....</i>	<b>49</b>

<b>Tabla 26</b> Roscas Métricas Finas.....	60
<b>Tabla 27</b> Tipo de Carga .....	64
<b>Tabla 28</b> Coeficiente de fricción de deslizamiento .....	64
<b>Tabla 29</b> Parámetros para diseño de motor.....	67
<b>Tabla 30</b> Análisis de la estructura de soporte.....	80
<b>Tabla 31</b> Análisis de viga movimiento en el eje X.....	82
<b>Tabla 32</b> Análisis de la mesa de soporte .....	85
<b>Tabla 33</b> Resumen factores de seguridad elementos diseñados.....	89
<b>Tabla 34</b> Intensidades Nominales Normalizadas de los fusibles.....	101
<b>Tabla 35</b> Corriente convencional de fusión fusibles.....	101
<b>Tabla 36</b> Prueba 1 .....	105
<b>Tabla 37</b> Prueba 2 .....	106
<b>Tabla 38</b> Presupuesto máquina cortadora por plasma.....	121
<b>Tabla 39</b> Mediciones para control estadístico de la muestra de referencia.....	123
<b>Tabla 40</b> Medidas experimentales para carta de control eje X.....	124
<b>Tabla 41</b> Modelo de referencia para control estadístico de procesos.....	126
<b>Tabla 42</b> Medidas experimentales para carta de control eje Y.....	129
<b>Tabla 43</b> Medidas experimentales para carta de control eje X e Y.....	135
<b>Tabla 44</b> Medidas para el cálculo de la prueba Student.....	141

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Máquina CNC Corte por Plasma .....	4
<b>Figura 2</b> Esquema ejes CNC robot tipo cartesiano.....	4
<b>Figura 3</b> Arquitectura General Máquina CNC.....	13
<b>Figura 4</b> Movilidad o Grados de Libertad de una Máquina Herramienta.....	16
<b>Figura 5</b> Capacidades de transmisión de una Máquina Herramienta.....	17
<b>Figura 6</b> Transmisión Tornillo de Bolas Recirculantes .....	18
<b>Figura 7</b> Transmisión Piñón – Cremallera .....	19
<b>Figura 8</b> Transmisión por correa de caucho.....	20
<b>Figura 9</b> Transmisión por cadena .....	21
<b>Figura 10</b> Servomotor .....	22
<b>Figura 11</b> Motor a Pasos .....	23
<b>Figura 12</b> Proceso de Corte por Plasma.....	24
<b>Figura 13</b> Proceso de Corte por Plasma.....	25
<b>Figura 14</b> Esquema de Corte Método Convencional.....	26
<b>Figura 15</b> Esquema de Corte con medio secundario de agua .....	27
<b>Figura 16</b> Esquema de Corte con medio secundario de gas.....	28
<b>Figura 17</b> Principales riesgos de corte por plasma.....	29
<b>Figura 18</b> Esquema de alternativa de solución .....	31
<b>Figura 19</b> Análisis CAE de la estructura principal.....	50
<b>Figura 20</b> Distribución de Cargas en la viga superior de la estructura .....	51
<b>Figura 21</b> Corte transversal en la viga superior de la estructura.....	52
<b>Figura 22</b> Diagrama de Esfuerzo Cortante software Xvigas.....	53
<b>Figura 23</b> Diagrama de Momento Flector software Xvigas.....	54
<b>Figura 24</b> Especificaciones técnicas Antorcha T60 Hypertherm Powermax1000 .....	57
<b>Figura 25</b> Dimensiones Antorcha T60 Hypertherm Powermax1000.....	57
<b>Figura 26</b> Distribución de fuerzas del tornillo sin fin del eje Z.....	58
<b>Figura 27</b> Diagrama de fuerzas en el tornillo sin fin .....	58
<b>Figura 28</b> Rosca Trapezoidal ISO .....	59

<b>Figura 29</b> Selección módulo piñón .....	65
<b>Figura 30</b> Selección factor geométrico de Lewis .....	66
<b>Figura 31</b> Dimensiones motor NEMA 23 .....	74
<b>Figura 32</b> Especificaciones técnicas motor NEMA 23 .....	74
<b>Figura 33</b> Especificaciones técnicas motor NEMA 23 .....	75
<b>Figura 34</b> Ubicación de fuerza y sujeciones para el análisis de la viga del sistema de soporte .....	76
<b>Figura 35</b> Parámetros de mallado para el análisis de la viga del sistema de soporte .....	77
<b>Figura 36</b> Esfuerzo de Von Mises de la viga del sistema de soporte .....	77
<b>Figura 37</b> Ubicación y Magnitud del máximo esfuerzo de Von Mises de la viga del sistema de soporte ..	78
<b>Figura 38</b> Ubicación y Magnitud del máximo esfuerzo de Von Mises de la viga del sistema de soporte ..	78
<b>Figura 39</b> Factor de seguridad de la viga del sistema de soporte.....	79
<b>Figura 40</b> Ubicación y Magnitud del factor de seguridad de la unión soldada.....	79
<b>Figura 41</b> Ubicación y Magnitud del factor de seguridad en la unión soldada.....	80
<b>Figura 42</b> Ubicación de fuerza y sujeciones para el análisis del sistema de soporte .....	80
<b>Figura 43</b> Parámetros de mallado para el del sistema de soporte .....	81
<b>Figura 44</b> Esfuerzo de Von Mises de la viga del sistema de soporte .....	81
<b>Figura 45</b> Factor de seguridad del sistema de soporte .....	82
<b>Figura 46</b> Ubicación de fuerza y sujeciones para el análisis de viga movimiento en el eje X.....	82
<b>Figura 47</b> Parámetros de mallado para el análisis de viga movimiento en el eje X .....	83
<b>Figura 48</b> Esfuerzo de Von Mises de la viga movimiento en el eje X .....	83
<b>Figura 49</b> Ubicación y Magnitud del máximo esfuerzo de Von Mises de la viga movimiento en el eje X ..	84
<b>Figura 50</b> Factor de seguridad de viga del movimiento en el eje X .....	84
<b>Figura 51</b> Factor de seguridad de viga del movimiento en el eje X .....	85
<b>Figura 52</b> Ubicación de fuerza y sujeciones para el análisis de la mesa de soporte .....	86
<b>Figura 53</b> Parámetros de mallado para el análisis de la mesa de soporte.....	86
<b>Figura 54</b> Esfuerzos de Von Mises de la mesa de soporte.....	87
<b>Figura 55</b> Ubicación y Magnitud del máximo esfuerzo de Von Mises de la viga movimiento en el eje X ..	87
<b>Figura 56</b> Factor de seguridad de la mesa de soporte.....	88
<b>Figura 57</b> Factor de seguridad de viga de la mesa de soporte .....	88
<b>Figura 58</b> Características físicas y eléctricas driver Gecko G540.....	91
<b>Figura 59</b> Ubicación del soporte para el gabinete de control.....	91
<b>Figura 60</b> Ubicación de los elementos de control en el gabinete .....	93
<b>Figura 61</b> Área transversal y diámetros de cable según su calibre. ....	96
<b>Figura 62</b> Pantalla principal software Mach3.....	104
<b>Figura 63</b> Diagrama de conexión de motores y resistencia de corriente.....	105
<b>Figura 64</b> Gráfica Tiempo vs Temperatura (Prueba 1).....	106
<b>Figura 65</b> Gráfica Tiempo vs Temperatura (Prueba 2).....	107
<b>Figura 66</b> Estructura de soporte máquina cortadora de plasma .....	108
<b>Figura 67</b> Proceso de pintado en las bandejas para cama de agua.....	109
<b>Figura 68</b> Proceso de soldadura por puntos en las bandejas para cama de agua .....	110
<b>Figura 69</b> Proceso de fresado en placas para carros de desplazamiento .....	111
<b>Figura 70</b> Carros de desplazamiento fabricados .....	111
<b>Figura 71</b> Proceso de fresado para manufactura de piñones.....	112
<b>Figura 72</b> Piñones fabricados .....	113
<b>Figura 73</b> Proceso de manufactura para cremalleras.....	113
<b>Figura 74</b> Proceso de manufactura con machuelo para cremalleras .....	114
<b>Figura 75</b> Cremalleras fabricadas con proceso de lijado superficial.....	114
<b>Figura 76</b> Trazado para proceso de machuelo en elementos del eje Z .....	115
<b>Figura 77</b> Proceso de soldadura para la sujeción del eje Z.....	116
<b>Figura 78</b> Ubicación de cremallera en el eje X.....	117
<b>Figura 79</b> Ensamblaje y ubicación de carros de desplazamiento .....	117

<b>Figura 80</b>	Ensamblaje y ubicación motores y guías de desplazamiento .....	118
<b>Figura 81</b>	Ensamblaje y ubicación motores y guías de desplazamiento eje Z .....	118
<b>Figura 82</b>	Ubicación bandejas para cama de agua .....	119
<b>Figura 83</b>	Ubicación portafusibles en riel DIN gabinete de control .....	119
<b>Figura 84</b>	Ubicación driver y ventilador en el gabinete de control.....	120
<b>Figura 85</b>	Ubicación fuente de alimentación y canaletas en gabinete de control.....	120
<b>Figura 86</b>	Modelo de referencia para control estadístico de procesos .....	122
<b>Figura 87</b>	Prueba de corte realizada con la máquina implementada.....	123
<b>Figura 88</b>	Límite de especificación eje X .....	125
<b>Figura 89</b>	Gráfica de control X media Eje X .....	127
<b>Figura 90</b>	Gráfica de control s media Eje X.....	127
<b>Figura 91</b>	Resumen control estadístico proceso eje X .....	129
<b>Figura 92</b>	Límite de especificación eje Y .....	131
<b>Figura 93</b>	Gráfica de control Y media Eje Y .....	132
<b>Figura 94</b>	Gráfica de control s media Eje Y .....	132
<b>Figura 95</b>	Resumen control estadístico proceso eje Y .....	134
<b>Figura 96</b>	Límite de especificación Diámetro .....	136
<b>Figura 97</b>	Gráfica de control D media Eje X e Y .....	137
<b>Figura 98</b>	Gráfica de control s media Eje X e Y .....	138
<b>Figura 99</b>	Resumen control estadístico proceso eje X e Y .....	139
<b>Figura 100</b>	Gráfica X vs Y .....	140

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación, se fundamenta en el diseño e implementación de un robot tipo cartesiano para corte por plasma, el mismo que se caracteriza por tener ejes de movimiento, con sistema de extracción de gases nocivos y cama de agua. Esta máquina funciona mediante el control numérico computarizado enfocando su uso para el Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Se determinaron parámetros primordiales de diseño mediante el análisis de despliegue de función de la calidad QFD para un sistema mecatrónico, en los cuales se determinó que los parámetros de mayor relevancia son: precisión, exactitud, velocidad de corte, costo de manufactura, y facilidad de adquisición de los elementos para construir la máquina. Además de tener en cuenta los requerimientos del laboratorio de una máquina cuya área de trabajo mínima sea de 1.2x1.2 m y para espesores de 1 a 10 mm por la máquina de corte por plasma existente en el laboratorio. Para el movimiento de esta máquina se implementó un sistema de transmisión piñón – cremallera, cuyos actuadores son motores paso a paso controlados por un driver Gecko G540 mediante puerto paralelo con una computadora que posee el software Mach3 para el envío de señales de control. Se realizaron cartas de control para cada uno de los ejes de movimiento; un análisis para cada eje de manera independiente, y además se realizó un análisis en los ejes X e Y en conjunto para formas más complejas de corte, para obtener resultados.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **PLASMA**
- **CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO**
- **MOTOR PASO A PASO**
- **DRIVER GECKO G540**

## **ABSTRACT**

The present titration work is based on the design and implementation of a Cartesian type robot for plasma cutting, which is characterized by having axes of movement, with a system for extracting noxious gases and a water bed. This machine works through computerized numerical control focusing its use for the Laboratory of Manufacturing Processes of the University of the Armed Forces - ESPE. The main design parameters were determined through the analysis of the QFD quality function for a mechatronic system, in which it was determined that the most relevant parameters are: precision, accuracy, cutting speed, manufacturing cost and ease of use acquisition of the elements to build the machine. In addition to taking into account the laboratory requirements of a machine that has a minimum working area of 1.2x1.2 m for thicknesses of 1 to 10 mm by the plasma cutting machine existing in the laboratory. For the movement of this machine a rack-and-pinion transmission system is implemented, whose actuators are stepper motors controlled by a Gecko G540 controller through a parallel port with a computer that has the Mach3 software for sending control signals. Sections control charts for each of the axes of movement; an analysis for each axis independently, and also an analysis in the X and Y axes together for more complex cutting shapes, to obtain results.

### **KEYWORDS:**

- **PLASMA**
- **COMPUTER NUMERIC CONTROL**
- **STEP-STEP MOTOR**
- **DRIVER GECKO G540**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

El proceso de manufactura de corte por plasma se fundamenta en el uso de un chorro de gas a alta temperatura y gran velocidad por medio de una boquilla, estrangulándolo para así fundir y eliminar el material. Este proceso de corte se emplea mayoritariamente para cortar materiales difíciles de seccionar con otros métodos, como el acero inoxidable y las aleaciones de aluminio. Por esta razón, a nivel nacional este proceso sigue siendo manual donde se emplea una máquina para el corte por plasma, sin embargo esto requiere de una gran habilidad humana para la producción de piezas.

En países con más desarrollo se han construido máquinas encargadas de este proceso mediante la automatización por control numérico computarizado. El corte con una de estas máquinas es más práctico y sencillo en las aplicaciones livianas y medianas, donde el espacio físico de trabajo es reducido.

En el Ecuador el número de máquinas automatizadas para este proceso es reducido debido a su alto costo, ya que no son elaboradas aquí sino en gran parte importadas. Por esta razón, se dificulta el uso del corte por plasma en la mayor parte de empresas dedicadas al mecanizado de este tipo.

En la ciudad de Latacunga, existe una máquina automatizada por control numérico computarizado para este proceso de corte, fruto de un proyecto realizado por los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" en el año 2007, el área de trabajo de dicha máquina es de 625x340 mm, es decir, se limita para el uso de planchas de material de menor tamaño que las comerciales cuyas dimensiones son



2400x1200 mm, dicha máquina usa para su movimiento un mecanismo de tornillo sin fin con rodamientos en los ejes X e Y.

Con la finalidad de ayudar al Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", nuestro proyecto propone diseñar e implementar una máquina de control numérico computarizada, para la automatización del proceso de corte por plasma, mejorando los tiempos de producción y generando piezas cortadas en forma rápida y sencilla con formas diversas, mejorando la precisión y velocidad del proceso.

## **1.2. Definición del problema**

En la industria existen varios tipos de máquinas con diferentes configuraciones para: la estructura de soporte, el sistema de transmisión, las guías lineales, el soporte del efector final, el sistema de control, etc. Todos estos factores dependen directamente del trabajo que se vaya a realizar con esta máquina.

Un ejemplo de una de las varias máquinas industriales para corte por plasma que existen es la que se describe a continuación, marca Micro Step:

MicroCut-P (ver Figura 1), el área de trabajo máxima es de 3000 x 2000 mm y puede ser equipada con una estación de plasma o en modo dual con una antorcha de oxicorte para un espesor de corte máximo de 60 mm.

La construcción mecánica en las máquinas MicroCut-P es compacta. El pórtico es doblemente guiado mediante un eje y correas con un solo motor. El movimiento del carro transversal se realiza también mediante correas. La estación de corte lleva incorporado un sistema de regulación de altura inicial y control automático de altura de corte (THC).

La máquina está equipada con servomotores y reductores planetarios de alta precisión. El sistema de guiado mediante guías lineales de precisión garantiza un largo periodo de precisión y exactitud en la máquina.

La mesa de corte es de construcción robusta seccionada para la aspiración. La misma que está completamente separada de las guías para que la manipulación de las chapas no repercuta negativamente en la precisión de la máquina.

MSNC-500 es uno de los más avanzados controles numéricos en el área de corte por plasma, oxicorte, chorro de agua y corte por láser. El sistema ha sido desarrollado para el corte y es extremadamente fácil de usar por los usuarios además de flexible. Integra una base de datos de parámetros de corte para las diferentes tecnologías facilitando mucho el uso de la máquina.

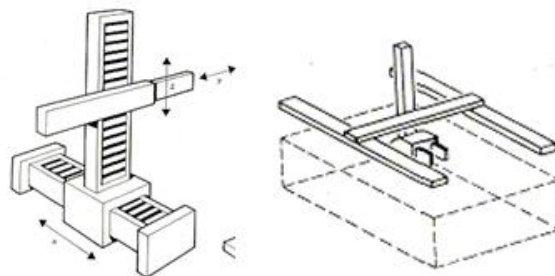
#### Características técnicas:

- Máquina para corte por plasma
- Longitud de mesa: 3500 mm
- Anchura de mesa: 2000 mm
- Velocidad máxima: 25.000 mm/min.
- Motorización: doble arrastre con correas y un solo motor.
- Espesor de corte: 1 mm a 60 mm
- Control de altura: basado en control de arco
- CNC: MSNC-500



**Figura 1** Máquina CNC Corte por Plasma  
Fuente: (Micro Step, 2015)

El presente proyecto se enfocará en una máquina con fines educativos, aun así se espera lograr que esta sea semejante a una máquina industrial, por lo cual el chasis de soporte de la máquina debe ser compacto y rígido para evitar vibraciones a la hora que realice el trabajo. Además, contará con un área de trabajo de 1200x1200 mm por lo que se espera que tenga 1600x1600mm como medidas totales de la máquina. La máquina tendrá la configuración de un robot tipo cartesiano (ver Figura 2), para su respectivo movimiento en los 3 ejes (X, Y y Z), para esto la transmisión debe ser robusta, con el fin de que pueda soportar la carga de cada uno de estos ejes. Además, debe contar con guías lineales que reduzcan la fricción, y para que el desplazamiento sea libre, logrando así precisión en el trabajo realizado.



**Figura 2** Esquema ejes CNC robot tipo cartesiano

La mesa de corte debe ser seccionada, para su limpieza, y además debe ser independiente de la transmisión y las guías, ya que de no ser así la salpicadura del material al realizar el trabajo puede afectar a estos sistemas dañándolos, y posteriormente presentando problemas en el trabajo. Para el control de todo el sistema mecánico se utilizará el software Mach3, el cual tiene una gran cantidad de características de CNC. Mach3 permite controlar el movimiento de los motores (paso a paso y servomotores) mediante código G.

Cabe mencionar que un punto muy importante para este tipo de procesos, es la extracción de gases generados durante el corte por plasma. Nuestro proyecto será ubicado en una de las estaciones del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – “ESPE”, las cuales ya poseen un sistema de extracción de gases mediante campanas que permiten eliminar la emisión nociva de la máquina, además de incorporar un sistema de cama de agua para tener una mejor extracción del polvo de hierro generado en el proceso de corte.

### **1.3. Justificación e importancia**

El proceso de manufactura de corte por plasma posee varias aplicaciones, las más importantes son: corte de cualquier material metálico conductor, especialmente en acero estructural, inoxidable y metales no ferrosos; como proceso complementario en trabajos especiales de producción de series pequeñas, piezas con tolerancias muy ajustadas, mejores acabados, baja afectación térmica del material (alta concentración energética). La máquina presenta también ventajas como, el inicio del corte prácticamente instantáneo que produce una deformación mínima de la pieza, cortes a altas velocidades,

produce menos tiempos muertos, (no se necesita precalentamiento para la perforación), cortes de alta calidad y muy buen acabado.

En el Ecuador, el corte de materia prima en el sector industrial es la principal aplicación para esta tecnología. Como se indicó anteriormente el corte por plasma posee ventajas que mejoran en gran manera la producción de piezas, incluso en bajas tolerancias. Sin embargo, en nuestro país el proceso en su mayoría es manual, por lo cual se requiere de mayor tiempo de mecanizado y habilidad humana, esto incrementa los errores en el proceso. Nuestro proyecto pretende impulsar la fabricación de máquinas automatizadas dentro del país, otorgando una investigación completa acerca de los parámetros que intervienen en el corte por plasma más la implementación de un sistema con control numérico computarizado.

El presente proyecto permitirá a estudiantes y a docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", fortalecer los conocimientos requeridos ante este tipo de tecnología, mediante la inclusión de nuestra máquina como material didáctico para prácticas de laboratorio de control numérico computarizado y procesos de manufactura.

#### **1.4. Área de influencia**

Como se mencionó anteriormente, la máquina de control numérico computarizado de nuestro proyecto tiene fines educativos y su área de influencia es el Laboratorio de Procesos de Manufactura enfocado en sus estudiantes y docentes. La máquina permitirá fortalecer sus conocimientos y su familiarización con maquinaria industrial, mejorando las prácticas de laboratorio de control numérico computarizado y procesos de manufactura.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

Diseñar e implementar una máquina (robot) tipo cartesiano para corte por plasma para el Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” a lo largo de un período de 6 meses.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Diseñar un sistema mecánico de transmisión de movimiento y guías que permitan un correcto desplazamiento lineal en los tres ejes
- Implementar un control numérico para el posicionamiento y velocidad del sistema mecánico garantizando precisión y control en el trabajo realizado.
- Implementar un sistema electrónico que permita el movimiento del sistema mecánico mediante motores DC con sus respectivos controladores.
- Implementar una interfaz de comunicación entre un computador, controladores y motores.

## **1.6. Alcance del proyecto**

Para la descripción del alcance del proyecto planteado se tiene los siguientes subsistemas mostrados en la Tabla 1:

**Tabla 1**  
*Alcance del proyecto*

Subsistemas		
Mecánicos	Eléctricos/Electrónicos	Control
<ul style="list-style-type: none"> <li>Chasis de soporte base para la estructura de movimiento.</li> <li>Transmisión de movimiento.</li> <li>Guías para desplazamiento lineal.</li> <li>Soporte de pistola plasma.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Actuadores</li> <li>Sensorial</li> <li>Indicadores de funcionamiento</li> <li>Protección</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Control</li> <li>Interfaz entre el computador y los actuadores eléctricos</li> </ul>

### 1.6.1. Componentes mecánicos

#### 1.6.1.1. Chasis de soporte base para estructura de movimiento

Este subsistema es la base del sistema automático de corte por plasma por lo cual es necesario que cuente con características tales como robustez, estabilidad, rigidez, que evite vibraciones al sistema, además que estará unido a otros elementos del sistema de movimiento por lo cual es necesario que los elementos que se utilicen sean fáciles de realizar su manufactura por arranque de viruta y por soldadura.

#### 1.6.1.2. Transmisión de movimiento

Este subsistema se ve directamente relacionado con la carga que va a soportar el sistema de transmisión de movimiento, por lo cual habrá que considerar el peso de cada uno de los elementos para así poder elegir de manera correcta un sistema de transmisión ya que, de no ser así, este no tendría la capacidad para trasladar la pistola de plasma de manera eficiente.

### **1.6.1.3. Subsistema de guías para desplazamiento lineal**

Las guías para el desplazamiento lineal son de gran importancia ya que de estas dependerá que el movimiento se realice de manera uniforme y con la menor fricción posible logrando así que el efector final se desplace a la posición deseada y con velocidad óptima para garantizar el trabajo realizado.

### **1.6.1.4. Subsistema de soporte de pistola plasma.**

Para este subsistema, el laboratorio de Procesos de manufactura cuenta con la herramienta de corte por plasma, dicha herramienta será sujeta mediante un sistema de placas que permitirán colocarla de manera perpendicular al área de trabajo y mediante la cual se pueda variar su altura de corte, para ello este sistema debe ser firme sin posibilidad a vibraciones, además debe contar con la facilidad para desmontar la pistola de plasma si así se requiere.

## **1.6.2. Componentes electrónicos/eléctricos**

### **1.6.2.1. Actuadores**

El accionamiento eléctrico será a través de motores, que deberán brindar características de velocidad y torque, adecuadas para un correcto desplazamiento en los diferentes ejes del sistema mecánico. Es importante recalcar que al ser diferentes las distancias por recorrer de cada uno de los ejes y también las cargas que dichos actuadores deberán transportar, estos pueden variar en las características antes mencionadas (velocidad y torque).



### **1.6.2.2. Subsistema sensorial**

Dado que existen sensores internos que nos permiten conocer información acerca del robot automático (velocidad, posición, torque, etc.) y sensores externos que nos permiten obtener información del comportamiento del entorno de trabajo, se elegirá los sensores en función de la tarea o la variable de interés dentro del sistema, teniendo en cuenta la sensibilidad, exactitud y repetibilidad de los sensores para adquirirlos evitando así un sobredimensionamiento de los mismos.

### **1.6.2.3. Indicadores**

Este conjunto de elementos tiene por objetivo indicar al operador de la máquina el estado de la misma, si se encuentra en correcto funcionamiento o si por algún motivo se detectan problemas dentro del proceso evitando que existan fallos no deseados.

### **1.6.2.4. Protección**

Estos elementos cumplen la función de proteger los elementos eléctricos de la máquina de posibles fallos en la energía que se esté suministrando a la máquina, como pueden ser voltajes no deseados, cortocircuitos, etc., evitando así pérdidas de elementos costosos. Además el sistema contará con botón de paro de emergencia en caso de existir algún tipo funcionamiento no deseado, como medida de seguridad industrial.

### **1.6.3. Componentes del sistema de control**

#### **1.6.3.1. Control**

Este subsistema es el que gobierna el trabajo de los actuadores, especificando un rango de valores de trabajo para que estos cumplan su función de manera eficiente. Existen muchas maneras de controlar los actuadores, por lo cual es importante elegir un método de control adecuado, para no sobredimensionar el control de la máquina y así no realizar gastos innecesarios.

#### **1.6.3.2. Interfaz entre computador y actuadores eléctricos**

Para que el efector final de la máquina pueda recorrer una trayectoria que se le especifique, es necesario contar con una interfaz de comunicación entre el computador y los actuadores eléctricos.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Máquinas CNC**

El Control Numérico Computarizado (CNC), tiene su fundamento en realizar la automatización de una máquina herramienta usando números y letras. Para lo cual estos valores son programados, ingresados y leídos de una manera autónoma, la cual es decodificada para lograr que la máquina realice mediante sus actuadores las instrucciones previamente programadas.

El autor (Mikell, 1997) realiza una comparación entre las máquinas convencionales y las máquinas CNC en lo que menciona que la diferencia central entre ellas, está dada por los movimientos automáticos, además de la electrónica implicada dentro de esta, cuyo fin es controlar sus movimientos de una mejor manera y todo esto ligado a un software que permite su manipulación por parte del usuario.

##### **2.1.1. Esquema General**

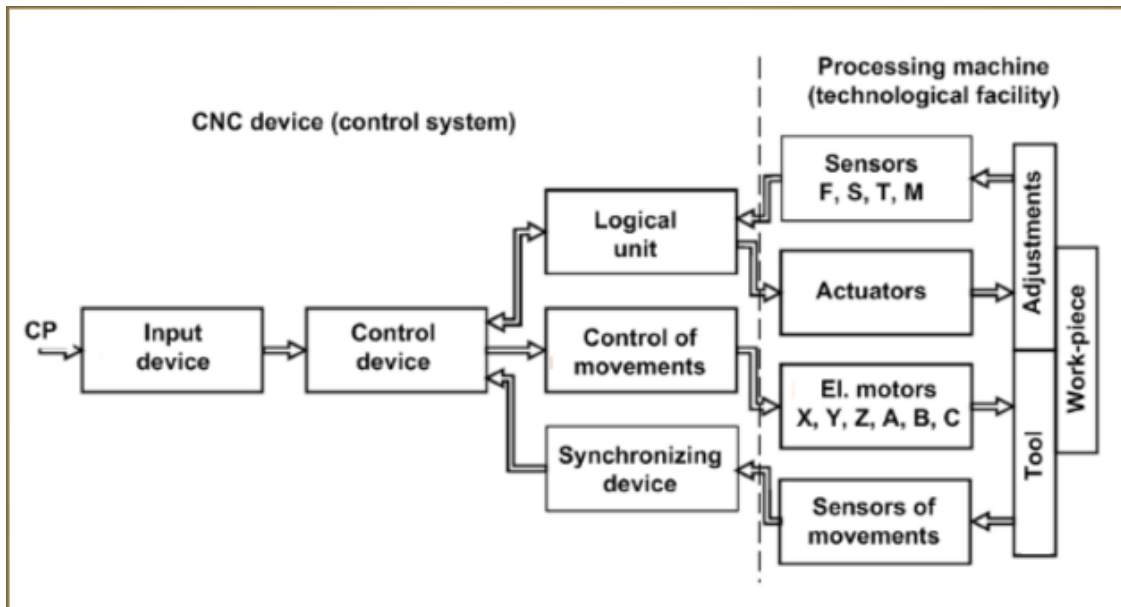
Una máquina herramienta CNC, posee una arquitectura general (ver Figura 3), en la que se observan dos partes principales:

La primera, el dispositivo CNC (CNC device, control system), que está formado por 3 partes:

1. Dispositivo de entrada: por medio de esta se ingresa la información (números o letras) para el control de la máquina
2. Dispositivo de control: esta etapa se encarga de varias funciones, entre ellas, retroalimentar la información recibida de los sensores y actuadores, por medio

de la unidad lógica, enlazándola con el control de movimiento de los motores para cada uno de los respectivos ejes y de la misma forma los sincroniza mediante los sensores que pueden ser de posición o de velocidad.

### 3. Unidad Lógica, Control de movimientos, Dispositivo de sincronización



**Figura 3** Arquitectura General Máquina CNC

Fuente: (CNC Programming Basics, 2012)

La segunda etapa principal es la de Procesamiento de Máquina (facilidad tecnológica), en ella se encuentra lo relacionado a los ajustes (de sensores y actuadores), herramienta (sensores de movimiento y motores) y el espacio de trabajo para dicha herramienta.

#### 2.1.2. Características de las máquinas CNC

Según (Ruiz, 2004), uno de los grandes avances tecnológicos en la actualidad es el desarrollo de máquinas automatizadas CNC, dado que estas presentan muchas ventajas, entre las cuales se menciona:

- Mejora altamente considerable en la calidad de la producción, por su mejor precisión, repetibilidad y ausencia de errores humanos al momento del proceso de manufactura.
- Facilidad para la realización de procesos complejos para el humano, pero que con esta máquina son sencillos de realizar, además de tener una alta precisión, con márgenes de error bajos.
- Costo de producción menor, debido a que el tiempo de uso de la máquina es reducido en comparación a una convencional, además tiene la capacidad de ser calibrada para realizar el mismo proceso muchas veces de manera autónoma, lo que reduce considerablemente los tiempos de producción, e inspección, dado que con los resultados obtenidos de la primera pieza fabricada se requiere una inspección menos minuciosa para las demás piezas subsiguientes producidas.

El mismo autor (Ruiz, 2004), menciona sin embargo que existen desventajas en este tipo de máquinas, entre las que se tiene principalmente:

- Al ser un proceso de manufactura avanzado, es necesario tener las herramientas adecuadas para optimizar los resultados, ya que en su mayoría estas son de alto costo, en comparación a las máquinas convencionales.
- A pesar de tener una gran reducción de errores en la producción por imprecisiones humanas, sigue existiendo el error ocasionado por los operadores al no calibrar adecuadamente la máquina, o simplemente manipular de una manera errada la misma, por esta razón se suma a los costos

de adquisición de este tipo de máquinas la capacitación a los mismos, e incluso para su mantenimiento se requiere de personal capacitado.

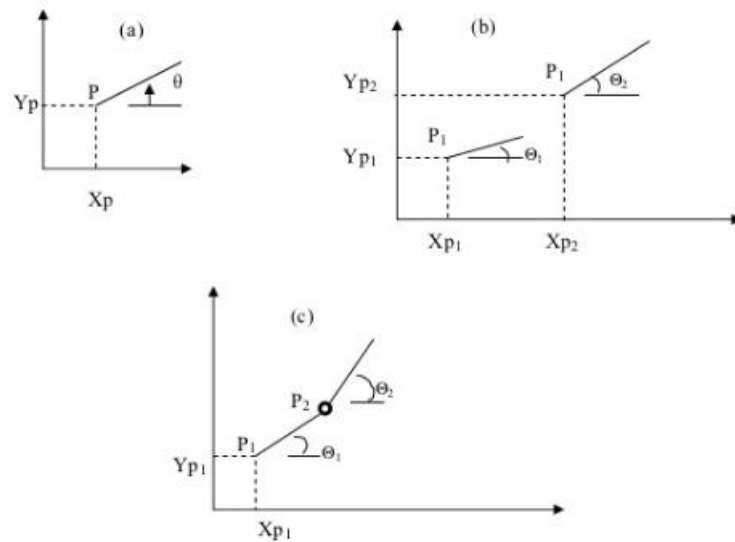
### **2.1.3. Grados de Libertad**

Existen diferentes definiciones de grados de libertad desde el punto de vista de los mecanismos y las máquinas – herramientas en general.

Una de ellas es la denominada por (UNAL, 2014) en la que define a los grados de libertad de una máquina en general como el número máximo de dimensiones que pueden ser manejadas de manera simultánea, sabiendo que mientras más grados de libertad posea una máquina esta es mucho mejor.

Según el autor (Castillo, 2007) existen diferentes tipos grados de libertad, en la Figura 4 se observan estos:

- En el gráfico superior izquierdo, se tiene un elemento que posee tres grados de libertad, ya que tiene un movimiento libre en las coordenadas cartesianas  $x$  e  $y$ , además de un movimiento independiente del ángulo  $\Theta$ .
- En el gráfico superior derecho, se tienen dos elementos de tres grados de libertad cada uno, es decir que en total poseen seis grados de libertad.
- Por último en el gráfico inferior, los elementos unidos en un punto tiene cuatro grados de libertad, ya que su unión de revolución resta dos grados de libertad en comparación al caso anterior.

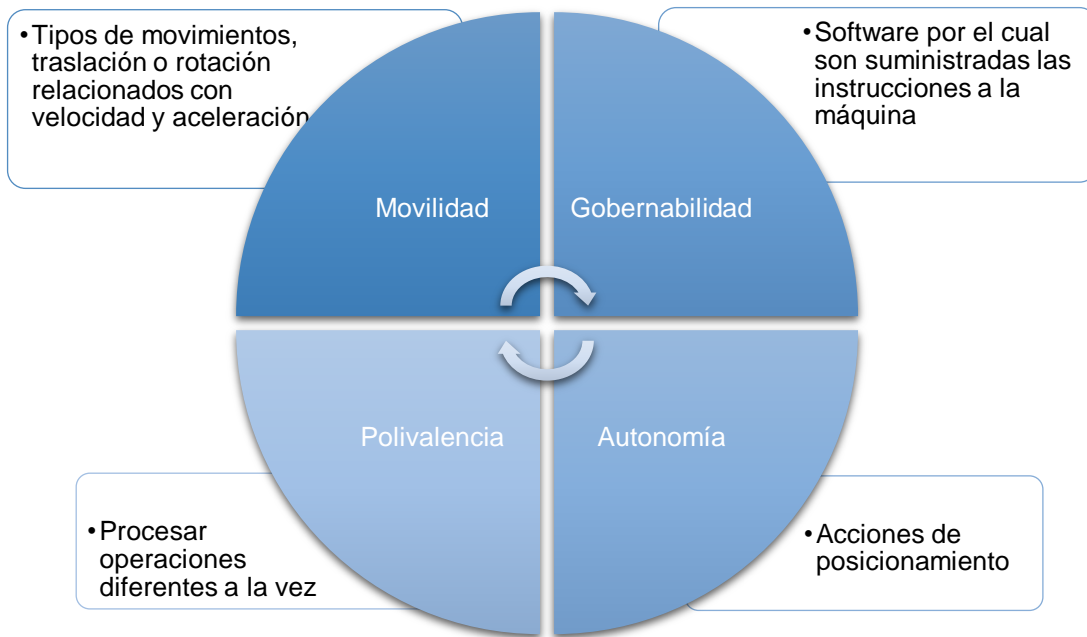


**Figura 4** Movilidad o Grados de Libertad de una Máquina Herramienta  
 Fuente: (Castillo, 2007)

#### 2.1.4. Sistemas de transmisión

Existen diferentes sistemas de transmisión para el movimiento de una máquina de control numérico computarizado, su diferencia principal radica en el costo de construcción y en la capacidad de precisión que presenta su movimiento.

Estos sistemas de transmisión según Nicolás V. (Castiglione, 2011) deben confirmar cuatro capacidades básicas de movimiento, ver Figura 5:



**Figura 5** Capacidades de transmisión de una Máquina Herramienta

#### 2.1.4.1. Transmisión por tornillo de bolas recirculantes (ballscrew)

En la publicación del Especialista en Gestión Estratégica de Diseño (UBA), Nicolás V. (Castiglione, 2011) menciona que el tornillo de bolas recirculantes (ver Figura 6), presenta ventajas como:

- Sistema de transmisión que se caracteriza por convertir un movimiento de rotación en uno de traslación, además, por sus características físicas presenta un paso suave, liviano y con juego nulo entre los componentes del mismo y teniendo la correcta lubricación este presenta un rozamiento mínimo y mucha precisión de avance.



- Caracterizado por tener una pérdida insignificante de potencia por fricción, ya que como se mencionó antes, existe rozamiento mínimo entre sus componentes.
- Su vida útil es larga y su capacidad de carga es alta
- Sistema con bajo consumo de energía, ya que presenta un par de movimiento inicial muy bajo, lo que facilita el uso de motores para su automatización.

El avance se produce por el giro del tornillo, siendo uno de los más comunes avanzar cinco milímetros por vuelta. También integran la ecuación para el correcto funcionamiento de este componente, el paso de rosca y la cantidad de espiras. (p. 35)



**Figura 6** Transmisión Tornillo de Bolas Recirculantes  
Fuente: (XYZCNC, 2013)

#### **2.1.4.2. Transmisión por piñón y cremallera**

Este tipo de transmisión según el autor (Castiglione, 2011), poseen las siguientes características:

- Solidez y precisión para desplazamientos largos
- Opción ideal en máquinas de características robustas, cargas altas y desplazamientos a velocidades de trabajo aceptables.

- La precisión de este sistema es de dos centésimas de milímetro, es decir menor que la centésima de milímetro que ofrece el de bolas recirculantes mencionado en la sección 2.1.4.1.

Este tipo de sistemas (ver Figura 7) según el estudio realizado por el autor garantizan décadas de vida útil, ya que la aleación metálica de la cremallera es de mayor dureza que la del piñón, elemento de menor costo en caso de necesitar cambio por desgaste.



**Figura 7** Transmisión Piñón – Cremallera  
Fuente: (XYZCNC, 2013)

### **2.1.4.3. Transmisión por correa de caucho**

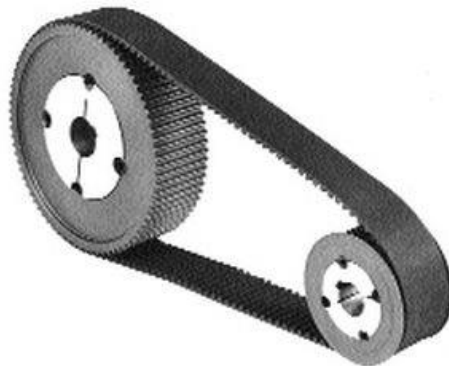
Este tipo de transmisión (ver Figura 8) presenta las siguientes ventajas en comparación a los sistemas mencionados anteriormente:

- Más económico en comparación a los mencionados en los puntos anteriores.
- Tiempo de montaje final reducido lo que conlleva a un importante ahorro de costos, comparado con el valor y la cantidad de horas requeridas para la instalación y la exactitud requerida para un tornillo de precisión o una cremallera.

- Para (Castiglione, 2011), este sistema es el más sencillo en cuanto a diseño y utilización, además de no presentar la necesidad de ser engrasado, y su facilidad y rapidez para montaje y desmontaje.

Como todos los sistemas, este presenta desventajas como las siguientes:

- Mayor deterioro en comparación al tornillo de precisión y al sistema piñón-cremallera ya que son mayoritariamente afectados por el polvo, humedad, luz solar y otros factores.
- Están limitados a soportar condiciones de temperatura por su material de fabricación.

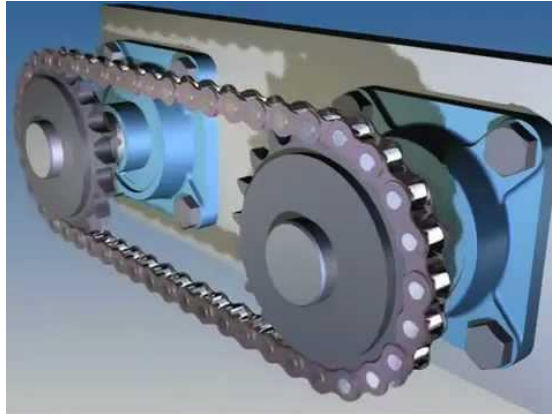


**Figura 8** Transmisión por correa de caucho

Fuente: (Industry, 2008)

#### **2.1.4.4. Transmisión por cadena y p Polea dentada**

Las cadenas de transmisión (ver Figura 9) son la mejor opción para aplicaciones donde se requiera transmitir grandes pares de fuerza y donde los ejes de transmisión se muevan en un rango de velocidades de giro entre medias y bajas.



**Figura 9** Transmisión por cadena  
Fuente: (Veleztecno, 2012)

Según (Ingemecánica, 2017) expertos en transmisiones por cadenas, se menciona que este tipo de transmisión es robusta, permite trabajar en condiciones ambientales adversas y temperaturas elevadas. Adicionalmente tiene una relación de transmisión fija entre su velocidad y ángulo de giro entre la entrada y salida del sistema.

### **2.1.5. Actuadores**

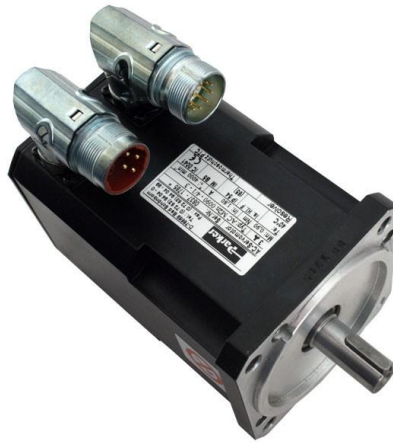
Los actuadores más utilizados para este tipo de maquinaria son el servomotor y el motor a pasos.

#### **2.1.5.1. Servomotor**

Los servomotores (ver Figura 10) son en general un conjunto de cuatro cosas:

- Motor de corriente continua (DC)
- Caja de reducción (conjunto de engranes)
- Circuito de control
- Sensor de posición (puede ser un potenciómetro)

Este tipo de actuadores pueden ser posicionados con mayor precisión que los motores DC estándar, por lo general su conexión está dada por 3 cables que corresponden a la alimentación, tierra y control para el ángulo de movimiento.



**Figura 10** Servomotor  
Fuente: (SonRobots.com, 2008)

Los servomotores presentan la desventaja de no tener un giro libre, ya que está limitado a un ángulo máximo de 180 grados en ida y vuelta.

Según (SonRobots.com, 2008), con estos actuadores se logra obtener un alto par rápido y rotación precisa dentro de su ángulo de giro, su mayor uso está dado para brazos robóticos, control de timón, entre otros.

#### **2.1.5.2. Motor a pasos**

Un motor paso a paso (Ver Figura 11) es muy similar a un servomotor, con la diferencia de que este motor controla su giro por medio de múltiples electroimanes dentados alrededor de un engranaje central con el que se define su posición.

Su funcionamiento es descrito de la siguiente manera: si el electroimán "A" es alimentado este atrae los dientes del engranaje central y los alinea, ligeramente desplazado de la posición del electroimán "B", de la misma forma sucede inversamente

cuando el electroimán “B” es alimentado, es decir mediante esta activación y desactivación se genera la rotación del motor. Esta rotación es denominada “paso” y de allí el nombre de motor a pasos.

Entre sus características generales se tiene las siguientes:

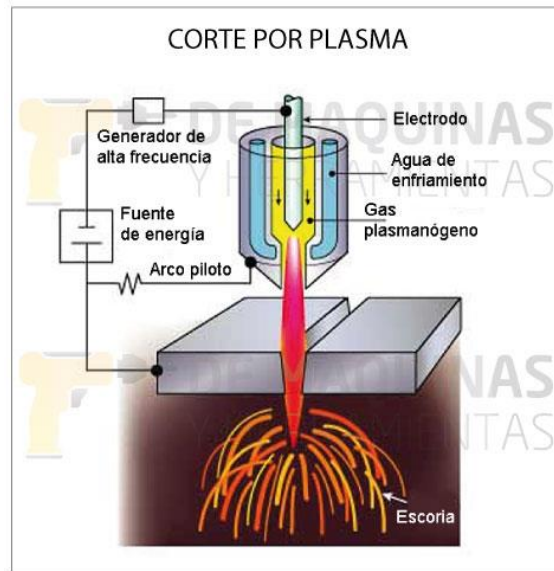
- Poseen una rotación completa de 360 grados.
- Motor más lento en comparación al servomotor, sin embargo su rotación es precisa y de fácil control, lo que mejora su posicionamiento
- Su mejor aplicación está direccionado a las impresoras 3D y dispositivos de características similares en cuanto a posicionamiento.



**Figura 11** Motor a Pasos  
Fuente: (SonRobots.com, 2008)

## 2.2. Corte por plasma

El principio de corte por plasma (ver Figura 12) basa su funcionamiento en forzar el flujo de plasma a través de una boquilla, logrando transferir un arco eléctrico, fluyendo desde un electrodo que no se derrite o un llamado también cátodo a la pieza de trabajo o ánodo. De esta manera se obtiene un chorro de plasma a temperaturas cercanas a los 10000 grados. Este método se emplea con materiales netamente conductores eléctricos.



**Figura 12** Proceso de Corte por Plasma  
Fuente: (Herramientas, 2014)

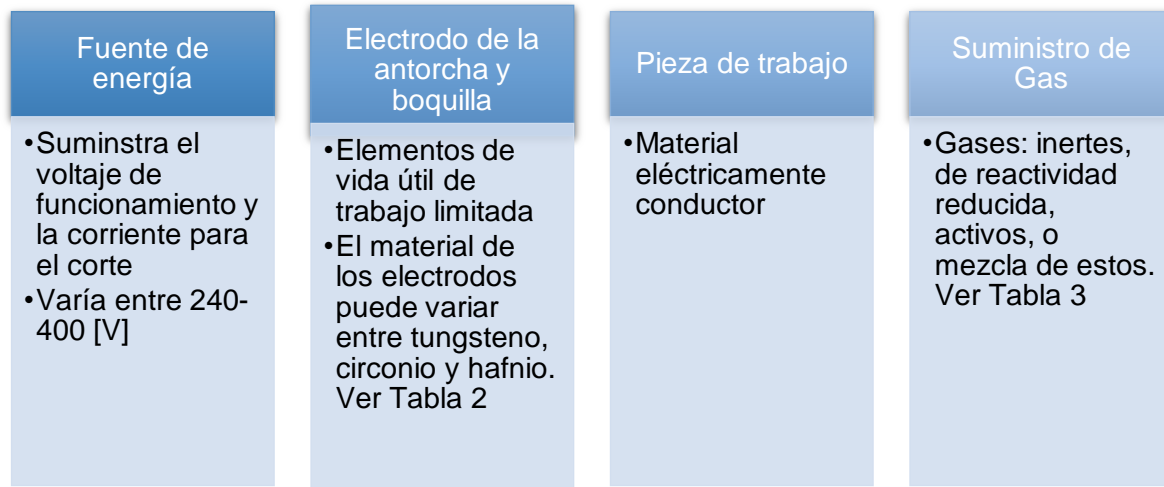
Este proceso inicia formando un arco eléctrico que se crea por la presión de aire en la boquilla y la corriente eléctrica que fluye por el electrodo, de esta forma se cierra el circuito. En la Figura 12 se observa el arco formado por el plasma para realizar el corte en la pieza de trabajo mediante una ionización parcial producida por el incremento de energía.

Este proceso de corte según (Rauscher, 2010) presenta las siguientes desventajas:

- Genera escoria, polvo de hierro que debe ser debidamente tratado para evitar la contaminación del lugar de trabajo
- Es necesario como recomendación usar una cama de agua, que permite una mejor extracción de este polvo de hierro, en comparación a una campana de extracción que no logra limpiar el ambiente completamente.

### 2.2.1. Equipamiento para el corte mediante plasma

Según (Group, 2011), para este tipo de proceso de manufactura, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones en su equipamiento (ver Figura 13):



**Figura 13** Proceso de Corte por Plasma

**Tabla 2**

*Datos característicos de las piezas consumibles utilizadas con quemadores de plasma*

Material	Símbolo	Temperatura de Fusión [°C]	Gas Usado	Conductividad térmica a 20 °C [W/mK]
Tungsteno	W	3400	Ar	≈174
Óxido de tungsteno	WO <sub>3</sub>	1473	Ar/H <sub>2</sub>	-
Zirconio	Zr	1852	Aire	≈22
Óxido de Zirconio	ZrO <sub>2</sub>	2700	-	≈2.5
Nitruro de Zirconio	ZrN	2982	-	-
Hafnio	Hf	2227	O <sub>2</sub>	-
Óxido de Hafnio	HfO <sub>2</sub>	1700	Aire	≈29
Nitruro de Hafnio	HfN	3305	-	-
Cobre	Cu	1083	-	-
Óxido de Cobre	Cu <sub>2</sub> O	1235	Todos	≈400
Plata	Ag	961	Todos	≈429

Fuente: (Group, 2011)



**Tabla 3***Principales propiedades de gases de corte*

Propiedad	N <sub>2</sub> (N)	H <sub>2</sub> (H)	O <sub>2</sub> (O)	Ar	Aire
Energía de ionización [eV]	15.5 (14.5)	15.6 (13.5)	12.5 (13.6)	15.8	34.0
Energía de disociación [eV]	9.8	4.4	5.1	-	-
Peso Atómico	14.0	1.0	16.0	40.0	14.4
Conductividad térmica en °C [W/mK]	24.5	168.0	24.7	16.6	24.5

Fuente: (Group, 2011)

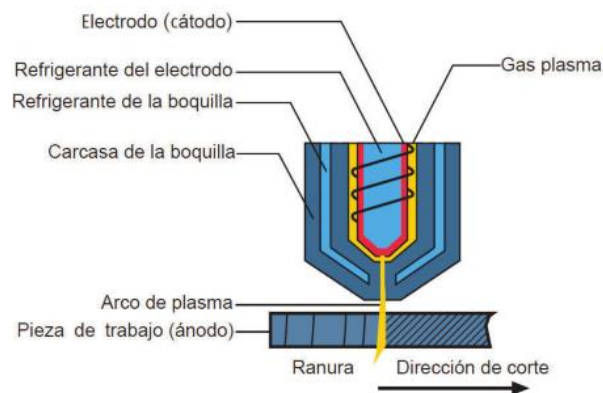
### 2.3. Técnicas y Procedimientos para el corte por plasma

Estas técnicas han sido desarrolladas con el fin de mejorar el proceso de corte por plasma, reduciendo sus efectos dañinos al medio ambiente y al ser humano, y optimizando su capacidad y calidad en el proceso.

#### 2.3.1. Corte mediante plasma convencional

Este método (ver Figura 14) presenta las siguientes características:

- Antorcha sencilla y es de uso para un único gas, generalmente es nitrógeno, oxígeno o mezclas de estos.
- El gas del plasma se desplaza tangencialmente alrededor del electrodo.
- La antorcha para este método se puede enfriar con air o con agua.
- Por medio de este método se puede cortar espesores de hasta 160 mm.

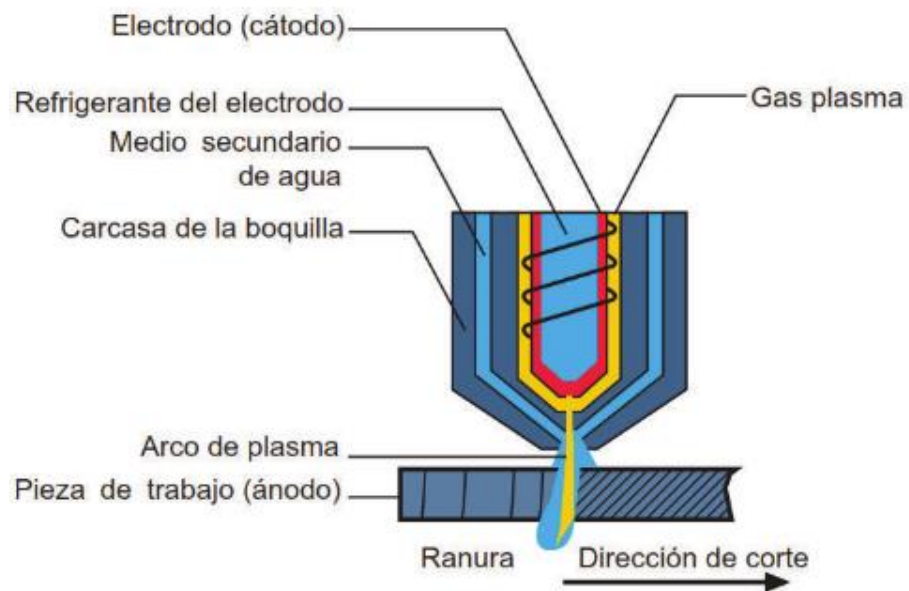
**Figura 14** Esquema de Corte Método Convencional

Fuente: (Group, 2011)

### 2.3.2. Corte mediante plasma con medio secundario de agua

Este método (ver Figura 15) posee las siguientes características:

- Crear una atmósfera específica a su alrededor
- Se inyecta un medio secundario que rodea al arco de plasma.
- El agua se descarga como un escudo en forma de aerosol, es descompuesta por el arco de plasma.
- Por las condiciones de corte, este método hace que la superficie de corte sea brillante
- Mediante este método de corte por plasma se logra cortar hasta espesores de 50mm, generalmente en aluminio o aceros de alta aleación.

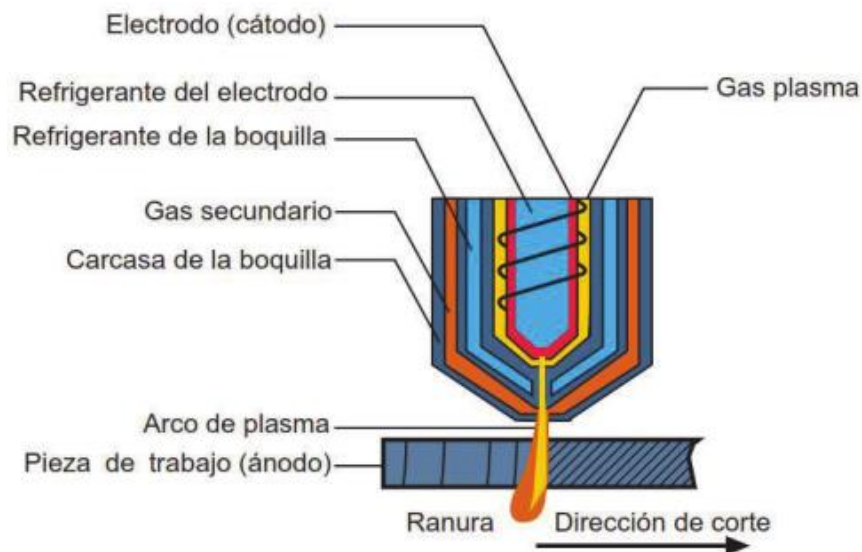


**Figura 15** Esquema de Corte con medio secundario de agua  
Fuente: (Group, 2011)

### 2.3.3. Corte mediante plasma con medio secundario de gas

Este método (ver Figura 16) es similar al anterior, su diferencia radica en el medio secundario que para este caso es gas y presenta las siguientes características:

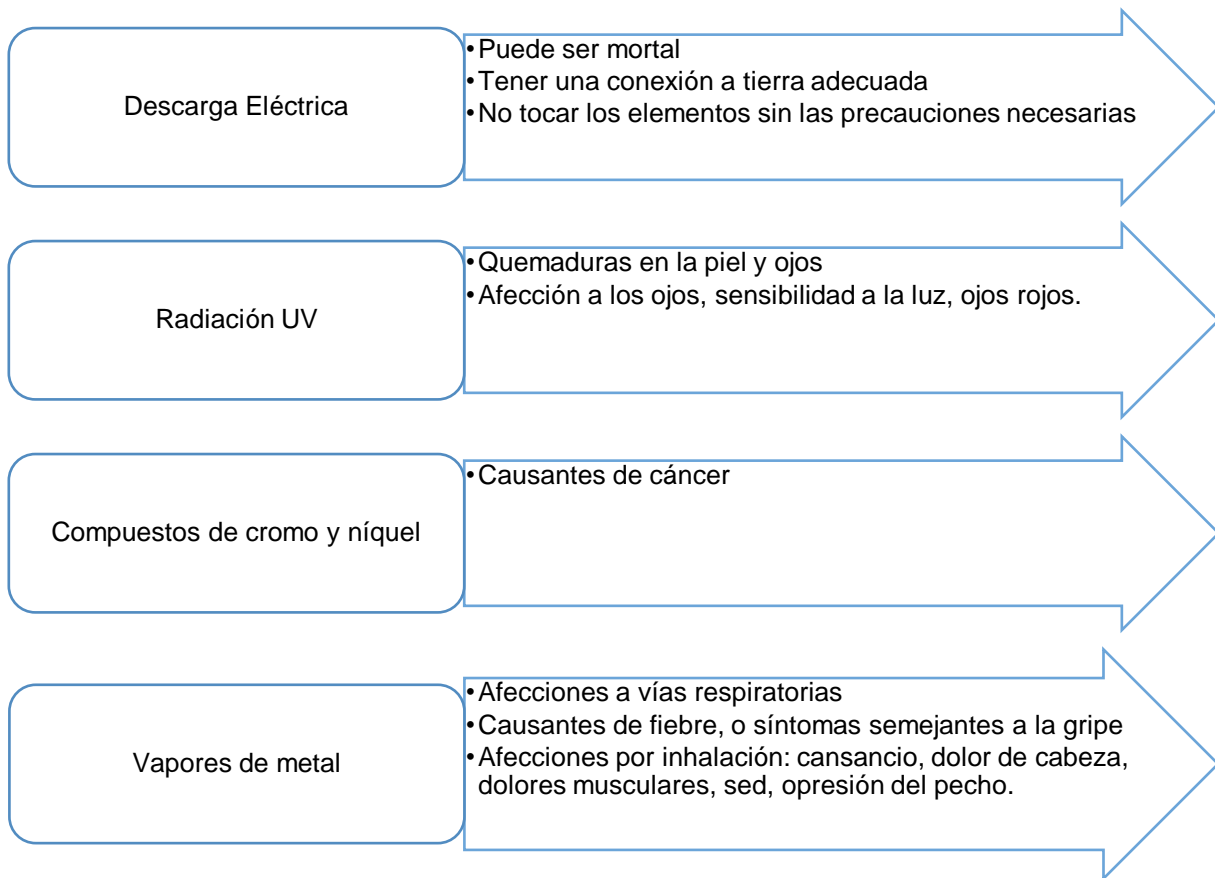
- Se tiene un incremento en la potencia del chorro por la atmósfera que se crea en su alrededor
- Mejora la calidad y la velocidad del corte
- Con este método se logra cortar espesores de hasta 75 mm.



**Figura 16** Esquema de Corte con medio secundario de gas  
Fuente: (Group, 2011)

### 2.4. Normas de seguridad

Este tipo de proceso como todos los procesos de manufactura requieren de las precauciones necesarias para su uso, ya que puede ser nocivo para las personas, entre los principales riesgos se tiene los siguientes, ver Figura 17:



**Figura 17** Principales riesgos de corte por plasma

Cabe recalcar adicionalmente el uso de los elementos de protección personal (EPP), que para este proceso de corte se sugiere:

- Respiradores
- Orejeras
- Guantes
- Botas
- Cascos
- Protección para ojos y cara
- Vestir prendas apropiadas para este trabajo

## CAPÍTULO III

### DISEÑO, SELECCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO

#### 3.1. Despliegue de la función de calidad (QFD)

El propósito de la matriz de planificación QFD es trasladar las necesidades del cliente a las características de las actividades del proceso, las cuales serán desplegadas a través del diseño del mismo. Para ello se desarrolla los siguientes pasos.

##### 3.1.1. Requerimientos de calidad en términos del cliente

Esta etapa de análisis consiste en describir las necesidades o requerimientos del producto a desarrollar, valorando la importancia de cada uno de ellos (en una escala del 1 al 5, siendo 1 la de menor importancia), en función de la opinión del solicitante (ver Tabla 4), cada necesidad es enlistada en cuanto a los requerimientos de la máquina CNC para corte por plasma:

**Tabla 4**

*Listado de necesidades del Laboratorio de Procesos de Manufactura*

Número	Enunciado de Necesidad	Importancia
1	La máquina realiza de manera autónoma los procesos de manufactura de corte por plasma	5
2	La máquina tiene una capacidad de corte de media plancha de material comercial (1.2x1.2 m)	4
3	El corte realizado por la máquina debe tener un error en precisión que no sea superior a 0.5 mm	3
4	Capacidad de corte de material de hasta 10 mm de espesor	3
5	La máquina puede trabajar en un área de 2x2 m	4
6	La máquina es de un material ligero y con buen acabado	3
7	La máquina mejora la producción por su velocidad de trabajo y también mejora la calidad de las piezas procesadas	5
8	La máquina es de bajo costo, pero de buena calidad y productividad	5
9	La máquina no presenta problemas para trabajar un tiempo útil de 8 horas al día mínimo	3

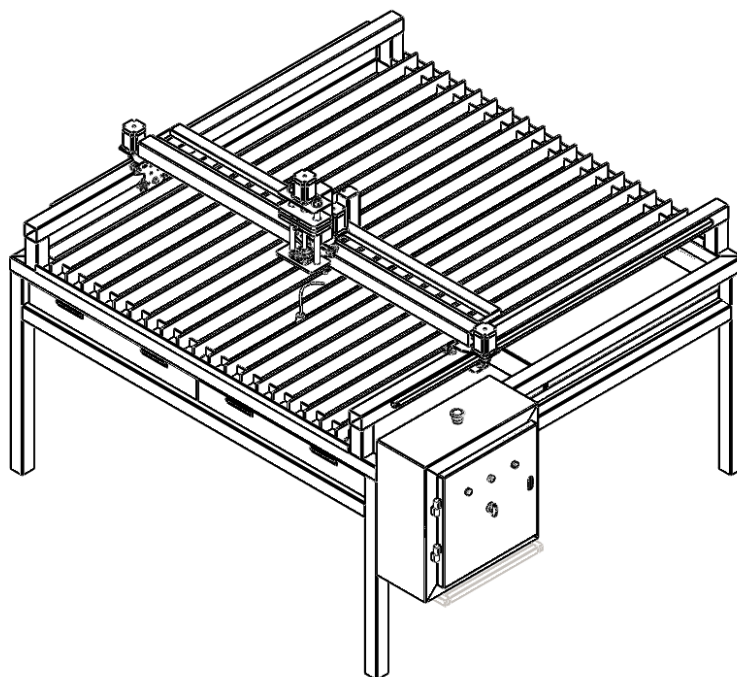
CONTINÚA



10	El corte realizado por la máquina es libre de vibraciones, lo que mejora su precisión	4
11	La máquina realiza movimientos limpios en su desplazamiento	4
12	Los elementos de la máquina deben ser de fácil adquisición para sus repuestos	3
13	La manufactura de la máquina debe ser en lo más posible fácil	2

### 3.1.2. Alternativa de solución

En base a las necesidades mencionadas anteriormente por parte del Laboratorio de Procesos de Manufactura y una investigación de las máquinas industriales existentes en el mercado, se presenta la alternativa de solución de la Figura 18.



**Figura 18** Esquema de alternativa de solución

La cual entre sus características técnicas presenta las siguientes:

- Estructura de pórtico móvil y mesa fija para el sistema de corte mecanizado
- Dimensiones máximas: 2 x 2 m
- Mesa de trabajo de 1.2 x 1.2 m

- Precisión de corte esperada: 0.5 mm de error
- Velocidad máxima de corte: 6000 mm/min
- Espesores: mínimo de 1.9 mm y máximo de 12 mm
- Tipo de movimiento: motorizado
- Control variable de altura y posicionamiento de la antorcha

### 3.1.3. Actividades del proceso

En esta etapa de diseño, se lista las actividades del proceso (ver Tabla 5) mediante las cuales se logrará satisfacer los requerimientos (necesidades) provistas por el cliente para asegurar un buen producto o servicio.

**Tabla 5**

*Listado de actividades del proceso de corte por plasma*

Número	Número de necesidad	Parámetro	Importancia	Unidades
1	2	Área de trabajo de 1.2x1.2 m	5	m
2	4	Espesor de corte mínimo	3	mm
3	1,10	Tiempo útil de uso de la máquina	3	h
4	1,3	Precisión de la máquina	4	%
5	7, 8, 12	Velocidad de corte	4	mm/min
6	7, 8, 12	Velocidad de avance	4	m/s
7	1, 11, 12	Vibración	5	Hz
8	1, 6	Masa Total	3	Kg
9	8	Costo de manufactura	4	\$\$
10	6, 8	Estética	4	Subjetivo
11	2, 5	Dimensión de ancho de la máquina	4	m
12	2, 5	Dimensión de largo de la máquina	4	m
13	2, 5	Dimensión de alto de la máquina	4	m
14	1, 4, 6	Resistencia del material de la máquina	5	MPa

CONTINÚA



<b>15</b>	8, 13, 14	Facilidad de manufactura del material	4	N/A
<b>16</b>	7, 8, 11, 12	Velocidad de desplazamiento (fricción)	4	m/s
<b>17</b>	7, 8, 11, 12	Potencia de la máquina	4	HP
<b>18</b>	3, 7, 8, 11, 12	Exactitud de la máquina	5	mm



### 3.1.4. Matriz de relaciones entre requerimientos y actividades

En el análisis QFD esta etapa consiste en identificar cuáles son las relaciones entre los requerimientos del cliente y las actividades que se van a llevar a cabo (ver Tabla 6) para cumplir satisfactoriamente con estos requerimientos.

Para este caso se lo realiza bajo las siguientes condiciones de evaluación:

- : Relación fuerte
- : Relación media
- △ : Relación débil

**Tabla 6**

*Matriz de relaciones entre requerimientos y actividades*

Requerimiento	Parámetros																		
	Importancia	Área de trabajo de 1.2x1.2 m	Espesor de corte mínimo	Tiempo útil de uso de la máquina	Precisión de la máquina	Velocidad de corte	Velocidad de avance	Vibración	Masa Total	Costo de manufactura	Estética	Dimensión de ancho de la máquina	Dimensión de largo de la máquina	Dimensión de alto de la máquina	Resistencia del material de la	Facilidad de manufactura del	Velocidad de desplazamiento	Potencia de la máquina	Exactitud de la máquina
La máquina realiza de manera autónoma los procesos de manufactura de corte por plasma	5	○		△	●	●	●	○		●							●	○	●
La máquina tiene una capacidad de corte mínimo de media plancha de material comercial (1.2x1.2 m)	4	●	○						○			●	●	●				○	

CONTINÚA



El corte realizado por la máquina debe tener un error en precisión que no sea superior al 5%	3	○			●	○	○	△								○		
Capacidad de corte de material de hasta 9.5 mm de espesor	3	○	●		△												●	
La máquina puede trabajar en un área de 3x3 m	4	●							○		●	●	●					
La máquina es de un material ligero y con buen acabado	3								○	●	●			●	●			
La máquina mejora la producción por su velocidad de trabajo y también mejora la calidad de las piezas procesadas	5				△	○	●	●									●	●
La máquina es de bajo costo, pero de buena calidad y productividad	5				△	○	●	●	○								●	●
La máquina no presenta problemas para trabajar un tiempo útil de 10 horas al día mínimo	3				●	○											○	○
El corte realizado por la máquina es libre de vibraciones, lo que mejora su precisión	4				●	○	○	●									○	●
La máquina realiza movimientos limpios en su desplazamiento	4				●	△	△										●	●
Los elementos de la máquina deben ser de fácil adquisición para sus repuestos	3				○					●	△					○		

### 3.1.5. Análisis de mercado (evaluación competitiva)

Para esta etapa de análisis se comparan los resultados (ver Tabla 7) evaluando la alternativa de solución con dos máquinas ya existentes, en nuestro caso se la compara con la máquina Micro-Cut P presentada en el Capítulo I y con la máquina realizada como tema de tesis por estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE en la sede de Latacunga.

Se evaluará de la siguiente manera:

X: La alternativa de solución propuesta

Δ: La máquina Micro-Cut P comercial

○: La máquina realizada como tesis en Latacunga

Considerando 1 como peor y 5 como mejor.

**Tabla 7**  
*Matriz de evaluación competitiva*

Requerimiento	Evaluación Competitiva				
	1	2	3	4	5
La máquina realiza de manera autónoma los procesos de manufactura de corte por plasma			○	X	Δ
La máquina tiene una capacidad de corte mínimo de media plancha de material comercial (1.2x1.2 m)	○		X		Δ
El corte realizado por la máquina debe tener un error en precisión que no sea superior al 5%			X	Δ	○
Capacidad de corte de material de hasta 9.5 mm de espesor		○		X	Δ
La máquina puede trabajar en un área de 3x3 m	○		Δ		X
La máquina es de un material ligero y con buen acabado		○	X	Δ	
La máquina mejora la producción por su velocidad de trabajo y también mejora la calidad de las piezas procesadas	○			X	Δ
La máquina es de bajo costo, pero de buena calidad y productividad	Δ		○		X
La máquina no presenta problemas para trabajar un tiempo útil de 10 horas al día mínimo		○		X	Δ
El corte realizado por la máquina es libre de vibraciones, lo que mejora su precisión	○			X	Δ

### **3.1.6. Análisis de objetivos (evaluación competitiva interna)**

Para esta etapa del proceso de diseño, se analiza y compara, las actividades del proceso tanto de la solución propuesta como de las máquinas ya existentes (ver Tabla 8), en este caso al igual que el anterior se emplea una existente en el mercado, y la máquina realizada como tesis en la sede Latacunga de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Se evaluará de la siguiente manera:

X: La alterativa de solución propuesta

Δ: La máquina Micro-Cut P comercial

○: La máquina realizada como tesis en Latacunga

Considerando 1 como peor y 5 como mejor.

**Tabla 8**  
*Matriz de evaluación competitiva interna*

		Parámetros																		
Evaluación Competitiva Interna	Evaluación	Área de trabajo de 1.2x1.2 m	Espesor de corte mínimo	Tiempo útil de uso de la máquina	Precisión de la máquina	Velocidad de corte	Velocidad de avance	Vibración	Masa Total	Costo de manufactura	Estética	Dimensión de ancho de la máquina	Dimensión de largo de la máquina	Dimensión de alto de la máquina	Resistencia del material de la máquina	Facilidad de manufactura del material	Velocidad de desplazamiento	Potencia de la máquina	Exactitud de la máquina	
	5	Δ	Δ	Δ	Δ	X	X	Δ	○	X	Δ	X	X	X	Δ	X	Δ	Δ	Δ	Δ
	4		X	X	X	Δ	Δ	X	X	○	X				X		○	○	○	
	3	X			○			○	Δ			Δ	Δ	Δ	○	○	X	X	X	
	2		○	○		○					○	○	○	○						
	1	○								Δ						Δ				

### 3.1.7. Importancia técnica de los parámetros

Para esta etapa del proceso de diseño, se analiza y compara, si fuese posible, los resultados de las evaluaciones de los objetivos de las características de calidad de las actividades del proceso tanto de la solución propuesta como de las máquinas ya existentes (ver Tabla 9), al igual que el caso anterior se emplea una existente en el mercado, y la máquina realizada como tesis en la sede Latacunga de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

**Tabla 9**  
Matriz de importancia técnica de los parámetros

Importancia técnica	Parámetros																		
	Área de trabajo de 1.2x1.2 m	Espesor de corte mínimo	Tiempo útil de uso de la máquina	Precisión de la máquina	Velocidad de corte	Velocidad de avance	Vibración	Masa Total	Costo de manufactura	Estética	Dimensión de ancho de la máquina	Dimensión de largo de la máquina	Dimensión de alto de la máquina	Resistencia del material de la máquina	Facilidad de manufactura del material	Velocidad de desplazamiento (fricción)	Potencia de la máquina	Exactitud de la máquina	
Absoluta	27	12	18	49	34	26	13	12	36	21	18	18	18	9	21	42	21	48	443
Relativa	6	3	4	11	8	6	3	3	8	5	4	4	4	2	5	9	5	11	

Según este análisis realizado, se puede concluir que los parámetros de mayor importancia técnica son, la precisión y exactitud de la máquina, la velocidad de desplazamiento, el costo de manufactura y la velocidad de corte de esta, en ese orden respectivamente. Por ello en un análisis posterior estos serán los parámetros de diseño que más se tomarán en cuenta.

### 3.1.8. Correlación entre parámetros

En esta etapa se procede a analizar las correlaciones entre los parámetros. En una tabla triangular (ver Tabla 10), el techo de la matriz QFD, se establece la correlación entre cada uno de los parámetros según los siguientes criterios:

△: Correlación negativa

○: Correlación positiva

**Tabla 10**

*Matriz de correlación entre los parámetros*

Parámetros																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Área de trabajo de 1.2x1.2 m	Esesor de corte mínimo	Tiempo útil de uso de la máquina	Precisión de la máquina	Velocidad de corte	Velocidad de avance	Vibración	Masa Total	Costo de manufactura	Estética	Dimensión de ancho de la máquina	Dimensión de largo de la máquina	Dimensión de alto de la máquina	Resistencia del material de la máquina	Facilidad de manufactura del material	Velocidad de desplazamiento (fricción)	Potencia de la máquina	Exactitud de la máquina

El esquema completo del análisis QFD se lo observa completo y más detallado en el Anexo 1.

### 3.2. Diseño de la máquina

Partiendo de la alternativa de solución, se procede a analizar cada uno de los parámetros que deben ser tomados en cuenta en el diseño de la misma, buscando sean los más idóneos, y que solventen la necesidad en su mayor efecto, de los cuales se tiene los siguientes:

#### 3.2.1. Dimensiones de la plancha

De acuerdo a las necesidades nombradas al inicio del capítulo, se acordó que la máquina realizaría cortes de planchas correspondientes a la mitad del tamaño de una plancha comercial, es decir una plancha de 1.2 x 1.2 m. De acuerdo a la Tabla 11 mostrada a continuación, de los rangos de operación de la máquina de corte disponible en el laboratorio, se determinó utilizar planchas de un máximo espesor 10 mm.

**Tabla 11**

*Rangos de Operación*

<b>Capacidad de corte mecanizado a 60 Amperios</b>	
<b>Capacidad Recomendada</b>	3/8 in (9.5 mm)
<b>Máxima Capacidad</b>	1/2 in (12 mm)

Fuente: Manual de Operación Hypertherm Powermax 1000

#### 3.2.2. Velocidad de avance

Para este parámetro, se toma como referencia los proporcionados en las tablas del manual de usuario que cuenta el equipo de corte Hypertherm Powermax 1000, en donde se especifica la velocidad de corte dependiendo del espesor del material a cortar (Ver Tabla 12).



**Tabla 12**

*Velocidad de corte recomendada para corte de acero al carbono*

Espesor [mm]	Corriente [A]	Velocidad Recomendada [mm/min]
1.9	40	5613
9.5	60	1041

Fuente: Manual de Operación Hypertherm Powermax 1000

### 3.2.3. Tipo de material de la estructura de soporte fijo

Para la selección de los siguientes parámetros se realizó matrices de comparación, mostradas a continuación.

Primero se determina un porcentaje en función de la importancia de cada parámetro a ser tomado en cuenta, se realiza una comparativa de importancia entre los parámetros, de la siguiente forma, ver Tabla 13:

0: Si el parámetro no es importante en comparación al otro

5: Si el parámetro es más importante que el otro

2.5: Si ambos parámetros tienen igual importancia

**Tabla 13**

*Porcentaje de importancia parámetros estructura de soporte fijo*

Parámetro	Resistencia	Elasticidad	Dureza	Soldabilidad	Maquinabilidad	Menor Costo	$\Sigma + 1$	Porcentaje
Resistencia		5	5	2.5	2.5	5	21.0	26%
Elasticidad	0		2.5	0	0	0	3.5.0	4%
Dureza	0	2.5		2.5	0	0	6.0	7%
Soldabilidad	2.5	5	2.5		2.5	2.5	16.0	20%
Maquinabilidad	2.5	5	5	2.5		2.5	18.5	23%
Menor Costo	0	5	5	2.5	2.5		16.0	20%
						Total	81.0	100%

A continuación se muestra en la Tabla 14, la matriz de comparación para la selección de la estructura de soporte fijo, en donde se califica de la siguiente manera:

1: Si es bueno

3: Si es muy bueno

5: Si es excelente

**Tabla 14**

*Matriz de selección estructura de soporte fijo*

Parámetro de selección	Porcentaje de Importancia	Aluminio 6011		Acero A36	
		Valor	Total	Valor	Total
Resistencia	26%	3	0.78	5	1.30
Elasticidad	4%	3	0.12	5	0.20
Dureza	7%	5	0.35	3	0.21
Soldabilidad	20%	1	0.20	5	1.00
Maquinabilidad	23%	5	1.15	3	0.69
Menor Costo	20%	1	0.20	3	0.60
		Total	2.80	Total	4.00

De acuerdo con la Tabla 14, se puede concluir, que para el diseño de la estructura, se selecciona como material de soporte fijo el Acero A36, que está sujeto a una mejor soldabilidad, facilitando de esta manera los procedimientos a ser realizados como sujeción del soporte.

### **3.2.4. Tipo de Mesa de Corte**

De la misma forma que el caso anterior, se realizaron las correspondientes matrices para la selección del tipo de mesa de corte que se empleará en la máquina CNC para corte por plasma.

Primero se determina el porcentaje de importancia de los parámetros que intervienen en este caso, ver Tabla 15:

**Tabla 15**

*Porcentaje de importancia parámetros tipo de mesa de corte*

Parámetro	Vida Útil	Menor Vibración	Menor Peso	Velocidad	Fácil desplazamiento	$\Sigma + 1$	Porcentaje
Vida Útil		2.5	5	2.5	2.5	13.5	25%
Menor vibración	2.5		5	2.5	2.5	13.5	25%
Menor peso	0	0		2.5	2.5	6	10%
Velocidad	2.5	2.5	2.5		2.5	11	20%
Fácil desplazamiento	2.5	2.5	2.5	2.5		11	20%
					Total	55	100%

A continuación se muestra en la Tabla 16, la matriz de comparación para la selección del tipo de mesa de corte, en donde se califica de la siguiente manera:

**Tabla 16**

*Matriz de selección tipo de mesa de corte*

Parámetro de selección	Porcentaje de Importancia	Pórtico Móvil – Mesa Fija		Mesa Móvil – Pórtico Fijo	
		Valor	Total	Valor	Total
Vida Útil	25%	5	1.25	3	0.75
Menor vibración	25%	5	1.25	1	0.25
Menor peso	10%	5	0.50	3	0.30
Velocidad	20%	5	1.00	1	0.20
Fácil desplazamiento	20%	5	1.00	1	0.20
		Total	5.00	Total	1.70

De acuerdo con la Tabla 16, se puede concluir, que para el diseño de la mesa de corte, se selecciona como una mesa fija con pórtico móvil, ya que esta está sujeta a menor vibración, lo que permite mejorar la vida útil que un sistema pórtico fijo y mesa móvil.

### 3.2.5. Tipo de transmisión

Se procede a determinar el porcentaje de importancia de los parámetros que intervienen en este caso, ver Tabla 17:

**Tabla 17**

*Porcentaje de importancia parámetros tipo de transmisión*

Parámetro	Precisión	Velocidad	Fricción	Facilidad de adquisición	Transmisión de potencia	Menor Costo	$\Sigma + 1$	Porcentaje
Precisión	2.5	2.5	5	2.5	2.5	2.5	16	20%
Velocidad	2.5	2.5	5	0	2.5	0	11	13%
Fricción	0	0	5	0	0	0	1	1%
Facilidad de adquisición	2.5	5	5	2.5	2.5	2.5	18.5	23%
Transmisión de potencia	2.5	2.5	5	2.5	2.5	2.5	16	20%
Menor Costo	2.5	5	5	2.5	2.5	2.5	18.5	23%
						Total	81	100%

En la Tabla 18 se muestra la matriz de comparación para la selección del tipo de transmisión, en donde se califica de la siguiente manera:

**Tabla 18**

*Matriz de selección tipo de transmisión*

Parámetro de selección	Porcentaje de Importancia	Husillo de bolas		Piñón - cremallera		Trasmisión por catalina - cadena		Polea – banda sincrónica	
		Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total
Precisión	20%	5	1.00	4	0.80	2	0.40	3	0.60
Velocidad	13%	3	0.39	5	0.65	3	0.39	3	0.39
Fricción	1%	5	0.05	4	0.04	3	0.03	3	0.03
Facilidad de adquisición	23%	1	0.23	5	1.15	4	0.92	3	0.69
Transmisión de potencia	20%	5	1.00	4	0.80	5	1.00	3	0.60
Menor Costo	23%	1	0.23	4	0.92	5	1.15	3	0.69
		Total	2.90	Total	4.36	Total	3.89	Total	3.00

De acuerdo con la Tabla 18, se concluye, que para el diseño se optó por una transmisión por piñón-cremallera, ya que no posee deslizamiento, su peso es inferior en

comparación al husillo de bolas, además de transmitir altos torques, y un menor costo de adquisición para la implementación de este tipo de sistema.

### 3.2.6. Tipo de actuador para movimiento

A continuación se procede a determinar el porcentaje de importancia de los parámetros que intervienen en este caso, ver Tabla 19:

**Tabla 19**

*Porcentaje de importancia parámetros tipo de actuador para movimiento*

Parámetro	Precisión	Torque	Comportamiento o ruido eléctrico	Facilidad de adquisición	Condiciones ambientales de trabajo industrial	Consumo de energía	Controlabilidad	Menor Costo	$\Sigma + 1$	Porcentaje
Precisión		2.5	5	2.5	2.5	5	2.5	2.5	23.5	16%
Torque	2.5		5	2.5	2.5	5	5	5	28.5	19%
Comportamiento ruido eléctrico	0	0		2.5	0	2.5	2.5	2.5	11	7%
Facilidad de adquisición	2.5	2.5	2.5		2.5	2.5	5	2.5	21	14%
Condiciones ambientales de trabajo industrial	2.5	2.5	5	2.5		5	2.5	2.5	23.5	16%
Consumo de energía	0	0	2.5	2.5	0		5	2.5	13.5	9%
Controlabilidad	2.5	0	2.5	0	2.5	0		0	8.5	6%
Menor Costo	2.5	0	2.5	2.5	2.5	2.5	5		18.5	13%
								Total	148	100%

En la Tabla 20 se muestra la matriz de comparación para la selección del tipo de transmisión, en donde se califica de la siguiente manera:

**Tabla 20**

*Matriz de selección tipo de actuador de movimiento*

Parámetro de selección	Porcentaje de Importancia	Motor Paso a Paso		Servomotor	
		Valor	Total	Valor	Total
Precisión	16%	5	0.80	5	0.80
Torque	19%	4	0.76	5	0.95
Comportamiento ruido eléctrico	7%	4	0.28	3	0.21

CONTINÚA



Facilidad de adquisición	14%	5	0.70	3	0.42
Condiciones ambientales de trabajo industrial	16%	5	0.80	4	0.64
Consumo de energía	9%	3	0.27	3	0.27
Controlabilidad	6%	5	0.30	4	0.24
Menor Costo	13%	5	0.65	3	0.39
		Total	4.56	Total	3.92

De acuerdo con la Tabla 20, se concluye, que para el diseño se usará motores paso a paso como actuadores para el movimiento por sus prestaciones tanto en costo, como en facilidad de adquisición y fácil control mediante software, además de satisfacer las necesidades de torque y precisión para la máquina.

### 3.2.7. Tipo de sensores para el posicionamiento

A continuación se procede a determinar el porcentaje de importancia de los parámetros que intervienen en este caso, ver Tabla 21:

**Tabla 21**

*Porcentaje de importancia parámetros sensores para posicionamiento*

Parámetro	Precisión	Repetibilidad	Rango de trabajo	Sensibilidad	Exactitud	Vida Útil	Menor Costo	$\Sigma + 1$	Porcentaje
Precisión	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	5	5	21	19%
Repetibilidad	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	0	0	11	10%
Rango de trabajo	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	0	13.5	12%
Sensibilidad	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	16	14%
Exactitud	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	16	14%
Vida Útil	0	5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	16	14%
Menor Costo	0	5	5	2.5	2.5	2.5	2.5	18.5	17%
							Total	112	100%

En la Tabla 22 se muestra la matriz de comparación para la selección del tipo de sensores de posicionamiento, donde se califica de la siguiente manera:

**Tabla 22**  
*Matriz de selección tipo de sensor de posicionamiento*

Parámetro de selección	Porcentaje de Importancia	Sensor Mecánico		Sensor Inductivo		Sensor Capacitivo	
		Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total
Precisión	19%	5	0.95	5	0.95	5	0.95
Repetibilidad	10%	5	0.50	3	0.30	3	0.30
Rango de trabajo	12%	3	0.36	3	0.36	5	0.60
Sensibilidad	14%	5	0.70	3	0.42	3	0.42
Exactitud	14%	5	0.70	5	0.70	5	0.70
Vida Útil	14%	3	0.42	5	0.70	5	0.70
Menor Costo	17%	5	0.85	1	0.17	1	0.17
		Total	4.48	Total	3.60	Total	3.84

De acuerdo con la Tabla 22, se concluye, que para el diseño se usará sensores mecánicos para el posicionamiento, por sus prestaciones en precisión y vida útil, que satisfacen la necesidad para esta aplicación, además de tener un costo de adquisición bajo en comparación a las otras dos opciones.

### 3.2.8. Tipo de guías para desplazamiento

A continuación se procede a determinar el porcentaje de importancia de los parámetros que intervienen en este caso, ver Tabla 23:

**Tabla 23**  
*Porcentaje de importancia parámetros tipo de guías para desplazamiento*

Parámetro	Precisión	Torque	Comportamiento ruido eléctrico	Facilidad de adquisición	$\Sigma + 1$	Porcentaje
Vida Útil		2.5	5	5	13.5	40%
Fricción	2.5		2.5	0	6	18%
Facilidad de adquisición	0	2.5		5	8.5	25%
Menor costo	0	5	0		6	17%
				Total	34	100%

En la Tabla 24 se muestra la matriz de comparación para la selección del tipo de guías para el desplazamiento, en donde se califica de la siguiente manera:

**Tabla 24**

*Matriz de selección tipo de guías para el desplazamiento*

Parámetro de selección	Porcentaje de Importancia	Guía con rodamientos axiales SBR 16		Guía con rodamientos radiales 626 2RS	
		Valor	Total	Valor	Total
Vida Útil	40%	5	2.00	3	1.20
Fricción	18%	5	0.90	5	0.90
Facilidad de adquisición	25%	1	0.25	5	1.25
Menor costo	17%	1	0.17	5	0.85
		Total	3.32	Total	4.20

De acuerdo con la Tabla 24, se concluye, que para esta aplicación se implementará guías con rodamientos radiales para el desplazamiento del pórtico móvil de la máquina CNC para corte por plasma, por su facilidad de adquisición y menor costo en comparación a la de rodamientos axiales.

### 3.3. Diseño del sistema mecánico

Previo al diseño de la estructura de soporte fijo, es necesario tomar en consideración todos los pesos que actuarán sobre la misma, de los cuales se presenta un resumen en la siguiente Tabla 25:

**Tabla 25**

Peso de los elementos

Elemento	Peso Unitario	Cantidad	Peso Total [N]
<b>Media plancha (1.2x1.2m 9.5mm espesor)</b>	1145.032 [N]	1	1145.03
<b>Perfil cuadrado de 1.5 mm</b>	30 [N/m]	3.4 [m]	102.00
<b>Motor a pasos NEMA 23</b>	14.7 [N]	4	58.80
<b>Carros de desplazamiento</b>	9.8 [N]	3	29.40

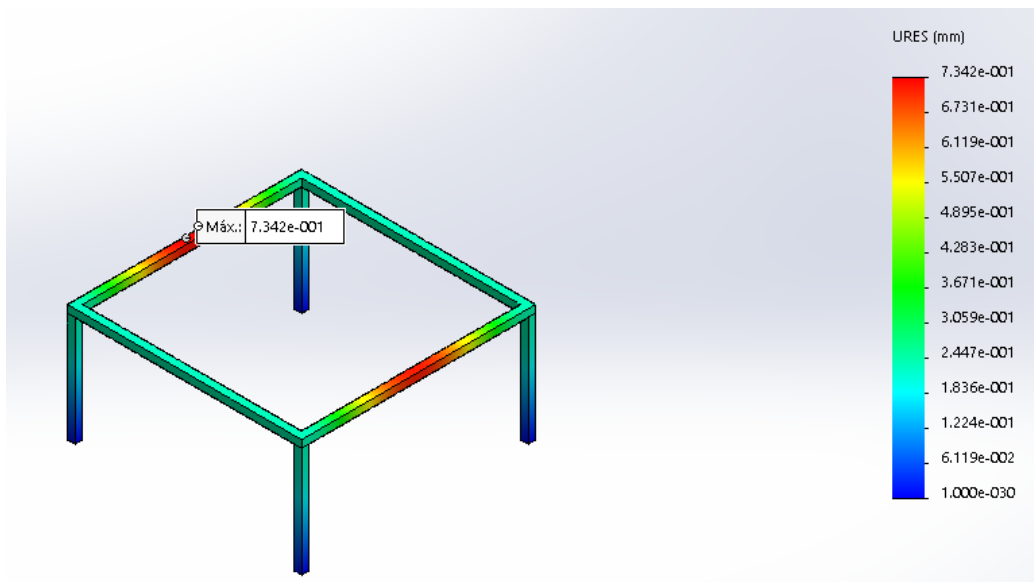
CONTINÚA





<b>Platina rectangular de sección 50x6cm y 1.5m longitud</b>	22.15 [N/m]	19	165.00
<b>Cremallera 15x15 mm</b>	17.34 [N/m]	3.6 [m]	62.42
<b>Piñón</b>	2 [N]	3	6.00
<b>Antorcha</b>	40 [N]	1	40.00
<b>Chumacera M12</b>	10 [N]	1	10.00
<b>Eje z</b>	28 [N]	1	28.00
<b>Perfil Rectangular</b>	10.68 [N/m]	1	10.68
		<b>Total</b>	<b>1657.33</b>

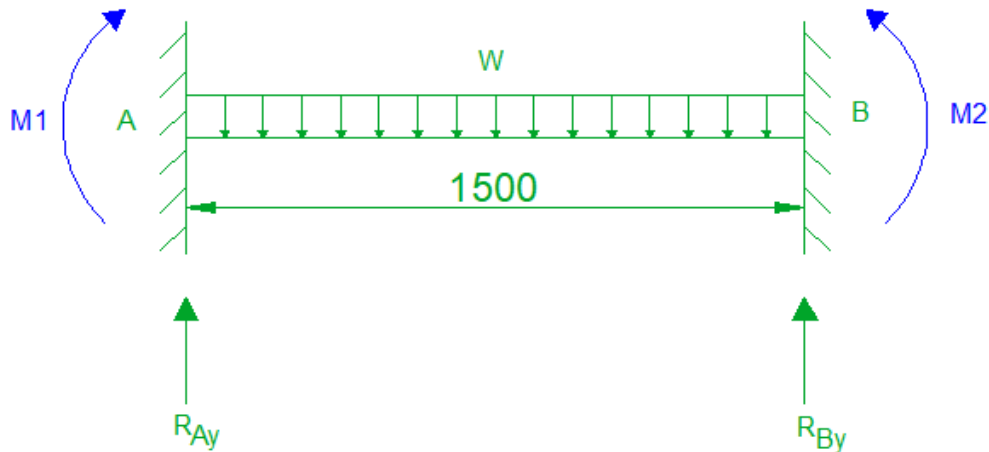
Todos estos pesos tomados a consideración, afectarán a la estructura, para realizar el cálculo de esfuerzos correspondiente se determinó el elemento más crítico con la ayuda de una simulación CAE usando el software SolidWorks, que se aprecia en la Figura 19:



**Figura 19** Análisis CAE de la estructura principal

Como se observa, el elemento que posee mayor deformación es la viga superior de 1.5 m de longitud. La estructura será soldada para tener una mayor rigidez y soporte,

por lo que para su análisis se tiene una viga hiperestática, con doble empotramiento y una carga distribuida de peso sobre ella como se observa en la Figura 20.



**Figura 20** Distribución de Cargas en la viga superior de la estructura

El peso de los de los elementos se distribuye de manera uniforme a lo largo de la estructura, por lo que la carga distribuida se muestra en la ecuación 3.1:

$$W_{total} = W_{plancha} + \frac{W_{elementos}}{2} \quad (\text{Ec. 3. 1})$$

$$W_{total} = 1145.032 + \frac{512.30}{2}$$

$$W_{total} = 1657.33 \text{ N}$$

La carga distribuida a la cual está sometida la viga sería entonces:

$$W_{total} = \frac{1657.33}{1.5} = 1104.89 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

El momento en cada empotramiento sería:

$$M = \frac{1}{12} qL^2 \quad (\text{Ec. 3. 2})$$

$$M_1 = M_2 = \frac{1}{12} (1104.89)(1.5)^2 = 207.17 \text{ N.m}$$

Realizando sumatoria de fuerzas en "Y" para determinar las reacciones se obtiene lo siguiente:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{Ay} + R_{By} - P = 0$$

$$R_{Ay} + R_{By} - 1104.89(1.5) = 0$$

$$R_{Ay} + R_{By} = 1657.33$$

Realizando sumatoria de momentos en el punto A, tomando como valores positivos los que generen una rotación en sentido horario se tiene:

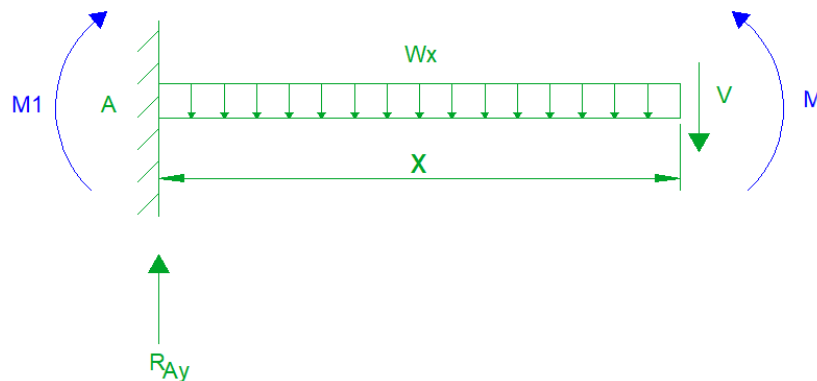
$$\sum M_A = 0$$

$$-M_1 + M_2 + (R_{By})(1.5) - P(0.75) = 0$$

$$R_{By} = \frac{1657.33(0.75)}{1.5} = 828.67 \text{ N}$$

$$R_{Ay} = 828.67 \text{ N}$$

Ahora se realiza los diagramas de cortante y momento flector correspondiente, para lo cual se procede de la siguiente manera:



**Figura 21** Corte transversal en la viga superior de la estructura

$$\sum F_y = 0$$

$$-V + R_{Ay} - W_x = 0$$

$$V = -W_x + R_{Ay} = -1104.89(x) + 828.67$$

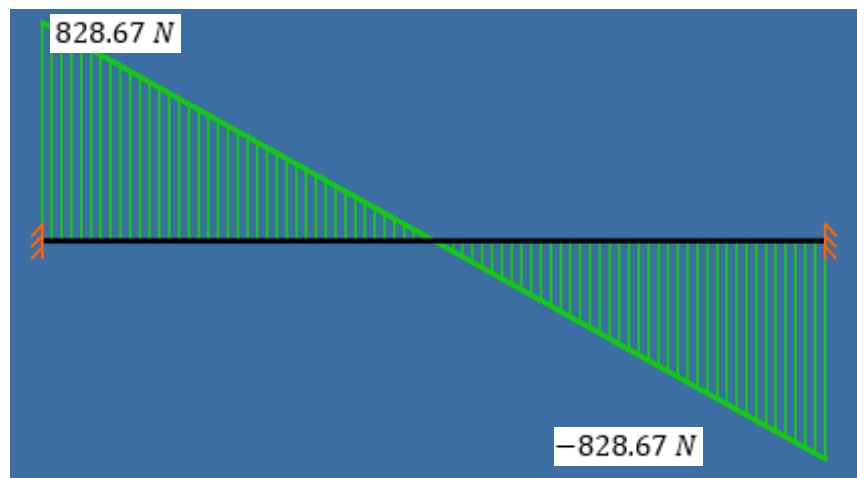
Reemplazando los puntos críticos en el centro y en los extremos de la viga se tiene:

$$V = -1104.89(0) + 828.67 = 828.67 \text{ N}$$

$$V = -1104.89(0.75) + 828.67 = 0 \text{ N}$$

$$V = -1104.89(1.5) + 828.67 = -828.67 \text{ N}$$

Obteniendo de esta forma el gráfico para cortante mostrado en la siguiente figura:



**Figura 22** Diagrama de Esfuerzo Cortante software Xvigas

Ahora se determina el momento crítico:

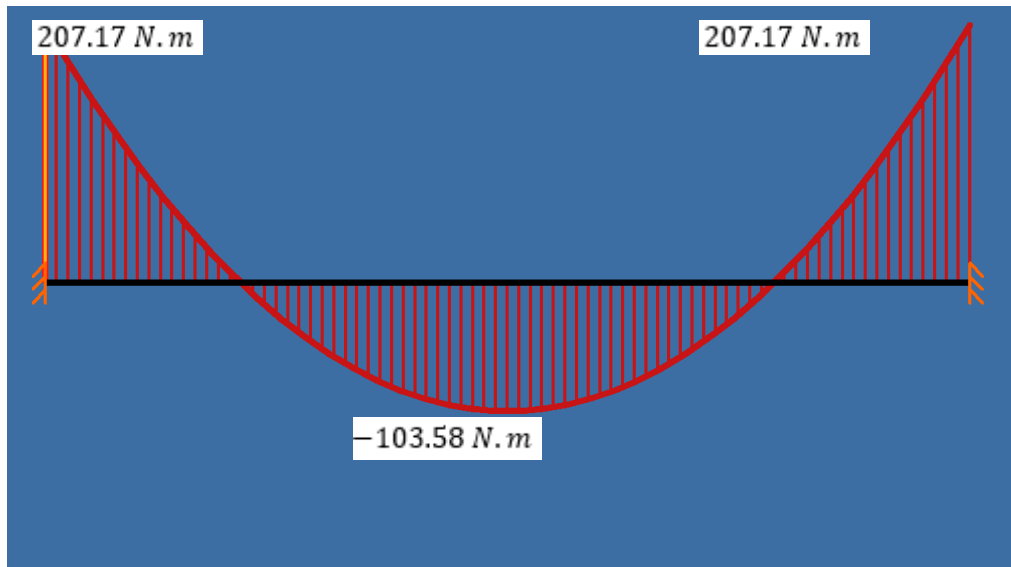
$$A_1 = \frac{1}{2} R_{Ay}(0.75) = 310.75 \text{ N.m}$$

$$M(0) = M_1 = 207.17 \text{ N.m}$$

$$M(0.75) = 207.17 - 310.75 = -103.58 \text{ N.m}$$

$$M(1.5) = -103.58 + 310.75 = 207.17 \text{ N.m}$$

El diagrama correspondiente al momento flector se muestra a continuación:



**Figura 23** Diagrama de Momento Flector software Xvigas

Como se muestra en los cálculos realizados, el momento crítico es de 207.17 N-m y está presente en los extremos de la viga, en sus empotramientos. El material que se escogió es un acero A36, de lo cual se conoce su valor de  $S_y = 250 \text{ MPa}$ . Para el diseño se considera un factor de seguridad de 2, debido a que se trata de un diseño de estructuras estáticas con cargas dinámicas, lo cual permitirá que el diseño sea más conservativo.

$$\sigma_{max} = \frac{S_y}{n} \quad (\text{Ec. 3. 3})$$

Donde:

$\sigma_{max}$ : Esfuerzo normal máximo

$S_y$ : Resistencia a la fluencia del material

$n$ : Factor de seguridad

$$\sigma_{max} = \frac{250}{2} = 125 \text{ MPa}$$

A continuación se obtiene el elemento estructural de análisis para lo que encontramos el módulo de la sección:

$$S = \frac{M}{\sigma_{max}} \quad (\text{Ec. 3. 4})$$

Donde:

$S$ : Módulo de sección

$M$ : Momento flector máximo

$\sigma_{max}$ : Esfuerzo normal máximo

$$S = \frac{207.17}{125 \times 10^6} = 1.66 \times 10^{-6} m^3 = 1.66 \text{ cm}^3$$

Al analizar el catálogo de perfiles disponible en (IPAC, 2015), se determinó usar un perfil cuadrado estructural de 50 mm, con un espesor de 3mm que posee un Módulo de sección de  $4.48 \text{ cm}^3$ .

El análisis del elemento estructural será en sus extremos, ya que en este punto existe una mayor concentración de esfuerzos por las cargas a las que se encuentra sometido; además, en esta sección el esfuerzo flector será máximo, y el cortante será 0, dado que este elemento está sometido a flexión pura.

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (\text{Ec. 3. 5})$$

Donde:

$\sigma$ : Esfuerzo flector

$M$ : Momento flector máximo

$y$ : Distancia del centro de gravedad hacia su extremo

$I$ : Inercia de la sección

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{(207170)(24.25)}{212000} = 23.70 \text{ MPa}$$

Calculamos los esfuerzos principales de Von Misses, Ec. 3.6:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau^2} \quad (\text{Ec. 3. 6})$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{23.70}{2} \pm \sqrt{\frac{(23.70)^2}{4} + 0^2} = 23.70 \text{ MPa}$$

De donde para este valor se tiene un factor de seguridad:

$$n = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma_{von\ misses}} = \frac{125}{23.70} = 5.27$$

Dado que se tiene un factor de seguridad mayor a dos, el espesor utilizado sería suficiente para satisfacer las condiciones de carga solicitadas, este factor de seguridad asegura un correcto diseño dinámico, evitando fallas ante frecuencia natural, resonancia, análisis espectral, armónicos, etc. Con ello se logrará reducir el desequilibrio en el mecanismo, tener una mayor robustez de la estructura, disminuir las fallas por fatiga, elementos móviles y por concentradores de esfuerzos.

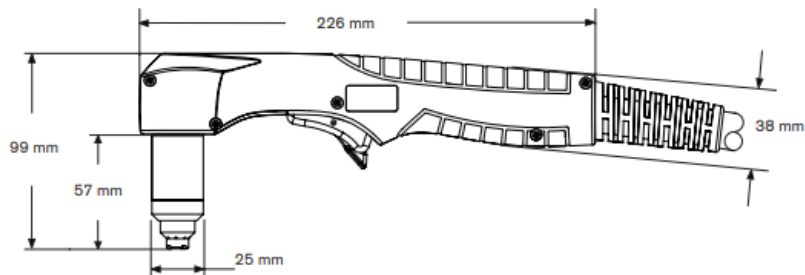
### 3.4. Diseño del Tornillo sin fin para el movimiento del eje Z

Este eje de movimiento está soportado en el pórtico que se encuentra en movimiento, donde la mesa está fija; este diseño debe soportar el peso de la antorcha y las piezas de ajuste de la misma.

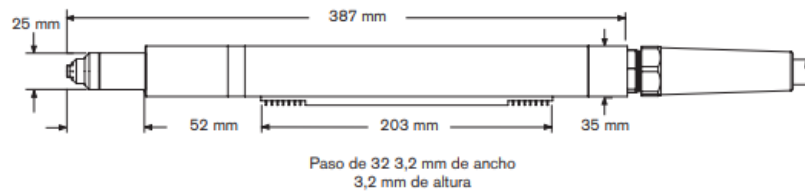
<b>Capacidad de corte a mano a 60 amps</b>	
Capacidad de corte recomendada	19 mm
Capacidad máxima de corte	25 mm
Corte bruto máximo	32 mm
<b>Capacidad de corte mecanizado a 60 amps</b>	
Capacidad de corte recomendada	10 mm
Capacidad máxima de corte	12 mm
<b>Capacidad de ranurado</b> (tasa de remoción de metal en acero de carbono)	4,5 kg/hora
<b>Peso</b>	
T60	3,1 kg con una manguera de 7,5 m
	6,2 kg con una manguera de 15 m
	9,4 kg con una manguera de 22,5 m
T60M	2,0 kg con una manguera de 4,5 m
	3,8 kg con una manguera de 7,5 m
	4,5 kg con una manguera de 10,7 m
	6,8 kg con una manguera de 15 m
	9,9 kg con una manguera de 22,5 m

**Figura 24** Especificaciones técnicas Antorcha T60 Hypertherm Powermax1000  
Fuente: Manual de Operación Hypertherm Powermax1000

**T60 dimensiones de la antorcha de mano**



**T60M dimensiones de la antorcha mecanizada**

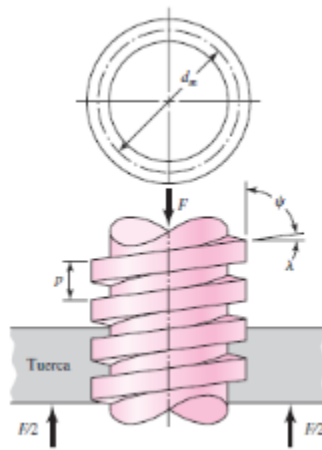


**Figura 25** Dimensiones Antorcha T60 Hypertherm Powermax1000  
Fuente: Manual de Operación Hypertherm Powermax1000



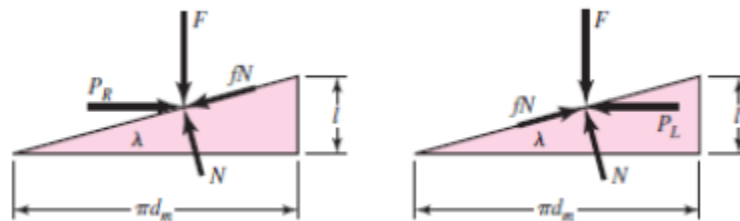
En la Figura 24 y 25 se muestra las especificaciones técnicas y las dimensiones de la antorcha T60 de la máquina cortadora de plasma Hypertherm Powermax 1000, del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

En la Figura 26 se muestra la distribución de fuerzas que están presentes en el tornillo sin fin, este mecanismo tendrá la finalidad de hacer subir o bajar la antorcha.



**Figura 26** Distribución de fuerzas del tornillo sin fin del eje Z

En la Figura 27, mostrada a continuación se tiene los diagramas de fuerzas para subir y para bajar la carga.



**Figura 27** Diagrama de fuerzas en el tornillo sin fin

Donde:

$P_R$ : Fuerza cuando sube la carga

$P_L$ : Fuerza cuando baja la carga

$N$ : Normal

$l$ : Avance

$f$ : Coeficiente de fricción

$\lambda$ : Ángulo de avance de la rosca

$\Psi$ : Ángulo de la hélice

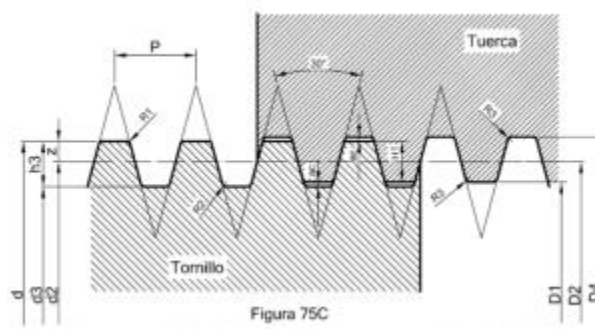
Con estos diagramas mostrados se determina las ecuaciones que corresponden al tornillo sin fin para subir como para bajar la carga, a continuación la ecuación muestra el torque necesario para que el tornillo venza la fricción y pueda subir la carga (Ec. 3.7).

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - f l} \right) + \frac{F f_c d_c}{2} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Y también se tiene el torque necesario para bajar la carga (Ec. 3.8):

$$T_L = \frac{F d_2}{2} \left( \frac{\pi f d_2 - l}{\pi d_2 + f l} \right) + \frac{F f_c d_c}{2} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

En la Figura 28 se muestra los parámetros correspondientes a una rosca métrica:



**Figura 28** Rosca Trapezoidal ISO

Con la tabla de dimensiones de roscas trapezoidales se obtiene los siguientes parámetros para una rosca M12 ver Tabla 26:

Tabla 26  
Roscas Métricas Finas

## ROSCAS METRICAS FINAS M.B.

Diámetro mm.	Paso mm.	Diámetro medio mm.	TORNILLO		TUERCA	
			Diámetro al fondo mm.	Area en mm. <sup>2</sup>	Diámetro mayor mm.	Diámetro menor mm.
1	0.2	0.870	0.72	0.41	1.02	0.74
1.2	0.2	1.070	0.92	0.66	1.22	0.94
1.4	0.2	1.270	1.12	0.98	1.42	1.14
1.7	0.2	1.570	1.42	1.58	1.72	1.44
2	0.25	1.838	1.65	2.13	2.03	1.68
2.3	0.25	2.138	1.95	2.98	2.33	1.98
2.6	0.35	2.373	2.11	3.49	2.64	2.15
3	0.35	2.773	2.51	4.94	3.04	2.55
3.5	0.35	3.273	3.01	7.10	3.54	3.05
4	0.5	3.675	3.30	8.53	4.05	3.35
4.5	0.5	4.175	3.80	11.32	4.55	3.85
5	0.5	4.675	4.30	14.50	5.05	4.35
6	0.75	5.513	4.94	19.20	6.08	5.03
7	0.75	6.513	5.94	27.75	7.08	6.03
8	1	7.350	6.59	34.14	8.11	6.70
9	1	8.350	7.59	45.28	9.11	7.70
10	1	9.350	8.59	57.99	10.11	8.70
12	1.5	11.026	9.89	76.81	12.16	10.05
14	1.5	13.026	11.89	111	14.16	12.05
16	1.5	15.026	13.89	152	16.16	14.05
18	1.5	17.026	15.89	198	18.16	16.05
20	1.5	19.026	17.89	251	20.16	18.05
22	1.5	21.026	19.89	311	22.16	20.05
24	2	22.701	21.19	353	24.22	21.40
27	2	25.701	24.19	459	27.22	24.40
30	2	28.701	27.19	580	30.22	27.40
33	2	31.701	30.19	716	33.22	30.40
36	3	34.051	31.78	793	36.32	32.10
39	3	37.051	34.78	950	39.32	35.10
42	3	40.051	37.78	1121	42.32	38.10
45	3	43.051	40.78	1306	45.32	41.10
48	3	46.051	43.78	1505	48.32	44.10
52	3	50.051	47.78	1793	52.32	48.10
56	4	53.402	50.37	1993	56.43	50.80
60	4	57.402	54.37	2322	60.43	54.80
64	4	61.402	58.37	2676	64.43	58.80
72	4	69.402	66.37	3460	72.43	66.80
80	4	77.402	74.37	4344	80.43	74.80

Para roscar con macho. Fórmula:  
 $Z = \text{Diámetro del tornillo} - \text{Paso}$ .  
 Ejemplo: Tornillo 16 mm. diámetro. Paso 1,5  
 Diámetro broca 14,5 mm.

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

$$P = 1 \text{ mm}$$

$$d_2 = 11.026 \text{ mm}$$

$$d_3 = 9.89 \text{ mm}$$

Datos adicionales del collarín:

$$\text{Diámetro del collarín: } d_c = 12.16 \text{ mm}$$

$$\text{Coeficiente de fricción: } f = f_c = 0.07$$

La carga que va a mover este eje es de 82.70 [N] que considerando un factor de seguridad de 1.5 se tiene:

$$F = 1.5 * 82.70 = 124.05 \text{ N}$$

De donde reemplazando estos datos en las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$T_R = \frac{124.05 * 0.01}{2} \left( \frac{0.001 + \pi * 0.07 * 0.01}{\pi * 0.01 - 0.07 * 0.001} \right) + \frac{124.05 * 0.07 * 0.01}{2}$$

$$T_R = 0.11 \text{ N} - m$$

$$T_L = \frac{124.05 * 0.01}{2} \left( \frac{\pi * 0.07 * 0.01 - 0.001}{\pi * 0.01 + 0.07 * 0.001} \right) + \frac{124.05 * 0.07 * 0.01}{2}$$

$$T_L = 0.07 \text{ N} - m$$

Dado que el torque necesario para subir la carga es mayor que el necesario para bajarla, se tomará en cuenta este valor para la selección del motor para el eje Z, con un factor de seguridad de 1.5 se tiene:

$$T_R = 0.11 * 1.5 = 0.17 \text{ N} - m$$

$$T_R = 1.7 \text{ Kg} - cm$$

Este es el torque que debe satisfacer los motores para el movimiento, para lo cual se busca un motor paso a paso con un torque suficiente, de lo cual se selecciona un motor NEMA 23 que tiene un torque de máximo de hasta  $21 \text{ Kg} - \text{cm}$  o  $300 \text{ oz-in}$ .

### 3.5. Diseño de elementos de transmisión

Para este diseño, se toma en cuenta el dimensionamiento del piñón y de su cremallera respectiva, los cuales serán el medio de transmisión para la máquina CNC de corte plasma, para ello se considera las ecuaciones 3.9 y 3.10 empleadas para los cálculos respectivos:

Fuerza tangencial real

$$F_{vt} = P(9.81 + a) \quad (\text{Ec. 3. 9})$$

$$F_{ht} = P(9.81\mu + a) \quad (\text{Ec. 3. 10})$$

Donde:

$F_{vt}$ : Fuerza tangencial vertical teórica [N]

$F_{ht}$ : Fuerza tangencial horizontal teórica [N]

$P$ : Masa a elevar o trasladar [Kg]

$a$ : Aceleración lineal [ $\text{m/s}^2$ ]

$\mu$ : Coeficiente de rozamiento

Fuerza tangencial corregida

$$F_{vc} = F_{vt} \cdot K \quad (\text{Ec. 3. 11})$$

$$F_{hc} = F_{ht} \cdot K \quad (\text{Ec. 3. 12})$$

Donde:

$F_{vc}$ : Fuerza tangencial vertical corregida [N]

$F_{hc}$ : Fuerza tangencial horizontal corregida [N]

$K$ : Coeficiente de seguridad

Diámetro primitivo

$$dp = \frac{M \cdot 2000 \cdot \eta}{F_{tv}} \quad (\text{Ec. 3. 13})$$

$$dp = \frac{M \cdot 2000 \cdot \eta}{F_{th}} \quad (\text{Ec. 3. 14})$$

Donde:

$\eta$ : Rendimiento piñón cremallera

$M$ : Par de giro [N.m]

$dp$ : Diámetro primitivo [mm]

Del diseño propuesto como alternativa de solución se extraen los siguientes datos para calcular los parámetros del sistema de transmisión:

Datos:

La carga será:

$$F = 268.24 \text{ N}$$

$$P = 27.37 \text{ Kg}$$

Se determina a continuación la velocidad de avance de la antorcha en vacío, utilizando la velocidad recomendada para el espesor de 9.5 mm seleccionado anteriormente,  $V = 1500 \text{ mm/min}$

$$v = \frac{1500 \text{ mm}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} * \frac{1 \text{ ft}}{30.48 \text{ cm}} = 4.92 \frac{\text{ft}}{\text{min}}$$

$$v = 0.025 \text{ m/s}$$

$$a = 1.31 \frac{ft}{s^2} = 0.4 \frac{m}{s^2} \quad (\text{Recomendada por el fabricante})$$

$$\eta = 90\%$$

Para el coeficiente de seguridad se considera el tipo de carga, a una carga uniforme de 8 a 10 horas en tiempo de trabajo, se obtiene  $K=2$  de la Tabla 27:

**Tabla 27**  
*Tipo de Carga*

Tiempo de trabajo	Tipo de carga		
	Uniforme	Moderada	Pesada
Ocasional (1/2 hora)	1.50	1.80	2.30
Intermitente (3 horas)	1.80	2.00	2.50
8-10 horas	2.00	2.25	2.80
24 horas	2.00	2.50	3.00

Fuente: Catarina.udlap.mx, 2015

De la misma forma se selecciona el coeficiente de fricción de deslizamiento, ver

Tabla 28:

**Tabla 28**  
*Coefficiente de fricción de deslizamiento ( $f_s$ )*

Material	Coeficiente	
	Seco	Lubricado
Acero sobre acero	0.33	0.20
Hierro fundido en acero fundido sobre la misma superficie	0.50	0.40
Acero sobre bronce	-	0.15
Acero sobre madera dura	0.35	0.25
Hierro fundido en acero fundido sobre madera dura	0.44	-

Fuente: Catarina.udlap.mx, 2015

Con lo que se obtiene:

$$F_{vt} = P(9.81 + a) = 279.45 \text{ [N]}$$

$$F_{ht} = P(9.81\mu + a) = 51.22 \text{ [N]}$$

Calculando las fuerzas verticales y horizontales corregidas se tiene:

$$F_{vc} = F_{vt} \cdot K = 558.90 [N]$$

$$F_{hc} = F_{ht} \cdot K = 102.45 [N]$$

Ahora se calcula las revoluciones sobre el piñón, asumiendo un diámetro primitivo de 27 mm, de la siguiente forma:

$$n = \frac{V \cdot 60000}{dp \cdot \pi} \quad (\text{Ec. 3. 15})$$

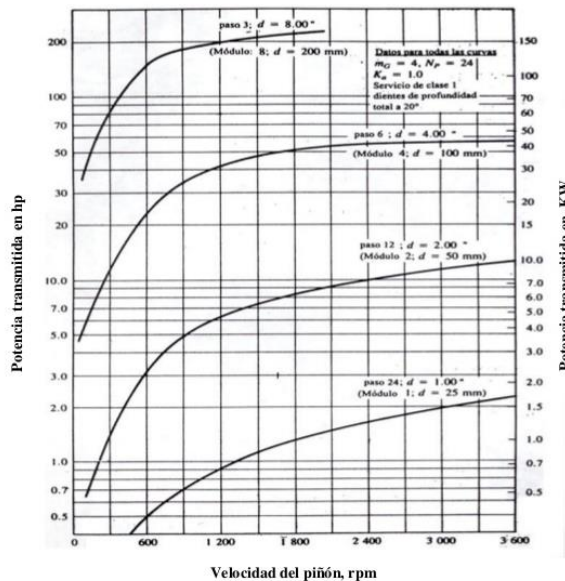
$$n = \frac{0.025 \cdot 60000}{27 \cdot \pi} = 17.68 \text{ RPM}$$

$$M = \frac{dp \cdot F_{vr}}{2000 \cdot \eta} \quad (\text{Ec. 3. 16})$$

$$M = \frac{27 \cdot 558.90}{2000 \cdot 0.9} = 1.54 [N - m] = 15.68 [Kg - cm]$$

$$Pot = T \cdot n \quad (\text{Ec. 3. 17})$$

$$Pot = 1.54(17.68) = 27.23 [w]$$



**Figura 29** Selección módulo piñón



De donde se obtiene los siguientes valores de la Figura 29:

$$\beta = 0 \text{ (Dentado Recto)}$$

$$M = 1.5$$

Dado que se dispone de un espacio limitado para la ubicación del piñón de 30 [mm], se determinan las características restantes del piñón de la siguiente manera:

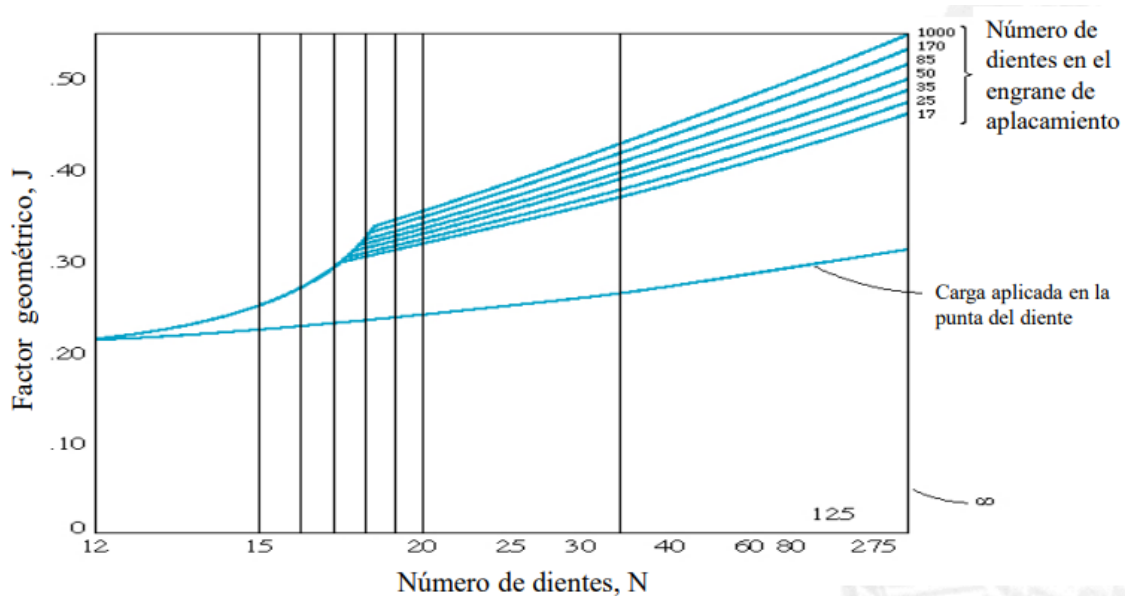
$$d_e = d_p + 2 * M \quad (\text{Ec. 3. 18})$$

$$d_p = d_e - 2 * M = 30 - 2 * 1.5 = 27 \text{ [mm]}$$

$$Z = \frac{d_p}{M} \quad (\text{Ec. 3. 19})$$

$$Z = \frac{27}{1.5} = 18 \text{ dientes}$$

$$\sigma = \frac{F_t}{bmJ} \text{ (Incluido factor de Lewis)} \quad (\text{Ec. 3. 20})$$



**Figura 30** Selección factor geométrico de Lewis

De la Figura 30 se obtiene el factor geométrico de Lewis para el cálculo del esfuerzo al que está sometido el engrane,  $J=0.34$ .

$$\sigma = \frac{558.9}{30 * 1.5 * 0.34} = 36.53 [MPa]$$

Considerando un acero A36 para la cremallera se tiene un factor de seguridad:

$$n = \frac{125}{36.53} = 3.42$$

Al contar con un factor de seguridad mayor a 2, se concluye que el sistema de transmisión calculado es adecuado para satisfacer las necesidades de la máquina.

### 3.6. Cálculos para la selección de los motores “X” e “Y”

Para esta sección se considera que el motor del eje “Y”, moverá a la antorcha que está sujeta en el pórtico móvil, mientras que el motor del eje “X”, moverá a todo el pórtico.

#### 3.6.1. Cálculos Motor Eje “X”

Para este caso, se utiliza los siguientes parámetros mostrados en la Tabla 29:

**Tabla 29**

*Parámetros para diseño de motor*

Nomenclatura	Parámetro
$m_{totalx}$	Masa total a desplazar del eje “X”
$D$	Diámetro del piñón
$U_k$	Coefficiente de rozamiento en las guías
$a$	Aceleración de los motores
$\theta_s$	1 pulso (1.8°/paso)
$l$	1 Paso del motor
$\Delta l$	Incremento de posición por 1 pulso
<i>pulse_number</i>	Número de pulsos
$f$	Frecuencia de pulsos

Datos:

$$P_{totalx} = 230.22 [N]$$

$$m_{totalx} = 23.49 Kg$$

$$D = 30 mm$$

$$U_k = 0.04$$

$$a = 1.31 \frac{ft}{s^2} = 0.4 \frac{m}{s^2} \quad (\text{recomendada por el fabricante})$$

$$l = 1 \text{ mm}$$

Se calcula el incremento de posición por 1 pulso (1.8°/paso) con la Ec. 3.21:

$$\Delta l = \frac{\pi D \theta_s}{360} \quad (\text{Ec. 3. 21})$$

$$\Delta l = \frac{\pi * 30 * 1.8}{360} = 0.471 \text{ mm/paso}$$

A continuación se calcula el número de pulsos y frecuencia de estos pulsos de la siguiente manera:

$$pulse\_number = \frac{l}{\Delta l} \quad (\text{Ec. 3. 22})$$

$$pulse\_number = \frac{1}{0.471} = 2.122 \text{ pulsos}$$

La frecuencia del pulso se calcula como el número de pulsos dividido por el tiempo de posicionamiento, que para nuestro caso es de 1 segundo:

$$\frac{pulse\_number}{t_0} = \frac{2.122}{1} = 2.122 \text{ pps}$$

Se determina el patrón de aceleración y desaceleración, asumiendo que el tiempo de aceleración y desaceleración para el caso es de 0.25 segundos, se calcula la frecuencia de pulsos media de la siguiente manera:

$$f_2 = \frac{\text{pulse\_number}}{t_0 - t_1} \quad (\text{Ec. 3. 23})$$

$$f_2 = \frac{2.122}{1 - 0.25} = 2.829 \text{ pps}$$

Ahora se procede a calcular los momentos de inercia respectivos, comenzando por el piñón del sistema de transmisión:

$$I_{\text{piñon}} = \frac{1}{2} m r^2 \quad (\text{Ec. 3. 24})$$

Para calcular la masa del piñón, extraemos el volumen del diseño en SolidWorks y usamos la densidad del bronce que es el material del cual está hecho el mismo.

$$m_{\text{piñon}} = \rho * V \quad (\text{Ec. 3. 25})$$

$$m_{\text{piñon}} = 8900 * 6.143 * 10^{-6} = 0.0546 \text{ [Kg]}$$

$$I_{\text{piñon}} = \frac{1}{2} (0.0546)(1.5)^2 = 0.061 \text{ [Kg - cm}^2\text{]}$$

El momento de inercia de la cremallera y su carga es: (Ramirez Cardona, 2011)

$$I_w = W r^2 \quad (\text{Ec. 3. 26})$$

$$I_w = (23.5) * (1.5)^2 = 52.875 \text{ [Kg - cm}^2\text{]}$$

$$I_{\text{total}} = I_{\text{piñon}} + I_w = 52.936 \text{ [Kg - cm}^2\text{]}$$

Se calcula a continuación el par necesario para el motor a seleccionar, de donde se tiene:

$$F = \mu mg \quad (\text{Ec. 3. 27})$$

$$F = 0.04 * 23.5 * 9.81 = 9.2214 \text{ [N]}$$

$$T_L = F * \frac{r}{\eta} \quad (\text{Ec. 3. 28})$$

$$T_L = 9.2214 * \frac{1.5}{0.9} = 15.369 \text{ [N - cm]} = 1.568 \text{ [Kg - cm]}$$

El par de aceleración es:

$$T_A = \frac{J_0 + I_{total}}{g} * \frac{\pi \theta_s}{180} * \frac{f_2}{t_1} \quad (\text{Ec. 3. 29})$$

$$T_A = \frac{J_0 + 52.936}{980.7} * \frac{\pi(1.8)}{180} * \frac{2.829}{0.25} = 0.00036J_0 + 0.019 \text{ [Kg - cm]}$$

Donde  $J_0$  es el momento de inercia del rotor del motor, si consideramos un motor

NEMA 23 es de  $300 \text{ g - cm}^2$ .

Por lo tanto el par requerido es de:

$$T_M = (T_A + T_L) * K \quad (\text{Ec. 3. 30})$$

Teniendo un factor de seguridad  $K=2$

$$T_M = (0.0192 + 1.568) * 2 = 3.174 \text{ [Kg - cm]}$$

Este es el torque que debe satisfacer el motor para el movimiento, para lo cual se

busca un motor paso a paso con un torque suficiente, seleccionando un motor NEMA 23

que tiene un torque de  $21 \text{ Kg - cm}$  o  $300 \text{ oz-in}$ .

### 3.6.2. Cálculos Motor Eje “Y”

Este cálculo se lo realiza de manera similar que para el motor del Eje “X” calculado anteriormente, de la siguiente manera:

Datos:

$$P_{totaly} = 127.4 [N]$$

$$m_{totaly} = 13 Kg$$

$$D = 30 mm$$

$$U_k = 0.04$$

$$a = 1.31 \frac{ft}{s^2} = 0.4 \frac{m}{s^2} \quad (\text{recomendada por el fabricante})$$

$$l = 1 mm$$

Se calcula el incremento de posición por 1 pulso (1.8°/paso) con la (Ec. 3. 21)

$$\Delta l = \frac{\pi * 30 * 1.8}{360} = 0.471 mm/paso$$

A continuación se determina número de pulsos y frecuencia de estos pulsos con la (Ec. 3. 22):

$$pulse\_number = \frac{l}{\Delta l} = \frac{1}{0.471} = 2.122 pulsos$$

La frecuencia del pulso se calcula como el número de pulsos dividido por el tiempo de posicionamiento, que para nuestro caso es de 1 segundo:

$$\frac{pulse\_number}{t_0} = \frac{2.122}{1} = 2.122 \text{ pps}$$

Se calcula el patrón de aceleración y desaceleración, asumiendo que el tiempo de aceleración y desaceleración para el caso es de 0.25 segundos, se determina la frecuencia de pulsos media con la (Ec. 3. 23):

$$f_2 = \frac{pulse\_number}{t_0 - t_1} = \frac{2.122}{1 - 0.25} = 2.829 \text{ pps}$$

Ahora se procede a determinar los momentos de inercia respectivos, comenzando por el piñón del sistema de transmisión con la (Ec. 3. 24) y (Ec. 3. 25):

Para calcular la masa del piñón, extraemos el volumen del diseño en SolidWorks y usamos la densidad del bronce que es el material del cual está hecho el mismo.

$$m_{piñon} = 8900 * 6.143 * 10^{-6} = 0.0546 \text{ [Kg]}$$

$$I_{piñon} = \frac{1}{2} (0.0546)(1.5)^2 = 0.0614 \text{ [Kg - cm}^2\text{]}$$

El momento de inercia de la cremallera y su carga está dado por la (Ec. 3. 26)

$$I_w = Wr^2 = (13) * (1.5)^2 = 29.25 \text{ [Kg - cm}^2\text{]}$$

$$I_{total} = I_{piñon} + I_w = 29.311 \text{ [Kg - cm}^2\text{]}$$

Se calcula a continuación el par necesario (Ec. 3. 27) y (Ec. 3. 28) para el motor a seleccionar, de donde se tiene:

$$F = 0.04 * 13 * 9.81 = 5.1012 \text{ [N]}$$

$$T_L 5.1012 * \frac{1.5}{0.9} = 8.502 [N - cm] = 0.8676 [Kg - cm]$$

El par de aceleración está dado por la (Ec. 3. 29):

$$T_A = \frac{J_0 + 29.311}{980.7} * \frac{\pi(1.8)}{180} * \frac{2.829}{0.25} = 0.00036J_0 + 0.0106 [Kg - cm]$$

Donde  $J_0$  es el momento de inercia del rotor del motor, que si consideramos un motor NEMA 23 es de  $300 g - cm^2$ .

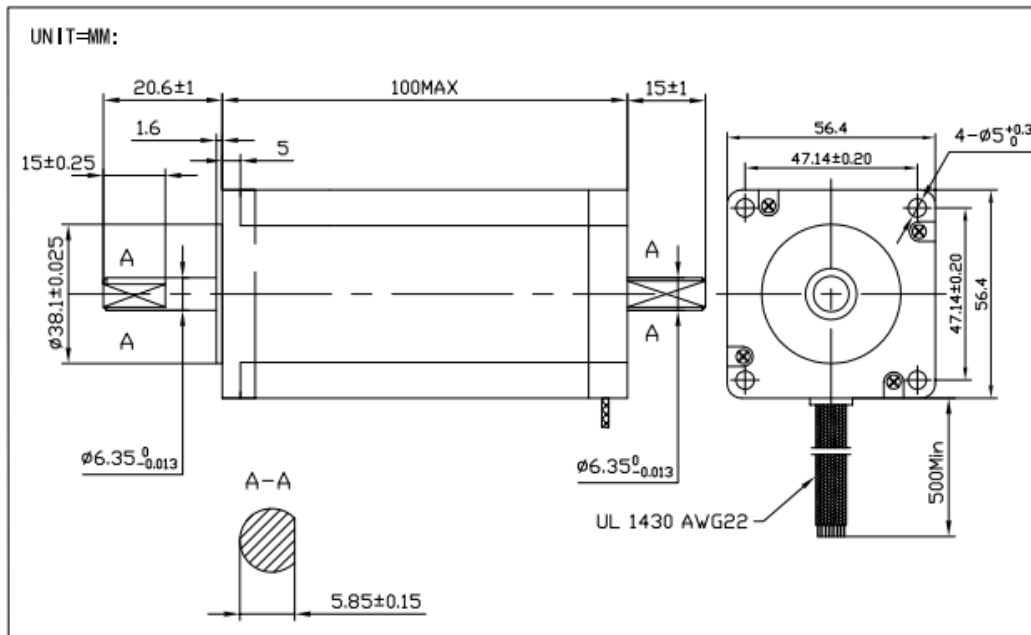
Por lo tanto el par requerido es (Ec. 3. 30) y teniendo un factor de seguridad  $K=2$

$$T_M = (0.0107 + 0.8676) * 2 = 1.757 [Kg - cm]$$

Este es el torque que debe satisfacer el motor para el movimiento, para lo cual se busca un motor paso a paso con un torque suficiente, seleccionando un motor NEMA 23 que tiene un torque de  $21 Kg - cm$  o  $300 oz-in$ .

En la Figura 31 y 32 se muestran las dimensiones y características técnicas del motor NEMA 23 seleccionado como actuadores para el movimiento del eje "X" e "Y".





**Figura 31** Dimensiones motor NEMA 23


Fuente: Manual Hybrid Stepper Motor

PHASE	STEP ANGLE	RATED VOLTAGE	CURRENT	RESISTANCE	INDUCTANCE	HOLDING TORQUE	WEIGHT
	DEG/STEP	V	A	ohms	mH	OZ-IN	Kg
2	1.8	2.55	3.5	0.73	2.8	381	1.5

**Figura 32** Especificaciones técnicas motor NEMA 23

Fuente: Manual Hybrid Stepper Motor

En la Figura 33, se muestran las especificaciones técnicas de la fuente de alimentación seleccionada para los motores y el driver de control de la máquina cortadora de plasma.

<ul style="list-style-type: none"> <li>• AC input range selectable by switch</li> <li>• Protections: Short circuit / Overload / Over voltage / Over temp.</li> <li>• Built-in remote sense function</li> <li>• Forced air cooling by built-in DC fan</li> <li>• 100% full load burn-in test</li> <li>• Low cost, high reliability</li> <li>• 1 years warranty</li> </ul>	
	247x 127x 63.5 mm
<p>AC input voltage range ..... 90~132VAC / 180~264VAC selectable by switch</p> <p>AC inrush current ..... Cold start, 25A at 115VAC, 50A at 230VAC</p> <p>DC adjustment range ..... <math>\pm 10\%</math> rated output voltage</p> <p>Overload protection ..... 105%~125% shut off, AC recycle to re-start</p> <p>Over voltage protection ..... 115%~140% rated output voltage</p> <p>Setup, rise, hold up time ... 1000ms, 50ms, 20ms at full load and 230VAC</p> <p>Withstand voltage ..... I/P-O/P:2KVAC, I/P-FG:1.5KVAC, 1minute</p> <p>Working temperature ..... -10~+40°C@100%, 60°C@60% load</p> <p>Safety standards ..... UL60950-1 approved</p> <p>EMC standards ..... Design refer to EN55022 class B</p> <p>Packing ..... 2.1kg ; 6pcs / 13.4kg / 1.25CUFT</p>	

**Figura 33** Especificaciones técnicas motor NEMA 23  
Fuente: Manual Hybrid Stepper Motor

### 3.7. Análisis CAE

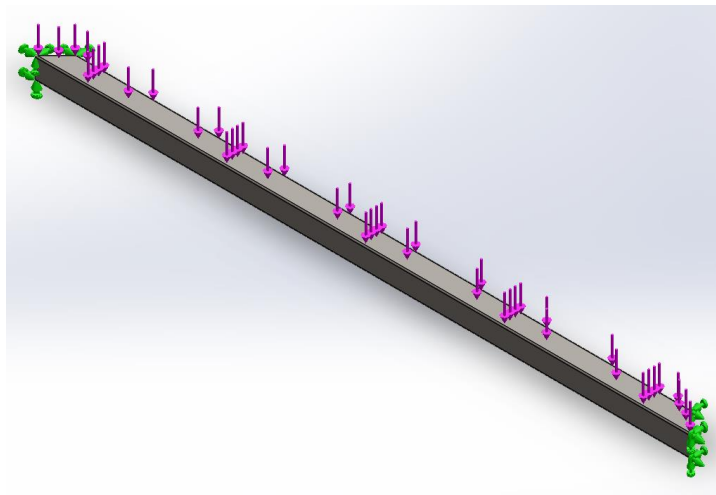
#### 3.7.1. Análisis de la viga sometida a mayor esfuerzo del sistema de soporte

En la sección 3.3 se determinó que el elemento crítico a ser analizado del soporte es el que presenta los siguientes datos de esfuerzo de von mises y factor de seguridad respectivamente:

$$\sigma_{von\ mises} = 23.70\ MPa$$

$$n = 5.27$$

Por lo que se procede a realizar el análisis CAE de dicho elemento con la ayuda del Software SolidWorks utilizando la herramienta de análisis estático en el simulador que este posee, para lo cual se considerara una fuerza distribuida en dicho elemento de 1657.33 N, que corresponde a la suma de todos los elementos que este va a soportar, y sujeciones fijas en ambos extremos ya que van a estar unidos a través del proceso de soldadura. Además, se aplica el material del soporte que se seleccionó en la sección 3.2 acero ASTM A36.



**Figura 34** Ubicación de fuerza y sujeciones análisis de la viga del sistema de soporte

Se procede a realizar el mallado del elemento con las siguientes especificaciones, las cuales se regularon para obtener la mayor exactitud en los resultados teóricos calculados.

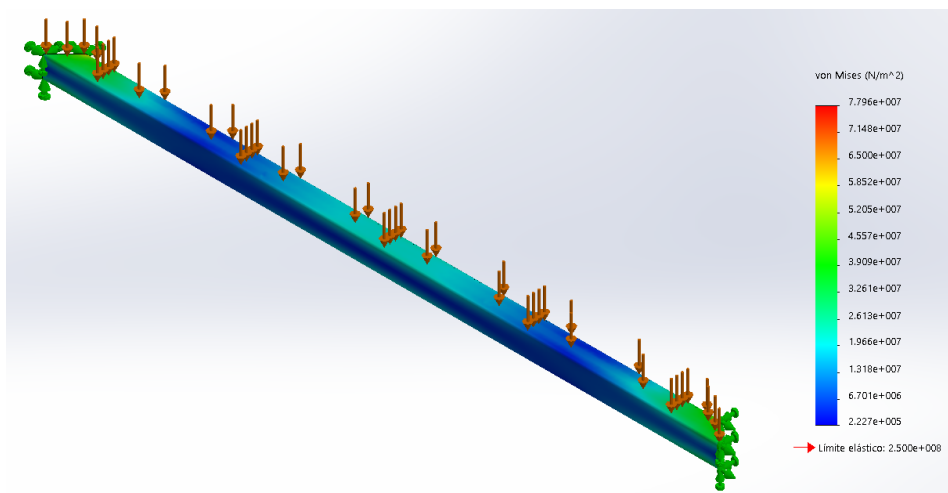
Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	11.9741 mm
Tolerancia	0.598705 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	37129
Número total de elementos	20135
Cociente de aspecto máximo	63.793
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	0.0745
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	29.7
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:08
Nombre de computadora	

**Figura 35** Parámetros de mallado para el análisis de la viga del sistema de soporte

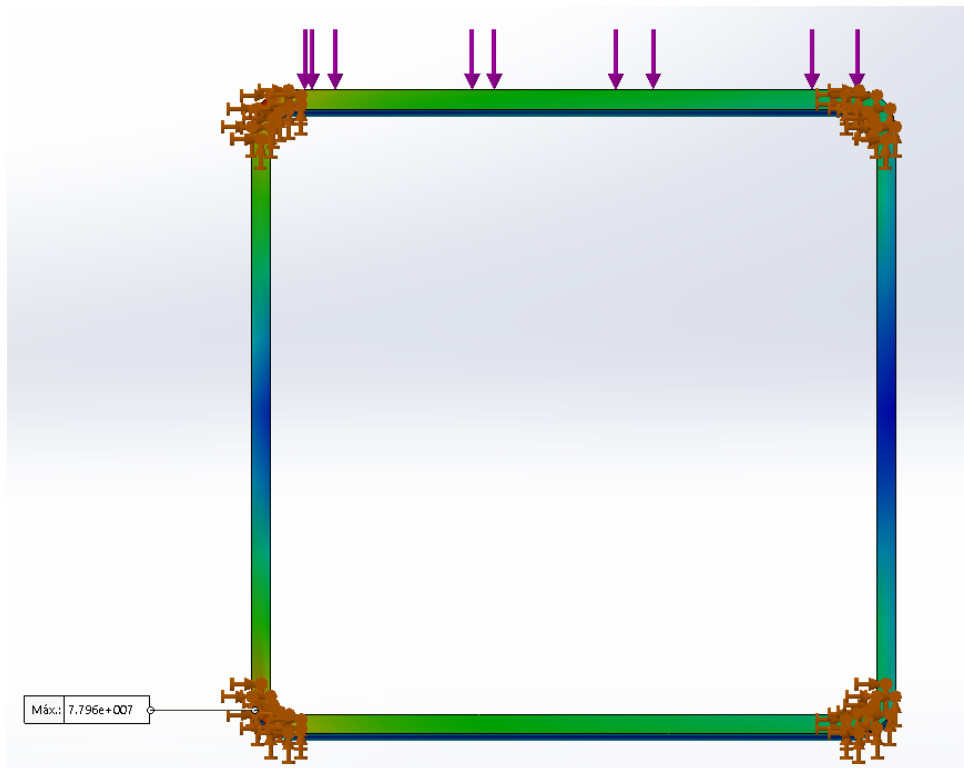
Finalmente se procede a realizar la ejecución del análisis, obteniendo los siguientes gráficos como resultados, donde se puede observar que los valores calculados son muy semejantes a los valores simulados siendo estos:

$$\sigma_{von\ mises} = 24.11\ MPa$$

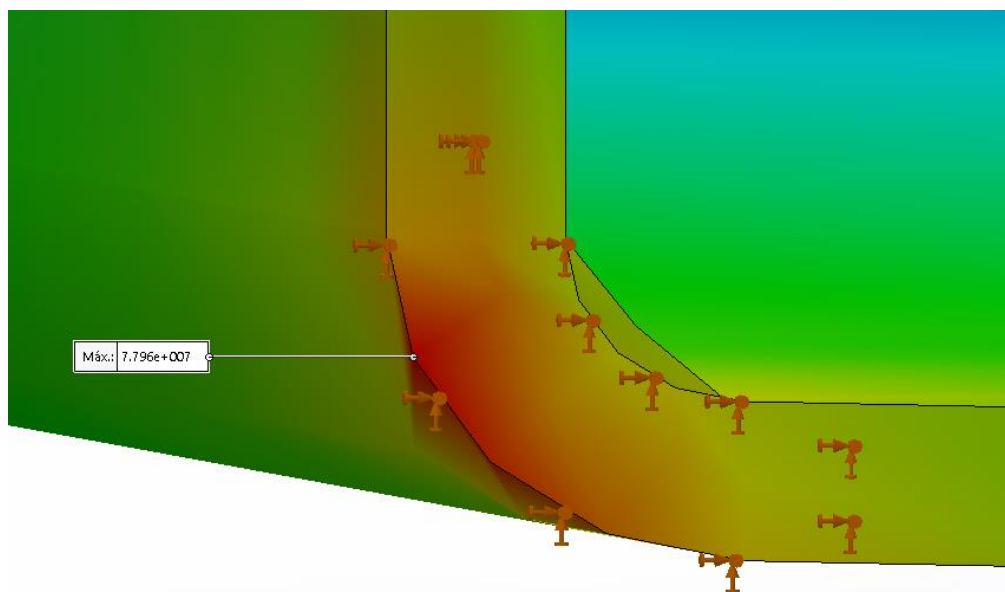
$$n = 5.21$$



**Figura 36** Esfuerzo de Von Mises de la viga del sistema de soporte



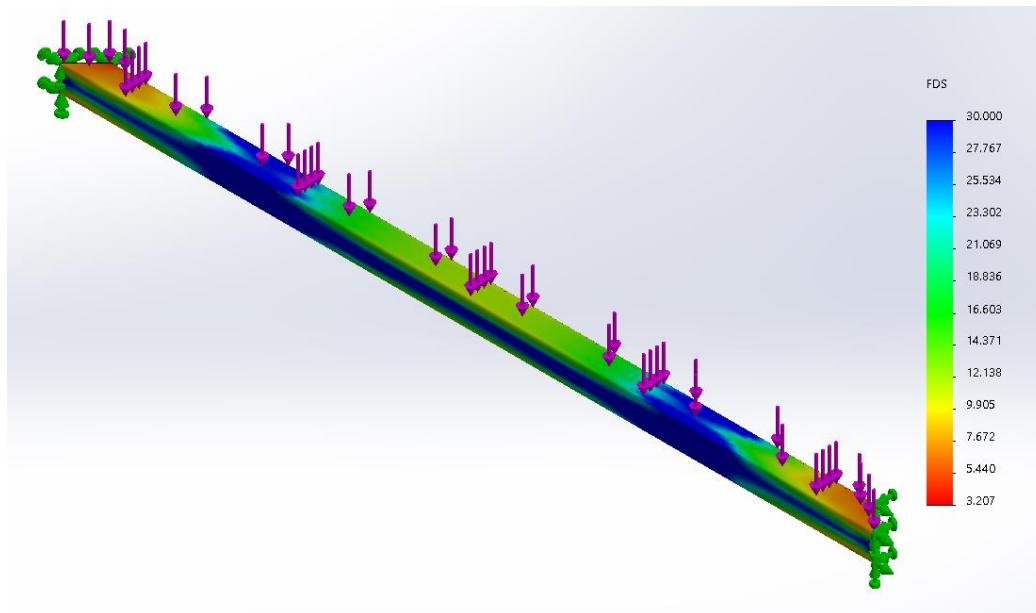
**Figura 37** Ubicación y Magnitud del máximo esfuerzo de Von Mises



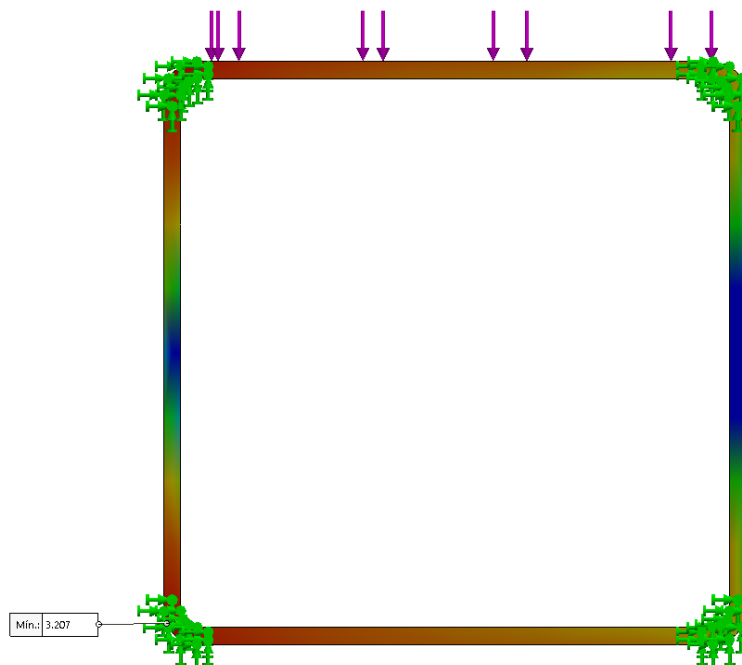
**Figura 38** Ubicación y Magnitud del máximo esfuerzo de Von Mises

Como podemos observar, se obtiene un esfuerzo máximo de 77.96 MPa ubicado en la parte inferior de la viga donde tiene sus apoyos, este esfuerzo no sobrepasa el límite

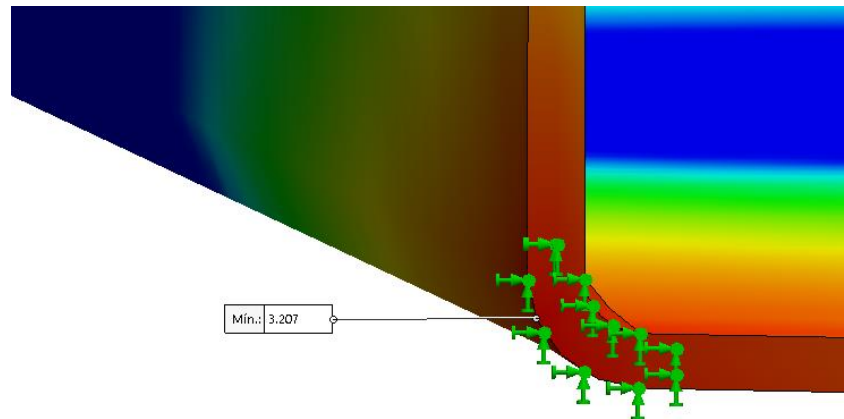
de fluencia de dicho material, por lo cual se concluye que va a soportar la fuerza que se ejerce en el mismo.



**Figura 39** Factor de seguridad de la viga del sistema de soporte



**Figura 40** Ubicación y Magnitud del factor de seguridad de la unión soldada



**Figura 41** Ubicación y Magnitud del factor de seguridad en la unión soldada

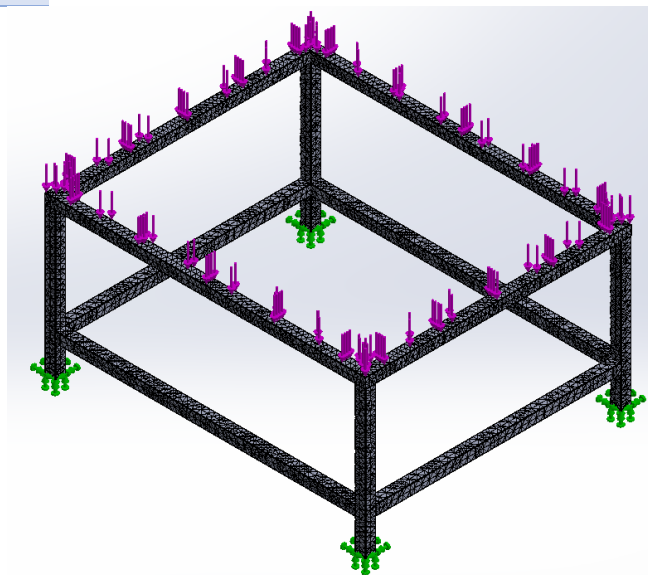
Al tener un esfuerzo que no sobrepasa el límite de fluencia del material se obtiene un factor de seguridad de 3.207, lo cual asegura que el sistema no falle.

### 3.7.2. Análisis de la estructura de soporte

**Tabla 30**

*Análisis de la estructura de soporte*

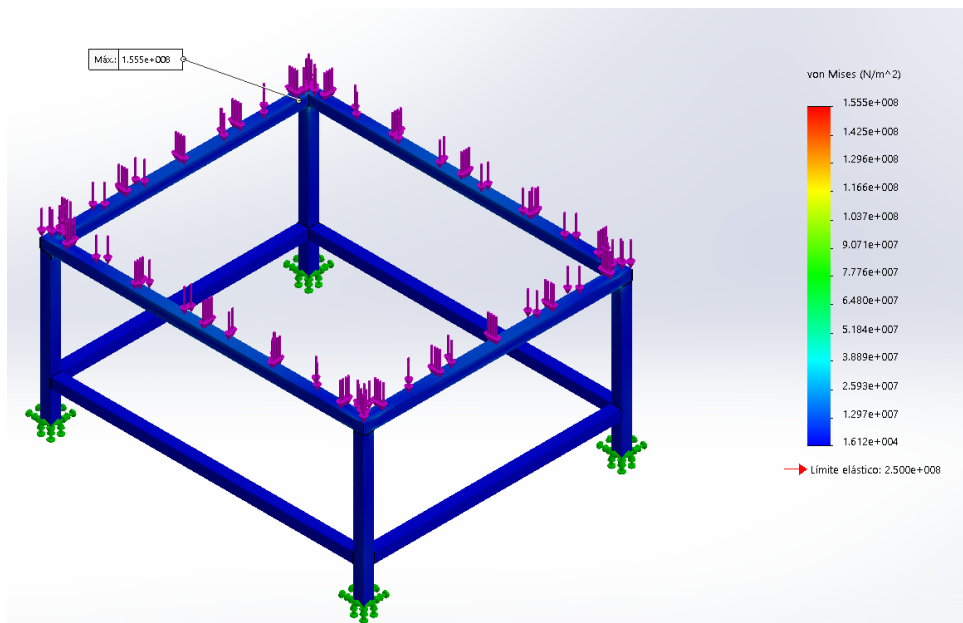
Parámetros	
Sujeciones	Apoyos Fijos
Fuerza	1657.33 N
Material	ASTM A36



**Figura 42** Ubicación de fuerza y sujeciones para el análisis del sistema de soporte

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño máx. de elemento	91.4654 mm
Tamaño mín. de elemento	18.2931 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	137151
Número total de elementos	69512
Cociente de aspecto máximo	247.39
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	0.148
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	92.9
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Activar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:19
Nombre de computadora	

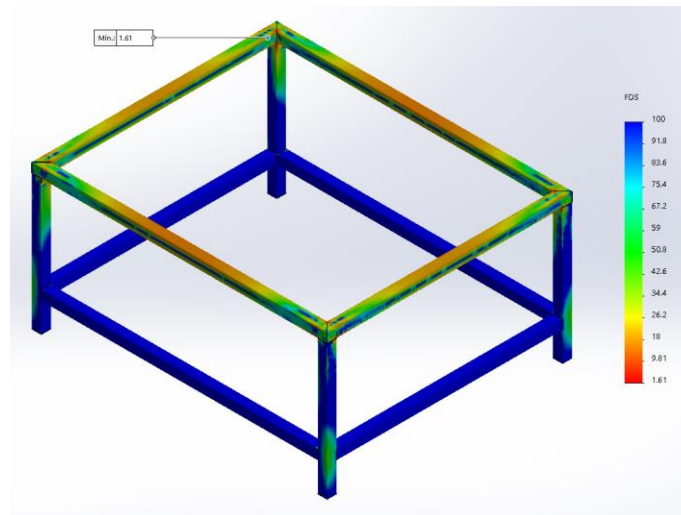
**Figura 43** Parámetros de mallado para el del sistema de soporte



**Figura 44** Esfuerzo de Von Mises de la viga del sistema de soporte

Como se puede observar se obtiene un esfuerzo máximo de 15.55 MPa, este esfuerzo no sobrepasa el límite de fluencia de dicho material, por lo cual se concluye que va a soportar la fuerza que se ejerce en el mismo.





**Figura 45** Factor de seguridad del sistema de soporte

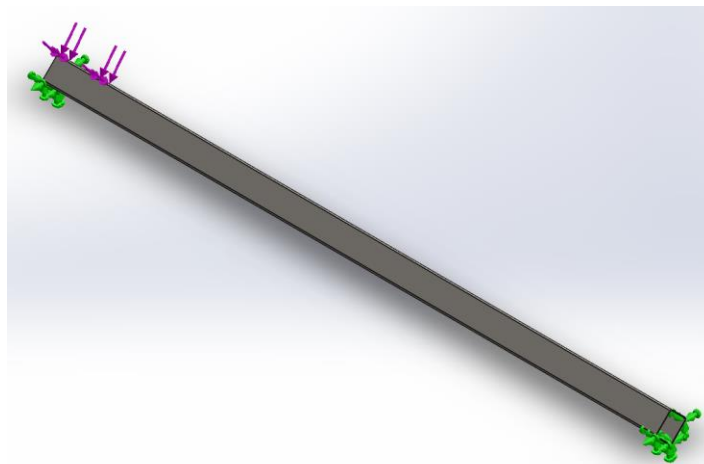
Al tener un esfuerzo que no sobrepasa el límite de fluencia del material se obtiene un factor de seguridad mínimo de 1.61, lo cual asegura que el sistema no falla.

### 3.7.3. Análisis de la viga de movimiento en el eje X

**Tabla 31**

*Análisis de viga movimiento en el eje X*

Parámetros	
Sujeciones	Apoyos Fijos
Fuerza	42.3 N
Material	ASTM A36

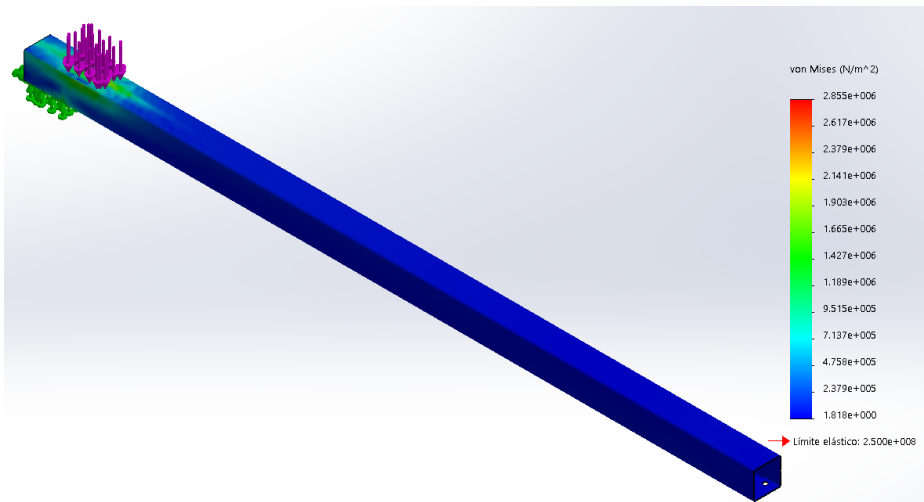


**Figura 46** Ubicación de fuerza y sujeciones análisis de viga movimiento en el eje X

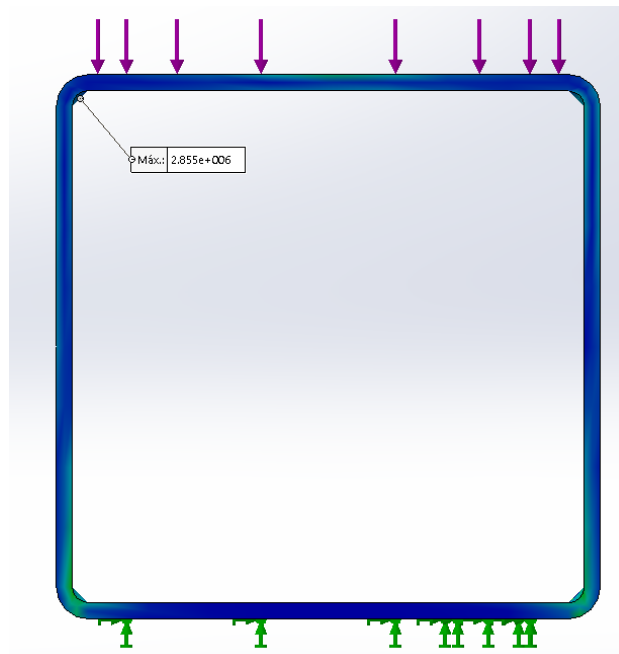
Se supondrá que la fuerza está ubicada a un extremo de la viga ya que en este punto se presentara el mayor esfuerzo.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	12.3264 mm
Tolerancia	0.616319 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	34126
Número total de elementos	18562
Cociente de aspecto máximo	71.159
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	0.199
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	37.8
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:08
Nombre de computadora	

**Figura 47** Parámetros de mallado para el análisis de viga movimiento en el eje X

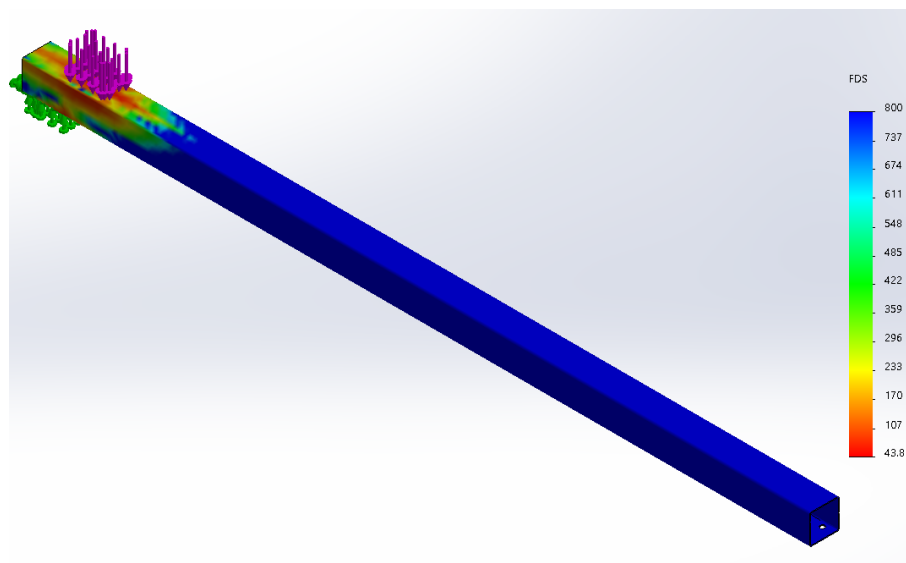


**Figura 48** Esfuerzo de Von Mises de la viga movimiento en el eje X

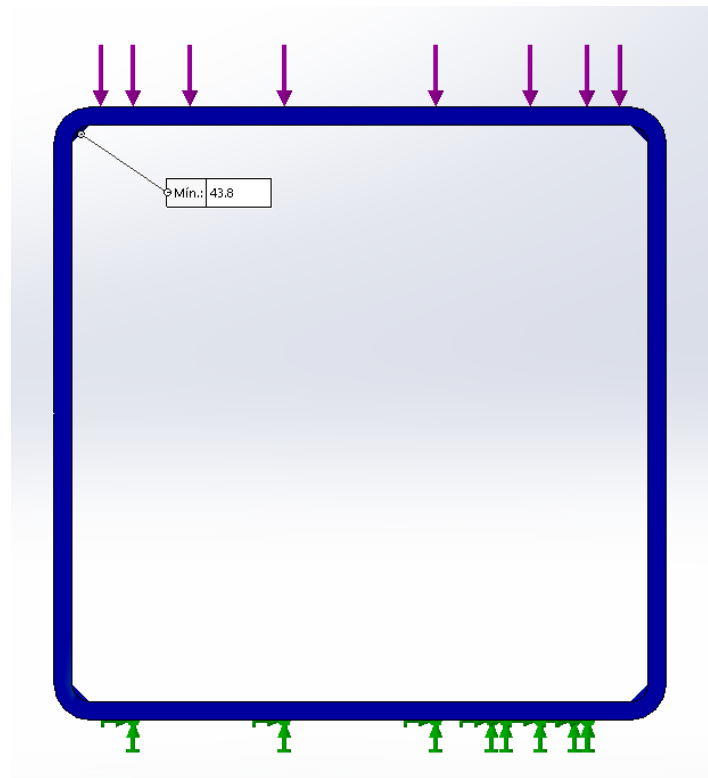


**Figura 49** Ubicación y Magnitud del máximo esfuerzo de Von Mises

Como podemos observar se obtiene un esfuerzo máximo de 2.85 MPa, este esfuerzo no sobrepasa el límite de fluencia de dicho material, por lo cual se concluye que va a soportar la fuerza que se ejerce en el mismo.



**Figura 50** Factor de seguridad de viga del movimiento en el eje X



**Figura 51** Factor de seguridad de viga del movimiento en el eje X

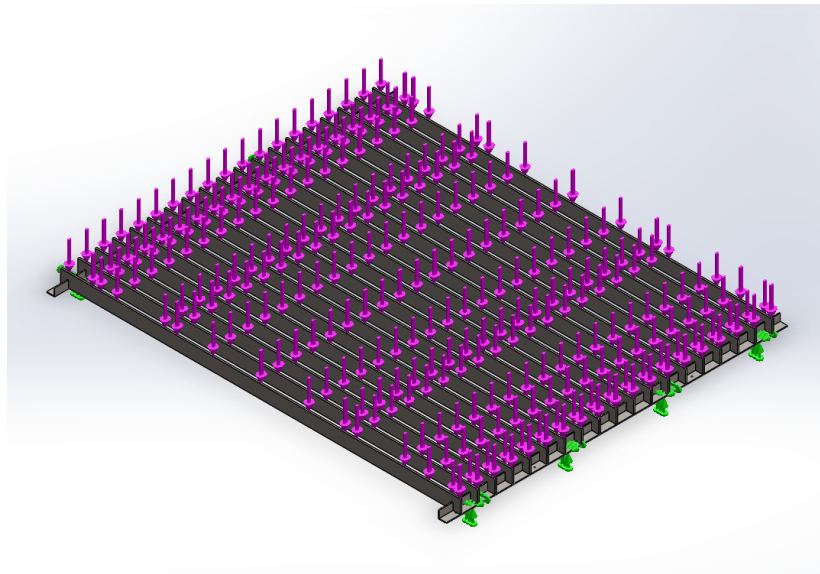
Al tener un esfuerzo que no sobrepasa el límite de fluencia del material, sino que más bien es muy inferior a este, se obtiene un factor de seguridad mínimo de 43.8, el cual nos asegura que el sistema no falla.

#### 3.7.4. Análisis de la mesa de soporte

**Tabla 32**

*Análisis de la mesa de soporte*

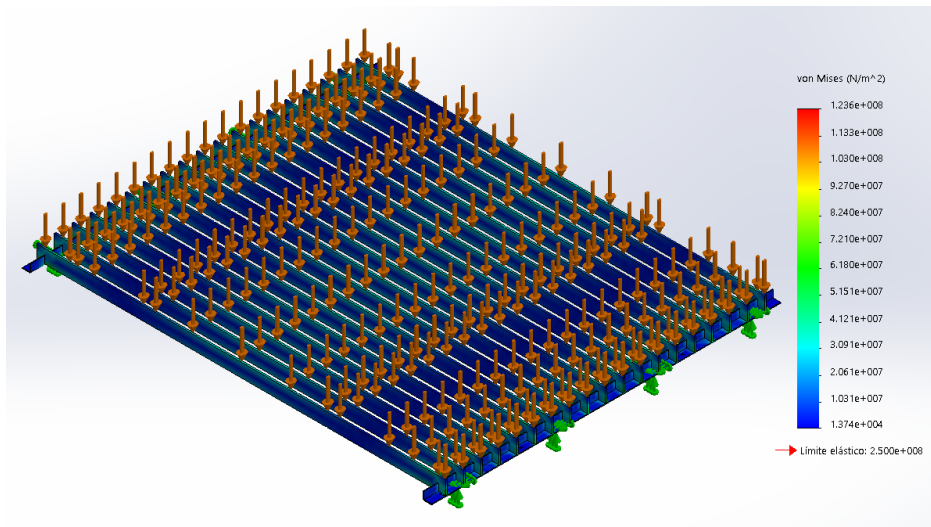
Parámetros	
Sujeciones	Apoyos Fijos
Fuerza	1145.032 N
Material	ASTM A36



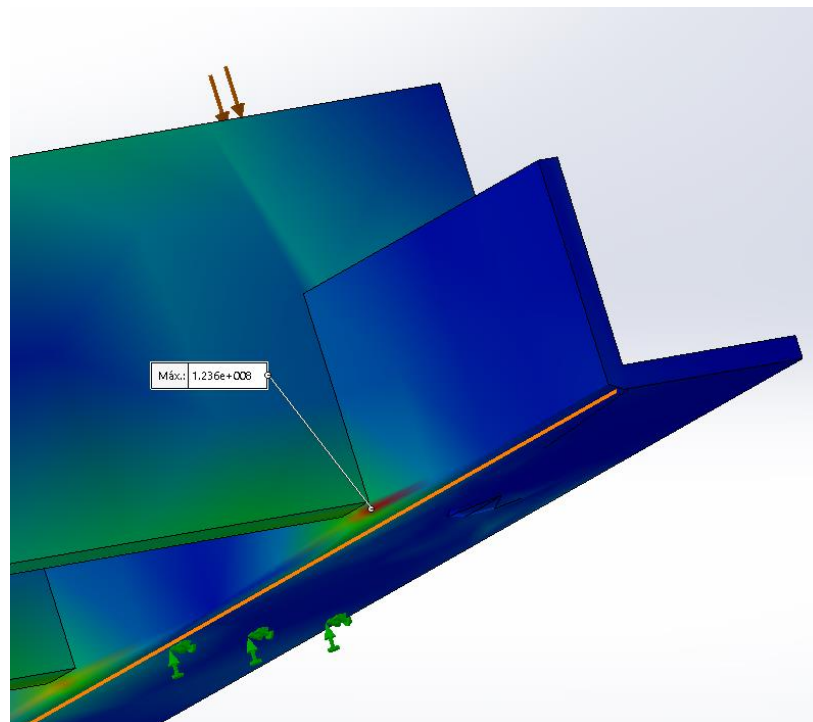
**Figura 52** Ubicación de fuerza y sujeciones para el análisis de la mesa de soporte

Nombre de estudio	Análisis estático 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	23.6557 mm
Tolerancia	1.18279 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	22413
Número total de elementos	9781
Cociente de aspecto máximo	42.444
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	0.092
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	23.8
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:07
Nombre de computadora	

**Figura 53** Parámetros de mallado para el análisis de la mesa de soporte

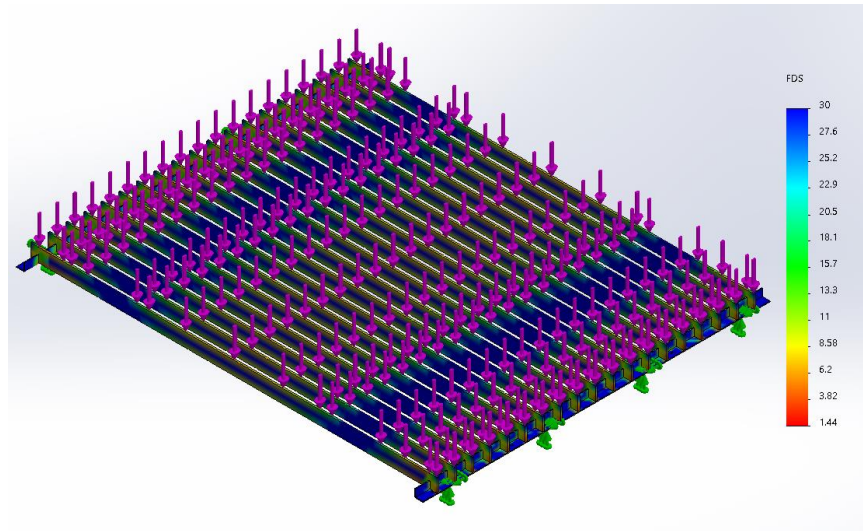


**Figura 54** Esfuerzos de Von Mises de la mesa de soporte

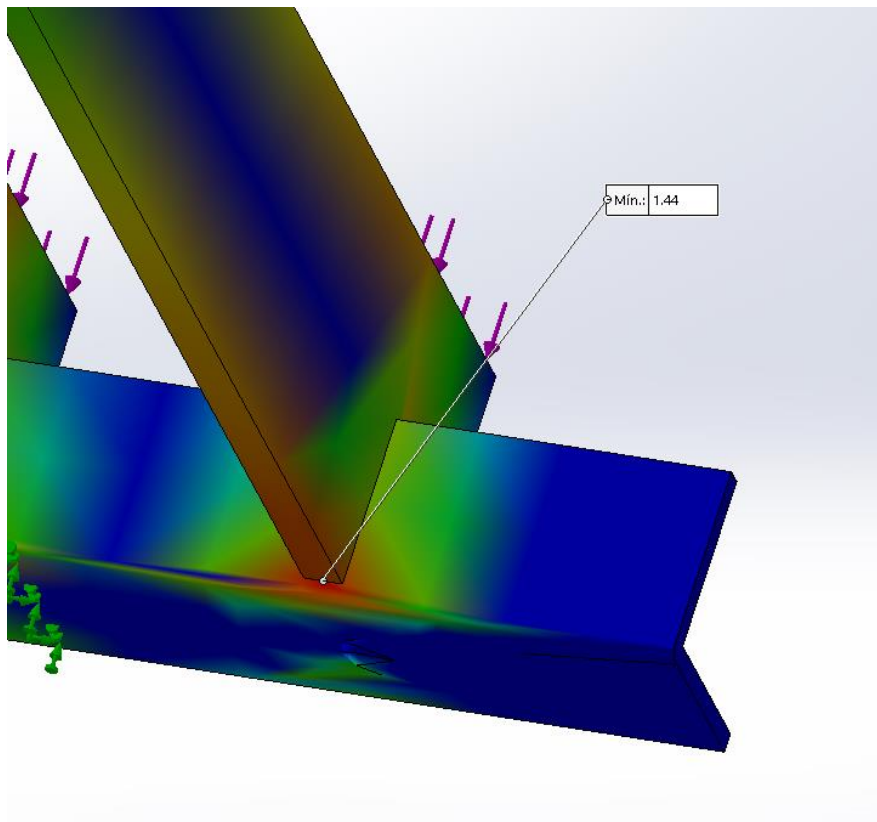


**Figura 55** Ubicación y Magnitud del máximo esfuerzo de Von Mises

Como se puede observar se obtiene un esfuerzo máximo de 123 MPa, que no sobrepasa el límite de fluencia de dicho material, por lo cual se concluye que va a soportar la fuerza que se ejerce en el mismo.



**Figura 56** Factor de seguridad de la mesa de soporte



**Figura 57** Factor de seguridad de viga de la mesa de soporte

Al tener un esfuerzo que no sobrepasa el límite de fluencia del material, se obtiene un factor de seguridad mínimo de 1.44, lo cual nos asegura que el sistema no falla.

### 3.8. Resumen factores de seguridad de los elementos diseñados

En las secciones 3.3 hasta 3.6 se realizaron los cálculos necesarios para el diseño de los elementos principales de la máquina cortadora de plasma, entre los cuales se tiene (ver Tabla 33):

**Tabla 33**

*Resumen factores de seguridad elementos diseñados*

N°	Elemento	Factor de seguridad (n)
1	<b>Estructura de soporte fijo (mesa de corte)</b>	5.27
2	<b>Transmisión piñón-cremallera</b>	3.42
3	<b>Unión soldada de la estructura de soporte</b>	3.21
4	<b>Viga de soporte para pórtico móvil</b>	43.80
5	<b>Mesa de soporte para la plancha a cortar</b>	1.44

Como se observa en la Tabla 33, se tiene las siguientes consideraciones:

- El factor de seguridad 1, tiene un valor de 5.27 (sobredimensionado) en base al material seleccionado para la estructura de soporte, que para el presente proyecto fue un tubo estructural de acero A36 de 50x50mm de sección y 3mm de espesor, según los cálculos realizados una sección de 30x30mm es suficiente para soportar las cargas antes mencionadas, sin embargo las piezas de guía y soporte para los motores de la máquina requieren de una dimensión mínima para su soporte de 50mm, por las dimensiones de los motores NEMA 23 seleccionados anteriormente.
- De la misma forma que el factor de seguridad 1, el factor de seguridad 2 tiene un valor sobredimensionado de 3.42, esto dado porque según los cálculos



realizados un sistema de piñón – cremallera de módulo 1, es suficiente para las cargas que mueve la máquina, sin embargo por el costo y facilidad de manufactura se seleccionó un módulo de 1.5, economizando de esta forma la manufactura de los elementos de transmisión.

- De la misma forma que el factor 1, el factor de seguridad 3 presenta un valor sobredimensionado de 3.21, esto se debe a las características del material seleccionado para la estructura de soporte que como se mencionó anteriormente fue sobredimensionado, por condiciones de diseño.
- El factor de seguridad 4 presenta un valor sobredimensionado de 43.80 ya que el material es el mismo que la estructura de soporte de la mesa de corte, sin embargo este tubo soporta una carga mucho menor que la mesa.
- Por último las uniones soldadas de las platinas para soporte de la plancha a cortar, presentan un factor de seguridad adecuado de 1.44, asegurando que dicha unión no va a fallar.

### **3.9. Dimensionamiento elementos eléctricos del panel de control**

#### **3.9.1. Selección de driver para los motores**

Una vez que se seleccionó los motores antes mencionados, se procede con la selección del driver para el control de los mismos. Para este caso se busca que el driver satisfaga las siguientes características de funcionamiento:

Corriente máxima: 12.5 [A]

Voltaje operación: 48 [V] dado que la fuente de alimentación es de 48 [V]

Además se busca un driver cuyo funcionamiento facilite el control de 4 motores para los 3 respectivos ejes de la máquina.

Bajo estas características se seleccionó el driver GECKO G540, cuyas características son las siguientes mostradas en la Figura 58:

	Minimum	Maximum	Units
Supply Voltage	18	50	VDC
Motor Current	0	3.5	A
Power Dissipation	1	13	W
Short Circuit Trip	14		A
Temperature	0	70	°C
Humidity	0	95	%
Motor Inductance	1	30	mH
Input Frequency	0	200	kHz
Step Pulse "0" Time	2		µs
Step Pulse "1" Time	1		µs
Direction Setup (Before step rising edge)	200		nS
Direction Setup (Hold after pulse rising edge)	200		nS
Signal Voltage	3.3	5	VDC
Weight	8.8		oz.
Charge Pump Frequency	10		kHz

**Figura 58** Características físicas y eléctricas driver Gecko G540

Fuente: Gecko G540 User Manual

### 3.9.2. Diseño del gabinete de control y del panel de controles e indicadores

Para la máquina se pensó en usar un gabinete eléctrico de medidas 40x40x20 cm, el mismo que será ubicado en una de las esquinas de la máquina.



**Figura 59** Ubicación del soporte para el gabinete de control

La finalidad de este gabinete es albergar todos los elementos eléctricos y electrónicos necesarios para el control automático de la máquina, este gabinete cuenta con los elementos básicos necesarios para poder encender, parar y monitorear la máquina cuando esta opere, situados en la puerta del mismo, a excepción del paro de emergencia que se encuentra en su parte superior para tener un accionamiento sencillo en el caso de que se presente una emergencia.

### **3.9.2.1. Diseño del gabinete de control**

En primera instancia, se procede a diseñar el armario de control para conocer la ubicación de los elementos que tiene el mismo.

Dentro de este armario de control se encuentran los siguientes elementos:

- Fuente de alimentación 110 V / 48 V
- Portafusible con su fusible correspondiente
- Riel para ubicación de elementos de control
- Canaletas para protección y guía del cableado
- Driver Gecko G540
- Ventilador para Driver Gecko G540
- Borneras

En la Figura 60 se muestra la ubicación de cada uno de los elementos antes mencionados para el control de la máquina, que se ubican dentro del gabinete de control.



**Figura 60** Ubicación de los elementos de control en el gabinete

La fuente de alimentación por su peso y dimensiones se ubica en la parte inferior del gabinete, el driver se encuentra ubicado en la parte derecha del gabinete ya que de esta forma facilita la conexión de los motores y el cable DB25 puerto paralelo hacia el computador.

Las protecciones se encuentran en la parte superior de las conexiones, para ello se utiliza un portafusibles que se encuentra ubicado en una regleta DIN que asegura su ubicación en el gabinete.

Las canaletas para guía y protección del cableado, se encuentran colocadas en los alrededores del doble fondo del gabinete, y en dos líneas horizontales como se muestra en la Figura anterior, todo esto con el objetivo de facilitar la conexión y tener una correcta organización del cableado teniendo mejor ventilación y evitando interferencias o cortocircuitos.

### **3.9.2.2. Diseño del panel de control e indicadores**

Como se mencionó anteriormente, el HMI (Interfaz Humano Máquina) que se encarga del control de la máquina será el software MACH3, en donde se puede controlar

y programar la máquina para la función requerida, además de que este software permite monitorear el proceso mientras se realiza.

Para ayuda en hardware de este software de control se implementa los siguientes elementos indicadores y de control:

Exterior del gabinete de control:

- Luz piloto verde 110 V
- Luz piloto roja 110 V
- Luz piloto azul 110 V
- Selector ON/OFF
- Paro de emergencia (E-STOP)

Se puede diferenciar dos secciones que son el área de control y el área de indicadores. La de control está formada por el selector ON/OFF y el paro de emergencia (E-STOP), mientras que la de indicadores está formada por las 3 luces piloto mencionadas anteriormente.

La guía GEDIS recomienda el uso de luces de color verde para el encendido de máquina, el color azul para indicar información general del estado de la máquina, el color rojo para alarmas que sean críticas y de paro de emergencia.

Por esta razón cada una de estas luces tiene las siguientes funcionalidades:

- Luz piloto verde: mostrar cuando el sistema se encuentra energizado.
- Luz piloto roja: mostrar cuando el sistema se encuentra en un estado de paro de emergencia por algún problema en el proceso.

- Luz piloto azul: mostrar cuando la máquina se encuentre en un proceso de corte.

Cabe mencionar que el botón paro de emergencia es la parte más importante de esta sección para control de la máquina, es por ello que debe estar ubicado de manera que sea de fácil acceso, accionamiento y visualización, con el fin de disminuir el tiempo de reacción del usuario u operador de la máquina en un situación de emergencia.

### 3.9.3. Caída de tensión, selección de cables y protecciones

Primeramente, se calcula el calibre de los cables a usar en el gabinete de control, para ello se debe considerar las caídas de tensión presentes en las líneas del circuito, se procede de la siguiente manera:

$$AV = \frac{V * \% \Delta V}{100} \quad (\text{Ec. 3. 31})$$

Donde:

$AV$ : Caída de tensión máxima admisible en la línea [V]

$V$ : Tensión nominal en la línea [V]

$\Delta V$ : Caída de tensión permitida en la línea [%V]

Con este valor se procede a calcular el área transversal del cable conductor para estas líneas de la siguiente forma:

$$A = \frac{2 * \rho * I * L}{AV} \quad (\text{Ec. 3. 32})$$

Donde:

$AV$ : Caída de tensión máxima admisible en la línea [V]

$A$ : Área transversal del cable conductor [mm<sup>2</sup>]

$\rho$ : Resistividad del cable conductor [ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ]

$I$ : Intensidad de corriente en la línea [A]

$L$ : Longitud total del conductor, desde la alimentación al nodo más lejano del circuito. [m]

Con el área transversal del cable conductor, se procede a seleccionar el calibre del mismo, basado en la Figura 61:

AWG	Sección aprox.en mm <sup>2</sup>	Diámetro(mm)	AWG	Sección aprox.en mm <sup>2</sup>	Diámetro(mm)
38	0,0080	0,10	4	21,20	5,20
36	0,0217	0,13	2	33,60	6,54
34	0,0201	0,16	1	42,20	7,35
30	0,0509	0,25	1/0	53,30	8,25
28	0,0810	0,32	2/0	67,40	9,26
26	0,1290	0,40	3/0	85,00	10,4
24	0,2050	0,51	4/0	107,00	11,7
22	0,3260	0,64	250	127,00	12,7
20	0,5180	0,81	300	152,00	13,9
18	0,8230	1,02	350	177,00	15,0
16	1,3100	1,29	400	203,00	16,1
14	2,0800	1,63	500	253,00	17,9
12	3,3100	2,05	600	304,00	19,7
10	5,2600	2,59	700	354,00	21,2
8	8,3700	3,26	750	380,00	22,0
6	13,30	4,12	800	405,00	22,7

**Figura 61** Área transversal y diámetros de cable según su calibre

Fuente: Electro Cables C.A.

### 3.9.3.1. Caída de tensión en el circuito de potencia

Es importante para calcular esta caída de tensión conocer los elementos que forman parte del circuito de potencia, que son los siguientes:

- 3 luces piloto de 110 V y 20 mA
- Fuente de alimentación de 600 W
- Ventilador para refrigeración 25 W

Estas cargas se encuentran conectadas en paralelo por lo que se deben sumar, para ello se calcula la potencia de las luces piloto:

$$P = V * I = 110 * 0.02 = 2.2 [W]$$

Es decir que para las 3 luces piloto se tiene:

$$P = 3 * 2.2 = 6.6 [W]$$

De donde la potencia total del circuito sería:

$$P_T = 6.6 + 600 + 25 = 631.6 [W]$$

Con esto y asumiendo que se debe tener una caída máxima de tensión del 5% en las líneas de todo el circuito para que se tenga un correcto funcionamiento de la máquina y no se presenten fallos o apagones súbitos en la misma, se calcula la caída de tensión máxima admisible para esta línea considerando un 1.5% de caída de tensión en la misma:

$$AV = \frac{110 * 1.5}{100} = 1.65 [V]$$

Se considera una longitud total del circuito aproximada de 10 m, se procede a calcular la corriente y el área del cable conductor en la línea:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{631.6}{110} = 5.742 [A]$$

$$A = \frac{2 * 0.01724 * 5.742 * 10}{1.65} = 1.2 [mm^2]$$

Con esta área de sección transversal y basándose en la Figura 56 se selecciona un cable de calibre AWG 16 cuya sección es de 1.31 mm<sup>2</sup>, y así obtenemos la caída de tensión real:

$$AV = \frac{2 * 0.01724 * 5.742 * 10}{1.31} = 1.511 [V]$$

$$\% \Delta V = \frac{AV * 100}{V} = \frac{100 * 1.511}{110} = 1.37\%$$



### 3.9.3.2. Caída de tensión en el circuito de control

De la misma forma que para el circuito de potencia es importante para calcular esta caída de tensión conocer los elementos que forman parte del circuito, en lo que se tiene:

- Driver Gecko G540 con sus respectivas salidas

$$P = V * I = 48 * 0.3 = 14 [W]$$

Este valor es el calculado por pin, es decir que la potencia total sería de:

$$P_T = 14 * 12 = 168 [W]$$

Se calcula la caída de tensión máxima admisible para esta línea considerando un 1% de caída de tensión en la misma:

$$AV = \frac{48 * 1}{100} = 0.48 [V]$$

Se considera una longitud total del circuito aproximada de 5 m, se procede a calcular la corriente y el área del cable conductor en la línea:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{168}{48} = 3.5 [A]$$

$$A = \frac{2 * 0.01724 * 3.5 * 5}{0.48} = 1.257 [mm^2]$$

Con esta área de sección transversal y basándose en la Figura 56 se selecciona un cable de calibre AWG 16 cuya sección es de 1.31 mm<sup>2</sup>, con esto obtenemos la caída de tensión real:

$$AV = \frac{2 * 0.01724 * 3.5 * 5}{1.31} = 0.46 [V]$$

$$\% \Delta V = \frac{AV * 100}{V} = \frac{100 * 0.46}{48} = 0.96\%$$

### 3.9.3.3. Caída de tensión en el circuito de los motores

Para ello se analiza con el motor que se encuentra a una mayor distancia del driver, es decir de longitud de cable mayor, en este caso es el motor del eje X, cuya longitud es de 3.5 m aproximadamente, sabiendo además que cada uno de los motores tienen un voltaje de funcionamiento de 2.55 [V] a una corriente de 3.5 [A] dados en la hoja de datos de los mismos, es decir:

$$P = V * I = 2.55 * 3.5 = 8.925 [W]$$

$$P_T = 8.925 + 14 * 12 = 176.925$$

Se calcula la caída de tensión máxima admisible para esta línea considerando un 1% de caída de tensión en la misma:

$$AV = \frac{48 * 1}{100} = 0.48 [V]$$

Se considera una longitud total del circuito aproximada de 3.5 m, se procede a calcular la corriente y el área del cable conductor en la línea:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{176.925}{48} = 3.69 [A]$$

$$A = \frac{2 * 0.01724 * 3.69 * 3.5}{0.48} = 0.927 [mm^2]$$

Con esta área de sección transversal y basándose en la Figura 56 se selecciona un cable de calibre AWG 16 cuya sección es de 1.31 mm<sup>2</sup>, con esto obtenemos la caída de tensión real:

$$AV = \frac{2 * 0.01724 * 3.69 * 3.5}{1.31} = 0.34 [V]$$

$$\% \Delta V = \frac{AV * 100}{V} = \frac{100 * 0.46}{48} = 0.96\%$$

### 3.9.3.4. Elementos de protección: Fusible para motores

Debido a la tensión de alimentación de 110 V aproximadamente que se tiene se seleccionó fusibles tipo gG de baja tensión que deben cumplir con las siguientes especificaciones según la norma IEC 292-2:

- Deben soportar un 110% de la corriente nominal en forma permanente.
- Se usan cuando la corriente nominal varía entre 0 y 60 A
- Protegen contra cortocircuitos y contra las sobrecargas a los circuitos con picos de corriente poco elevados.
- Son de 0-60 A y 300V, de dimensiones pequeñas para uso en equipos electrónicos, instrumentos de medidas, etc.

Para el dimensionamiento de estos fusibles se tiene dos condiciones, UNE 20460:

Condición 1:

$$I_B \leq I_N \leq I_z \quad (\text{Ec. 3. 33})$$

Donde:

$I_B$ : Corriente nominal del circuito a proteger

Para el caso de la máquina cortadora de Plasma se tiene una corriente nominal o a plena carga máxima de 3.5 A por motor, considerando el funcionamiento simultáneo de los 4 actuadores, de donde:

$$I_B = 4 \times 3.5 = 12.5 \text{ A}$$

$I_z$ : Corriente máxima admisible del conductor protegido

Considerando el uso de un alambre calibre AWG 16 de sección 1.31 mm<sup>2</sup> con una corriente admisible de 19A.

$I_N$ : Corriente nominal del dispositivo de protección

Los valores normalizados de los fusibles se muestran en la Tabla 34:

**Tabla 34**  
*Intensidades Nominales Normalizadas de los fusibles*

2	4	6	10	16	20	25	35
40	50	63	80	100	125	160	200
250	315	400	425	500	630	800	1000

Se selecciona un fusible con corriente nominal 16A y se verifica la condición 1:

$$12.5A \leq 20A \leq 24A$$

Con lo que se verifica el cumplimiento de esta condición para un fusible de 20A.

Condición 2:

Se debe verificar que:

$$I_F \leq 1.45I_Z \quad (\text{Ec. 3. 34})$$

Esta expresión determina que los cables eléctricos pueden soportar sobrecargas transitorias y no permanentes de hasta un 145% sin deteriorarse.

$I_F$ : Corriente que garantiza el funcionamiento efectivo de la protección. Esta corriente se obtiene de la Tabla 35:

**Tabla 35**  
*Corriente convencional de fusión fusibles*

$I_n$ [A]	Tiempo convencional [h]	$I_f$ [A]
$I_n \leq 4$	1	$2.1I_n$
$4 \leq I_n \leq 16$	1	$1.9I_n$
$16 \leq I_n \leq 63$	1	$1.6I_n$
$63 \leq I_n \leq 160$	2	$1.6I_n$
$160 \leq I_n \leq 400$	3	$1.6I_n$
$400 \leq I_n$	4	$1.6I_n$

$I_Z$ : Corriente máxima admisible del conductor protegido.

De donde se tiene que para este caso la corriente nominal del fusible escogido está en el intervalo de [16-63] A por lo que tiene una corriente:

$$I_F = 1.6I_n = 1.6(20) = 32 \text{ A}$$

$$I_F \leq 1.45I_Z$$

$$32 \leq 1.45(24)$$

$$32 \leq 34.8$$

Por lo que con esto se verifica las dos condiciones asegurando un correcto funcionamiento de la protección con un fusible de 20 A.

### **3.9.3.5. Elementos de protección: Fusible para fuente de alimentación**

Para el dimensionamiento de estos fusibles se debe verificar las dos condiciones que se mostró en la sección 3.9.3.4:

#### Condición 1:

La corriente nominal de la fuente empleada es de 12.5A a 110 V de entrada.

$$I_B = 12.5 \text{ A}$$

Considerando el uso de un alambre calibre AWG 16 de sección 1.31 mm<sup>2</sup> con una corriente admisible de 24A.

Los valores normalizados de los fusibles se muestran en la Tabla 34:

Se selecciona un fusible de la Tabla 34 con corriente nominal de 16A y se verifica la condición 1:

$$12.5A \leq 16A \leq 24A$$

Con lo que se verifica el cumplimiento de esta condición para un fusible de 16A.

Condición 2:

De la Tabla 35 se tiene que la corriente nominal del fusible escogido está en el intervalo de [16-63] A por lo que tiene una corriente:

$$I_F = 1.6I_n = 1.6(16) = 25.6 A$$

$$I_F \leq 1.45I_z$$

$$25.6 \leq 1.45(24)$$

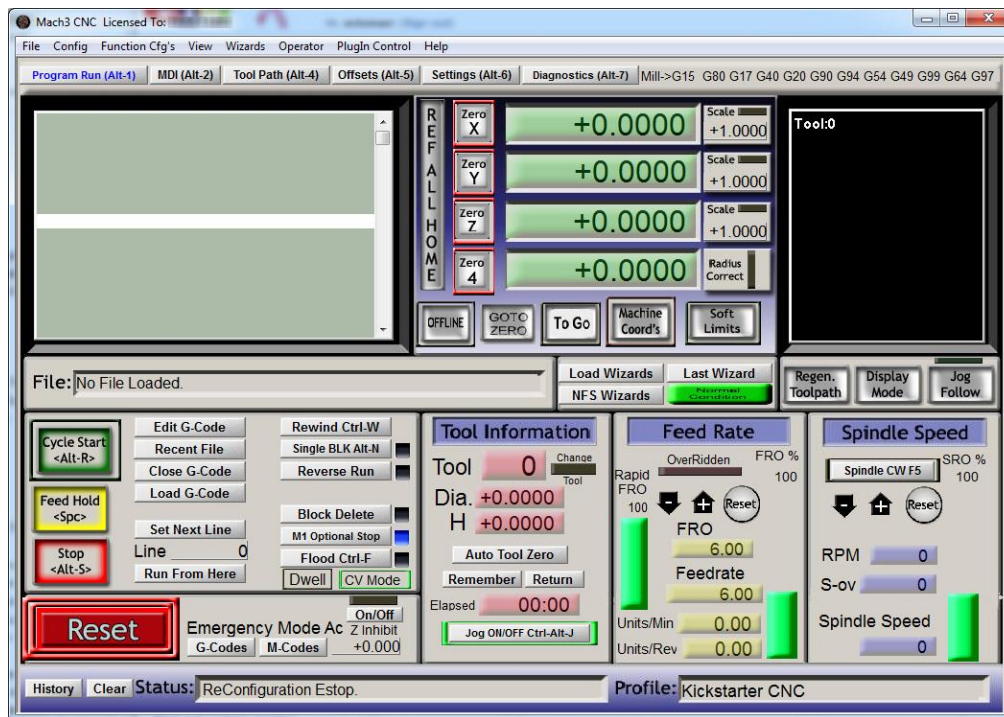
$$25.6 \leq 34.8$$

Por lo que con esto se verifica las dos condiciones asegurando un correcto funcionamiento de la protección con un fusible de 16 A.

**3.10. Software de control MACH3**

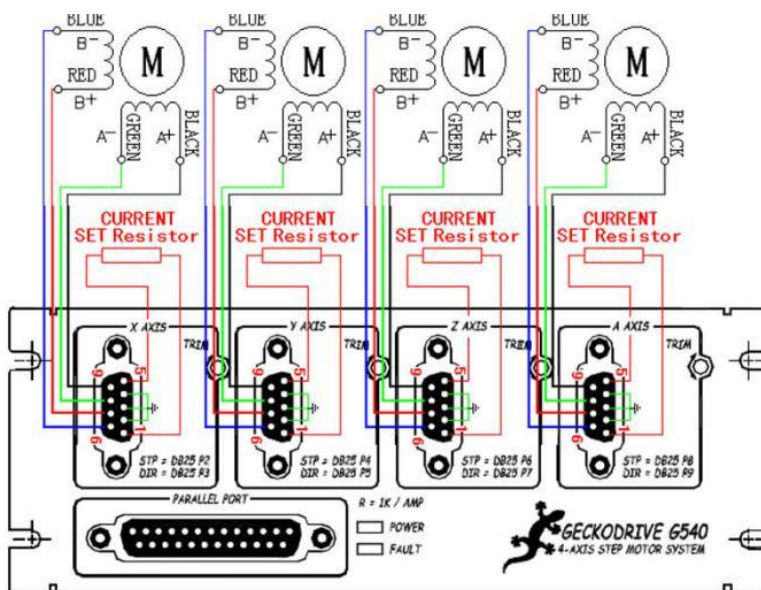
En esta sección, se explica de manera general el funcionamiento y comunicación del driver Gecko G540 y el software de control Mach3.

Mach3 es un paquete de software, que funciona en un computador de preferencia Windows XP o 7, cuyo objetivo es hacer de controlador de una máquina, siendo este rápido y económico. Este software de control se caracteriza por utilizar puerto paralelo (de impresora DB25) para su comunicación o por medio de un puerto serial (COM). Cabe mencionar que existen adaptaciones de puerto paralelo a USB, sin embargo es importante verificar que dicho adaptador tenga el controlador apropiado para esta comunicación.



**Figura 62** Pantalla principal software Mach3

Este software envía una señal de pulsos mediante el puerto paralelo al driver con condiciones de: paso, velocidad y de dirección; es por esta razón que el driver que se seleccione debe tener la capacidad de recibir señales de este tipo. La configuración para la máquina cortadora de plasma se tiene más detalladamente en el Anexo 4.



**Figura 63** Diagrama de conexión de motores y resistencia de corriente

### 3.10.1 Pruebas para disipación de calor para driver Gecko G540

**Tabla 36**

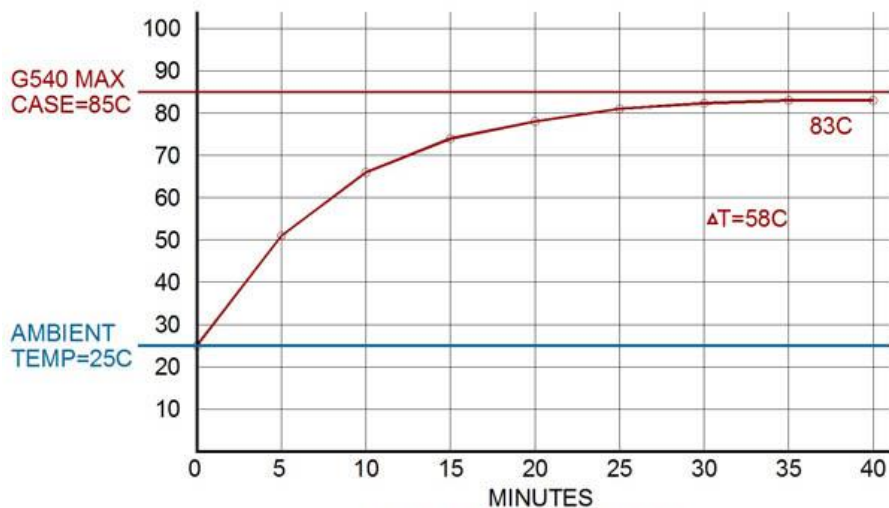
*Prueba 1*

<b>G540 CONFIGURACIÓN</b>	<b>REV4 G540 sin disipador de calor adicional</b>
<b>RESISTENCIAS DE AJUSTE ACTUAL</b>	3.48K Resistencias de 1%
<b>MOTORES</b>	Cuatro 3.5A Keling NEMA-23 (KL23H284-35-4B)
<b>FUENTE DE ALIMENTACIÓN</b>	48VDC no regulado 9.3A
<b>PASO FUENTE DE PULSO</b>	Salida del generador de funciones para cuatro revoluciones por segundo
<b>VENTILADOR UTILIZADO</b>	Ninguno

La presente prueba se la realizo sin añadir un disipador de calor ni ventilador al driver Gecko G540, y cuatro motores en funcionamiento, para la obtención de datos, se conectó un termopar entre la caja metálica del Gecko G540 y un aislante. Se tomó lecturas cada 5 minutos de la temperatura, hasta que el cambio de temperatura entre las lecturas sea menor o igual a 1° C, por lo que se consideró una temperatura estable. El grafico de la prueba 1 se muestra en la (Ver Figura 64), teniendo en cuenta, como límite



inferior la temperatura ambiente, y como límite superior la temperatura máxima que soporta la cubierta metálica, establecida por el fabricante.



**Figura 64** Gráfica Tiempo vs Temperatura (Prueba 1)

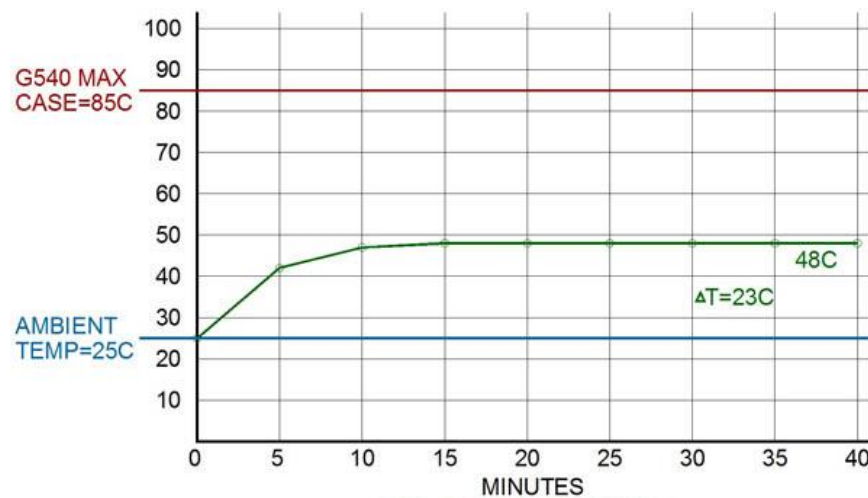
Se concluye que aun con la ausencia de algún tipo de disipación de calor, la temperatura del Driver no supera a la temperatura máxima establecida por el fabricante. Por lo cual, el Driver, funcionaría correctamente, teniendo en cuenta que se encuentra muy cercano al límite superior, lo cual no es recomendable.

**Tabla 37**  
Prueba 2

<b>G540 CONFIGURACIÓN</b>	<b>REV4 G540 con disipador térmico de la CPU</b>
<b>RESISTENCIAS DE AJUSTE ACTUAL</b>	3.48K Resistencias de 1%
<b>MOTORES</b>	Cuatro 3.5A Keling NEMA-23 (KL23H284-35-4B)
<b>FUENTE DE ALIMENTACIÓN</b>	48VDC no regulado 9.3A
<b>PASO FUENTE DE PULSO</b>	Salida del generador de funciones para cuatro revoluciones por segundo
<b>VENTILADOR UTILIZADO</b>	Disipador de calor Intel Celeron CPU con 12VDC 90mA ventilador a bordo

La presente prueba se la realizo añadiendo un disipador de calor con ventilador abordo al driver Gecko G540, y cuatro motores en funcionamiento, para la obtención de

datos, se conectó un termopar entre la caja metálica del Gecko G540 y un aislante. Se tomó lecturas cada 5 minutos de la temperatura, hasta que el cambio de temperatura entre las lecturas sea menor o igual a  $1^{\circ}\text{C}$ , por lo que se consideró una temperatura estable. El gráfico de la prueba 1 se muestra en la (Ver Figura 65), teniendo en cuenta, como límite inferior la temperatura ambiente, y como límite superior la temperatura máxima que soporta la cubierta metálica, establecida por el fabricante.



**Figura 65** Gráfica Tiempo vs Temperatura (Prueba 2)

Se concluye que al añadir un disipador de calor conjuntamente a un ventilador, la temperatura a la que se estabiliza es de  $48^{\circ}\text{C}$ , y como se puede observar en la (Ver Figura 65), es un temperatura mucho menos a la temperatura máxima establecida por el fabricante, por lo cual no se posee riesgos de falla del Driver, ya que a diferencia de la configuración de la PRUEBA 1, dicha temperatura se encuentra muy lejana al límite superior.

En conclusión, para un trabajo óptimo, y sin riesgos de sobre calentamiento del Driver, es necesario acoplar un disipador de calor y una fuente de ventilación a dicho

dispositivo, ya que, de no ser así, se corre el riesgo de sobrecalentamiento y como consecuencia un mal funcionamiento de todo el sistema.

### **3.11. Construcción e instalación de la máquina**

En esta sección se describe de una manera general, el procedimiento para la implementación y ensamble de la máquina tanto en su sistema mecánico, eléctrico y electrónico.

#### **3.11.1. Construcción de elementos del sistema mecánico**

##### **3.11.1.1. Construcción de la estructura de soporte**

La estructura está formada por tubo cuadrado de 50x50x3mm de acero estructural ASTM A36, sus dimensiones totales son 1.5x1.5x1m la cual fue desarrollada en el laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Esta estructura se muestra en la Figura 66 e incluye para su construcción procesos de corte, taladrado, limado, soldadura, entre otros.



**Figura 66** Estructura de soporte máquina cortadora de plasma

### 3.11.1.2. Construcción bandejas para cama de agua

La estructura presenta en su parte inferior, espacios cuyo objetivo es albergar bandejas para cama de agua, las mismas que deben ser fáciles de retirar de la máquina para ello, poseen guías que facilitan su desplazamiento, estas guías están hechas de perfiles de acero ASTM A36 en forma de T, cuyas dimensiones son 30x30x3mm.

De la misma forma que para la estructura de la sección anterior para estas bandejas que se muestran en la Figura 67 y 68 se emplearon diferentes procesos, entre ellos: limado, corte, soldadura SMAW y por puntos, doblado, entre otros.



**Figura 67** Proceso de pintado en las bandejas para cama de agua



**Figura 68** Proceso de soldadura por puntos en las bandejas para cama de agua

### **3.11.1.3. Construcción de elementos guía para el movimiento lineal**

Para tener un movimiento lineal y coordinado con los motores, se diseñó carros de desplazamiento formados con rodamientos lineales de dimensiones, 22x8x6mm, para estos elementos fueron necesarios procesos de: corte por plasma, taladrado, fresado, soldadura, entre otros.

Para el eje X se necesitan 2 carros de desplazamiento, mientras que para el eje Y solamente es necesario de 1, estos carros a su vez, están diseñados para sujetar a los motores de los ejes de la máquina como se muestra en las Figuras 69 y 70:



**Figura 69** Proceso de fresado en placas para carros de desplazamiento



**Figura 70** Carros de desplazamiento fabricados



#### 3.11.1.4. Construcción de elementos de transmisión

Para el sistema de transmisión, se utilizó piñón – cremallera, para la construcción de los mismos, se tiene:

- Piñón: el material empleado para el mismo es bronce, y su manufactura fue realizada en la máquina CNC Fadal del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, sus dimensiones son las siguientes:
  - Diámetro exterior: 30 mm
  - Diámetro eje: 1/4"
  - Número de dientes: 18
  - Módulo: 1.5



**Figura 71** Proceso de fresado para manufactura de piñones



**Figura 72** Piñones fabricados

- Cremallera: el material empleado para este elemento es acero ASTM A36 bajo un proceso de templado en su superficie, de la misma forma que los piñones su manufactura fue realizada en la máquina CNC Fadal del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, sus dimensiones son las siguientes:
  - Longitud: 3 cremalleras de 1.2 m
  - Módulo: 1.5
  - Número de dientes: 135 aprox.



**Figura 73** Proceso de manufactura para cremalleras





**Figura 74** Proceso de manufactura con machuelo para cremalleras



**Figura 75** Cremalleras fabricadas con proceso de lijado superficial

### 3.11.1.5. Construcción de elementos para el movimiento del eje Z

Para este eje, su transmisión se la realizó con un tornillo sin fin, teniendo un desplazamiento más preciso. Para la sujeción de este eje en la máquina se construyeron varias piezas que se muestran a continuación, tanto para la sujeción de los ejes guías del mismo, así como para la sujeción del motor que será el actuador para este eje. De la misma forma este eje cuenta con una placa cuyo objetivo es sujetar el efector final que en este caso es la pistola para corte por plasma de la máquina, para este elemento que se muestra en las Figuras 76 y 77, se emplearon procesos de corte por plasma, taladrado, machuelo, soldadura, rectificado, torneado, roscado, entre otros.



**Figura 76** Trazado para proceso de machuelo en elementos del eje Z



**Figura 77** Proceso de soldadura para la sujeción del eje Z

### **3.11.2. Implementación de componentes**

#### **3.11.2.1. Implementación de componentes mecánicos**

Para el ensamblaje de estos componentes, se requiere adquirir elementos como, eje roscado, rodamientos de bolas 22x8x6mm, pernos, tuercas, arandelas, arandelas de presión, tornillos.

El primer procedimiento para el ensamblaje de los elementos mecánicos corresponde a la ubicación de las cremalleras en la estructura de soporte, como se muestra en la Figura 78:



**Figura 78** Ubicación de cremallera en el eje X

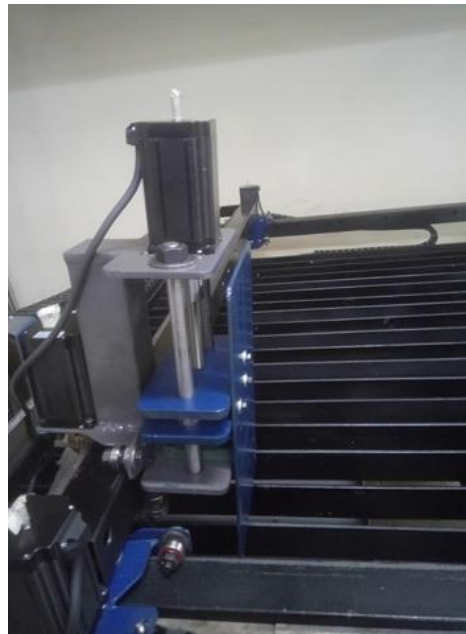
Una vez ubicadas las cremalleras en cada uno de los tubos correspondientes, se procede a ensamblar y colocar los carros de desplazamiento con sus respectivos motores y elementos adicionales como se muestra en la Figura 79, 80 y 81:



**Figura 79** Ensamblaje y ubicación de carros de desplazamiento



**Figura 80** Ensamblaje y ubicación motores y guías de desplazamiento



**Figura 81** Ensamblaje y ubicación motores y guías de desplazamiento eje Z

A continuación se ingresa las bandejas mencionadas antes, para cama de agua, en la estructura como se observa en la Figura 82:



**Figura 82** Ubicación bandejas para cama de agua

### 3.11.2.2. Implementación de componentes eléctricos y electrónicos

A continuación se procede a instalar los componentes eléctricos y electrónicos calculados previamente, de los cuales se tiene, fuente de alimentación, driver, canaletas, riel DIN 3, ventilador, luces piloto, selector ON/OFF, paro de emergencia, cableado, fines de carrera, entre otros.

Todo esto se muestra en las Figuras 83, 84 y 85:



**Figura 83** Ubicación portafusibles en riel DIN gabinete de control





**Figura 84** Ubicación driver y ventilador en el gabinete de control



**Figura 85** Ubicación fuente de alimentación y canaletas en gabinete de control

### 3.12. Presupuesto de la máquina

A continuación en la Tabla 38, se muestra los costos de diseño e implementación de la máquina cortadora por plasma:

**Tabla 38**  
*Presupuesto máquina cortadora por plasma*

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Perfiles en L 6 metros 25x25 mm espesor 3 mm	6	\$10.48	\$62.88
2	Material para Cremallera 15x15 mm 15 mm espesor	2	\$9.59	\$19.18
3	Material para piñón bronce fosfórico 50 cm de largo 35 mm de diámetro	1	\$50.00	\$50.00
4	Tubo Estructural Acero 6 metros 50x50 mm 3 mm espesor	4	\$23.40	\$93.60
5	Plancha de Tol 1,4 mm de espesor 2,4x1,2 metros	2	\$31.60	\$63.20
6	Platina acero A36 50x6 mm 6 metros	5	\$18.25	\$91.25
7	Rodamientos 8mm diámetro interno y externo 22 mm	19	\$1.50	\$28.50
8	Finales de carrera	4	\$1.50	\$6.00
9	Insumos de sujeción (Pernos)	1	\$30.00	\$30.00
10	Motor NEMA 23	4	\$59.90	\$239.60
11	Fresas y Brocas	1	\$50.00	\$50.00
12	Corte Plasma	1	\$65.00	\$65.00
13	Driver Motor paso a paso CNC	1	\$415.00	\$415.00
14	Fuente de poder 48 VDC	1	\$99.00	\$99.00
15	Interfaz para PC DB25 puerto paralelo (Incluye cable de conexión)	1	\$8.00	\$8.00
16	Cadena porta cables 1 metro	4	\$10.00	\$40.00
17	Gabinete Eléctrico de control	1	\$46.92	\$46.92
18	Elementos gabinete eléctrico	1	\$41.15	\$41.15
19	Diseño del sistema mecatrónico costo por hora	160	\$8.00	\$1,280.00
20	Implementación del sistema mecatrónico costo por hora	320	\$5.00	\$1,600.00
			<b>Total</b>	<b>\$4,329.28</b>



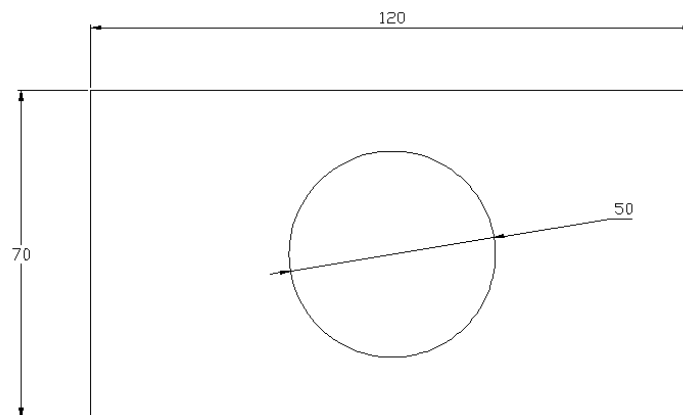
## CAPÍTULO IV

### PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. Control estadístico de procesos

El fin de este control estadístico de procesos, es verificar si un proceso está o no controlado adecuadamente de manera estadística. Para ello dicho proceso incluye el análisis de variables relacionadas entre sí, como son la media y la desviación estándar de un grupo de datos obtenidos como resultados de pruebas en la máquina.

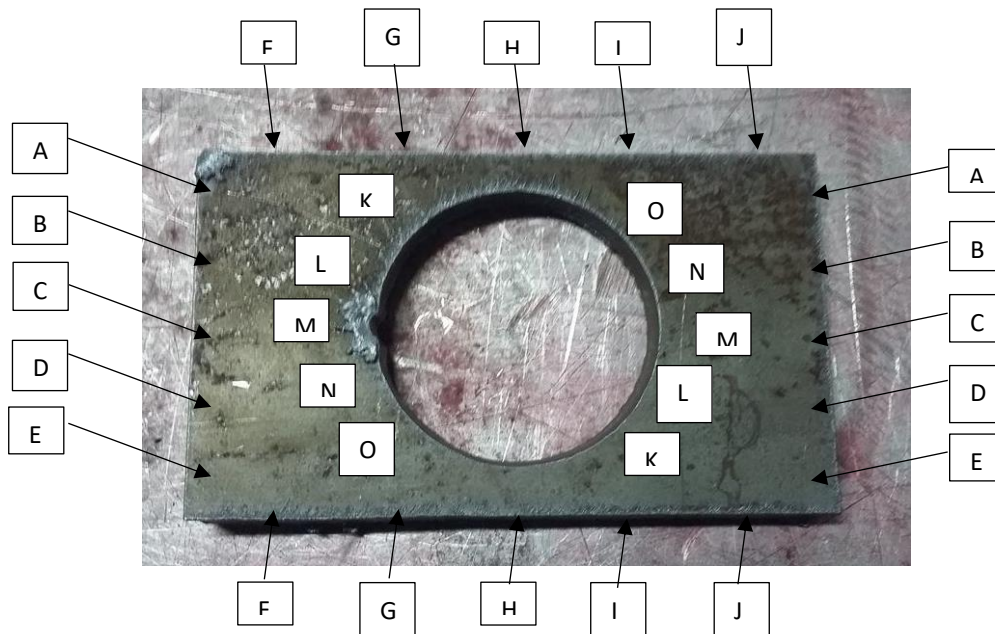
Para las pruebas realizadas se toma como referencia el siguiente modelo de referencia Figura 86, para el cual se tomaron medidas de longitud, y diámetro para verificar la precisión de cada uno de los ejes de movimiento de la máquina.



**Figura 86** Modelo de referencia para control estadístico de procesos

En la Figura 87 se muestra, el material cortado con la máquina implementada, de acuerdo al modelo de referencia mostrado en la Figura 86, cabe mencionar que para este corte se utilizó los siguientes parámetros de corte:

- Velocidad de avance para corte: 850 [mm/min]
- Intensidad de corriente en la máquina: 50 [A]
- Presión de aire de la máquina: 80-85 [PSI]



**Figura 87** Prueba de corte realizada con la máquina implementada

Para las mediciones del control estadístico se realizaron 25 pruebas en grupos

de 5 como se muestra en la Tabla 39:

**Tabla 39**

*Mediciones para control estadístico de la muestra de referencia*

EJE X (LONGITUD mm)	
MEDICIÓN	DISTANCIA
M1	A-A
M2	B-B
M3	C-C
M4	D-D
M5	E-E
EJE Y (ALTURA mm)	
MEDICIÓN	DISTANCIA
M1	F-F
M2	G-G
M3	H-H
M4	I-I
M5	J-J
DIÁMETRO	
MEDICIÓN	DISTANCIA
M1	K-K
M2	L-L

CONTINÚA



<b>M3</b>	M-M
<b>M4</b>	N-N
<b>M5</b>	O-O

#### 4.1.1. Control estadístico de procesos Eje X

La medida teórica para este eje, es de 120 mm, mientras que las medidas experimentales son las que se muestran en la Tabla 40:

**Tabla 40**  
*Medidas experimentales para carta de control eje X*

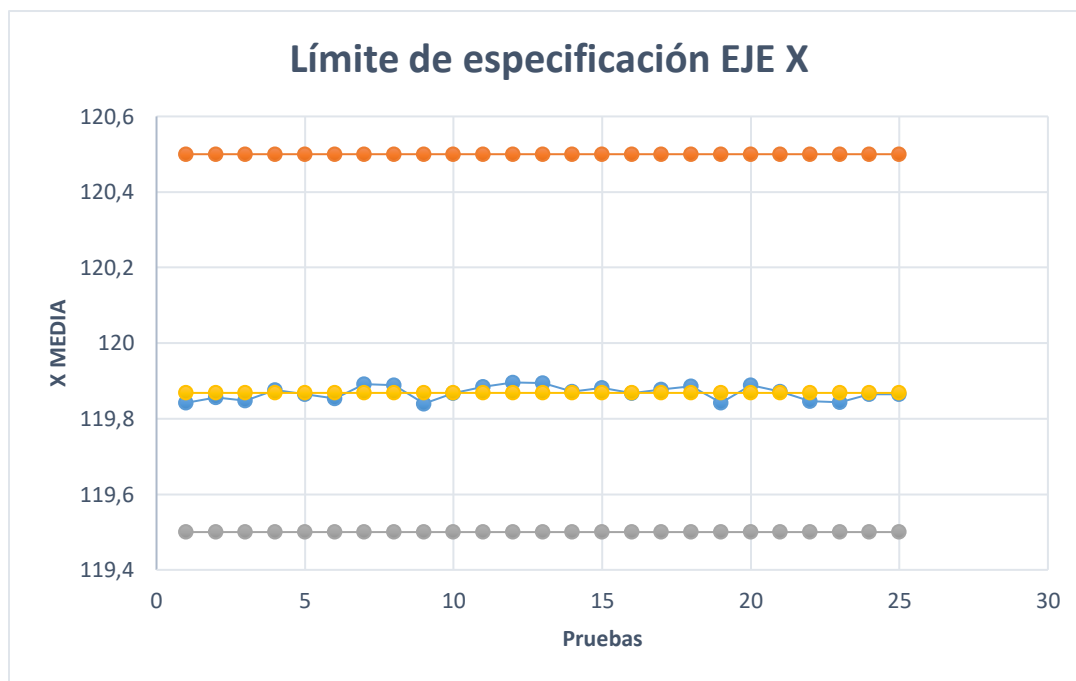
EJE X (LONGITUD mm)							
PRUEBA	M1	M2	M3	M4	M5	X(MEDIA)	s (DESVIACIÓN ESTÁNDAR)
1	119,83	119,85	119,81	119,88	119,84	119,842	0,026
2	119,86	119,85	119,86	119,84	119,87	119,856	0,011
3	119,84	119,85	119,83	119,87	119,85	119,848	0,015
4	119,87	119,88	119,89	119,88	119,86	119,876	0,011
5	119,85	119,87	119,87	119,85	119,88	119,864	0,013
6	119,85	119,87	119,88	119,85	119,82	119,854	0,023
7	119,89	119,88	119,90	119,87	119,88	119,884	0,011
8	119,91	119,90	119,88	119,85	119,89	119,886	0,023
9	119,85	119,84	119,84	119,81	119,87	119,842	0,022
10	119,88	119,85	119,85	119,85	119,89	119,864	0,020
11	119,87	119,90	119,90	119,89	119,88	119,888	0,013
12	119,92	119,94	119,94	119,85	119,87	119,904	0,042
13	119,85	119,89	119,89	119,90	119,96	119,898	0,040
14	119,84	119,89	119,89	119,91	119,85	119,876	0,030
15	119,89	119,91	119,91	119,88	119,88	119,894	0,015
16	119,87	119,90	119,90	119,85	119,83	119,870	0,031
17	119,88	119,90	119,90	119,85	119,92	119,890	0,027
18	119,89	119,90	119,90	119,88	119,91	119,896	0,011
19	119,81	119,85	119,85	119,88	119,83	119,844	0,026
20	119,92	119,88	119,88	119,84	119,93	119,890	0,036
21	119,89	119,90	119,90	119,84	119,85	119,876	0,029
22	119,85	119,81	119,81	119,86	119,88	119,842	0,031
23	119,82	119,83	119,83	119,85	119,84	119,834	0,011
24	119,86	119,83	119,83	119,85	119,88	119,850	0,021
25	119,86	119,86	119,86	119,84	119,85	119,854	0,010
						119,869	0,022

De la Tabla 40, se puede observar el promedio de media de longitud ( $\bar{X}$ ) y el promedio de la desviación estándar:

$$\bar{X} = 119.869 [mm]$$

$$\bar{s} = 0.022 [mm]$$

En la Figura 88, se muestra los valores de media obtenidos en las mediciones y los límites de especificación para el eje X considerando por requerimientos de diseño un error no mayor a 0.5 mm.



**Figura 88** Límite de especificación eje X

En Tabla 41 se muestran las respectivas constantes para cartas de control, teniendo en cuenta que las mediciones se realizaron en grupos de 5. De donde las constantes son las siguientes para este proceso:

- $A_3$ : 1.427 (Factor para límites de control de la Media)
- $C_4$ : 0.94 (Divisor para la estimación de la desviación estándar)

- B<sub>3</sub>: 0 (Factor para límites de control de la desviación estándar)
- B<sub>4</sub>: 2.089 (Factor para límites de control de la desviación estándar)

**Tabla 41**

*Modelo de referencia para control estadístico de procesos*

<b>Cartas para <math>\bar{X}</math> y s</b>				
<b>Tamaño del subgrupo</b>	Carta para medias ( $\bar{X}$ )	Cartas para desviación estándar (s)		
	Factores para límites de control	Divisores para estimación de desviación estándar	Factores para límites de control	
<b>n</b>	A <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>
<b>2</b>	2.659	0.7979	-	3.267
<b>3</b>	1.954	0.8862	-	2.568
<b>4</b>	1.628	0.9213	-	2.266
<b>5</b>	1.427	0.9400	-	2.089
<b>6</b>	1.287	0.9515	0.030	1.970
<b>7</b>	1.182	0.9594	0.118	1.882
<b>8</b>	1.099	0.9650	0.185	1.815
<b>9</b>	1.032	0.9693	0.239	1.761
<b>10</b>	0.975	0.9727	0.284	1.716

Con estas constantes seleccionadas, se procede a calcular los límites de control para las cartas de control, de la siguiente manera:

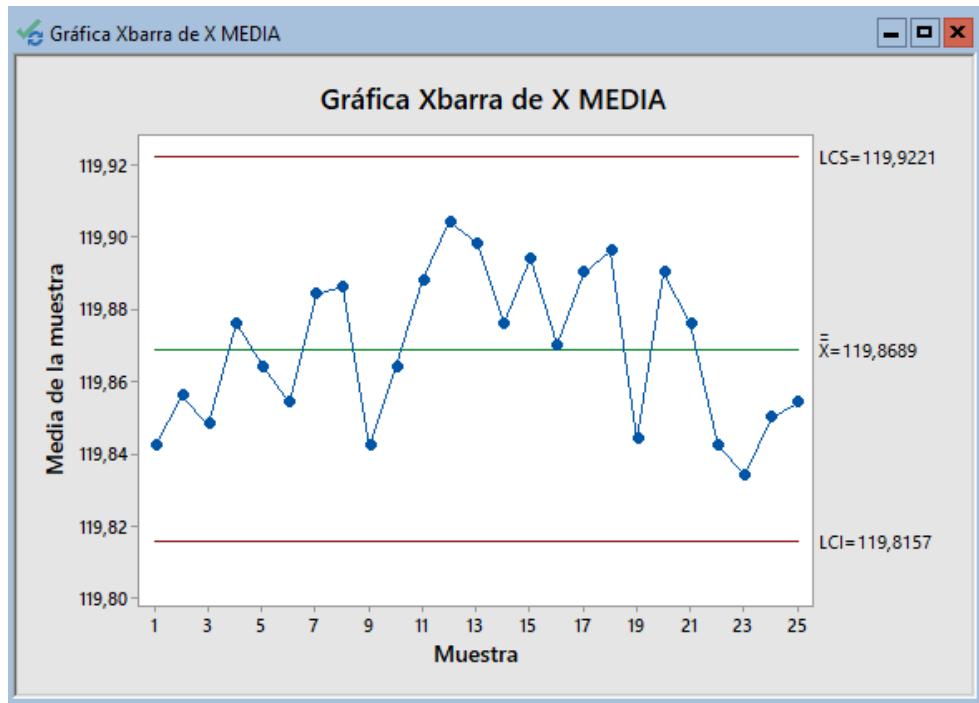
$$LCS_x = \bar{X} + (A_3 * \bar{s}) = 119.869 + (1.427 * 0.018) = 119.922$$

$$LCI_x = \bar{X} - (A_3 * \bar{s}) = 119.869 - (1.427 * 0.018) = 119.816$$

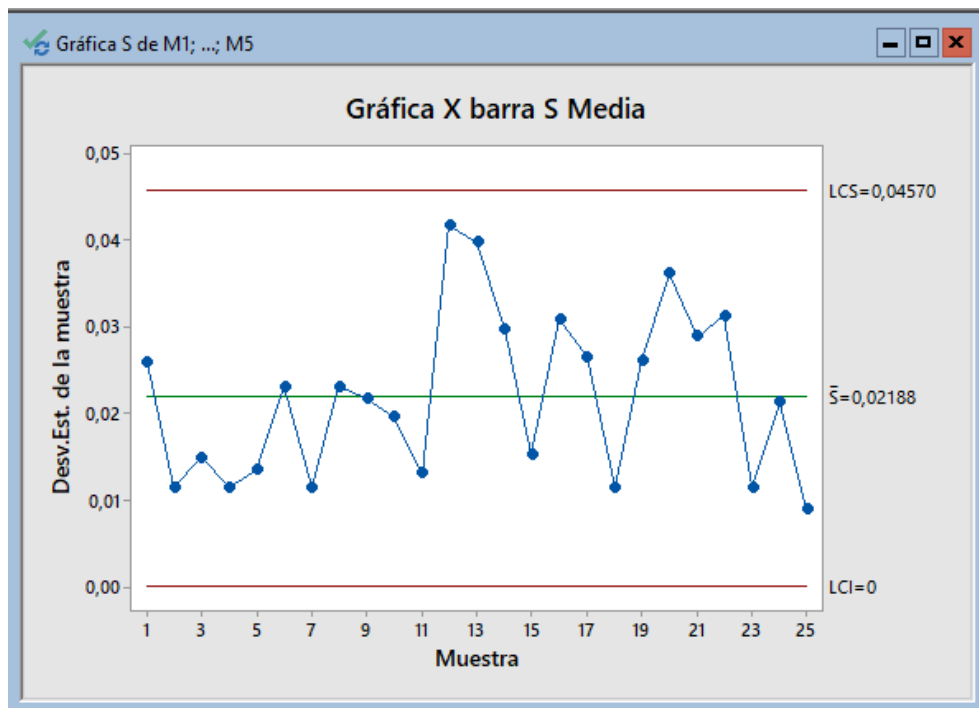
$$LCS_s = B_4 * \bar{s} = 2.089 * 0.018 = 0.038$$

$$LCI_s = B_3 * \bar{s} = 0 * 0.018 = 0$$

Una vez realizado estos cálculos, se obtiene las gráficas correspondientes a la carta de control de media y de desviación estándar del eje X, que se muestra en las Figuras 89 y 90:



**Figura 89** Gráfica de control X media Eje X



**Figura 90** Gráfica de control s media Eje X

Como se observa en ambas cartas de control, la línea de dispersión de los datos experimentales está dentro de sus límites de control correspondientes, por lo cual se puede concluir que el proceso se encuentra en control estadístico.

Adicionalmente, en la Figura 91 se puede observar el control estadístico en resumen para el proceso del eje X, en donde se observa la capacidad de control de dicho proceso, se puede ver que los puntos de dispersión de los datos obtenidos están dentro de los límites de control, además de ser una nube bastante horizontal y aleatoria, con esto se puede concluir que la muestra es estable.

Este resumen también muestra el histograma de capacidad en donde se observa que la gran parte de los datos de la muestra, están dentro de los límites de especificación, lo que implica que este proceso cumple con las especificaciones, además de poseer una gráfica que se asemeja a una campana de Gauss por lo que se puede decir que tiene una distribución aproximadamente normal.

En la gráfica de probabilidad normal, se tiene el patrón de puntos que se aproximan a una línea recta a excepción del extremo de derecho, sin embargo se considera que el proceso tiene una distribución normal pues es frecuente encontrar variabilidad en los extremos de la muestra.

Por último, en la gráfica de capacidad se muestran los valores de  $C_p$  y  $C_{pk}$ , con los cuales se puede concluir que por tener un valor bajo, el proceso para el eje X cumple con las especificaciones requeridas y que a largo plazo no presentará grandes cambios en las mismas.

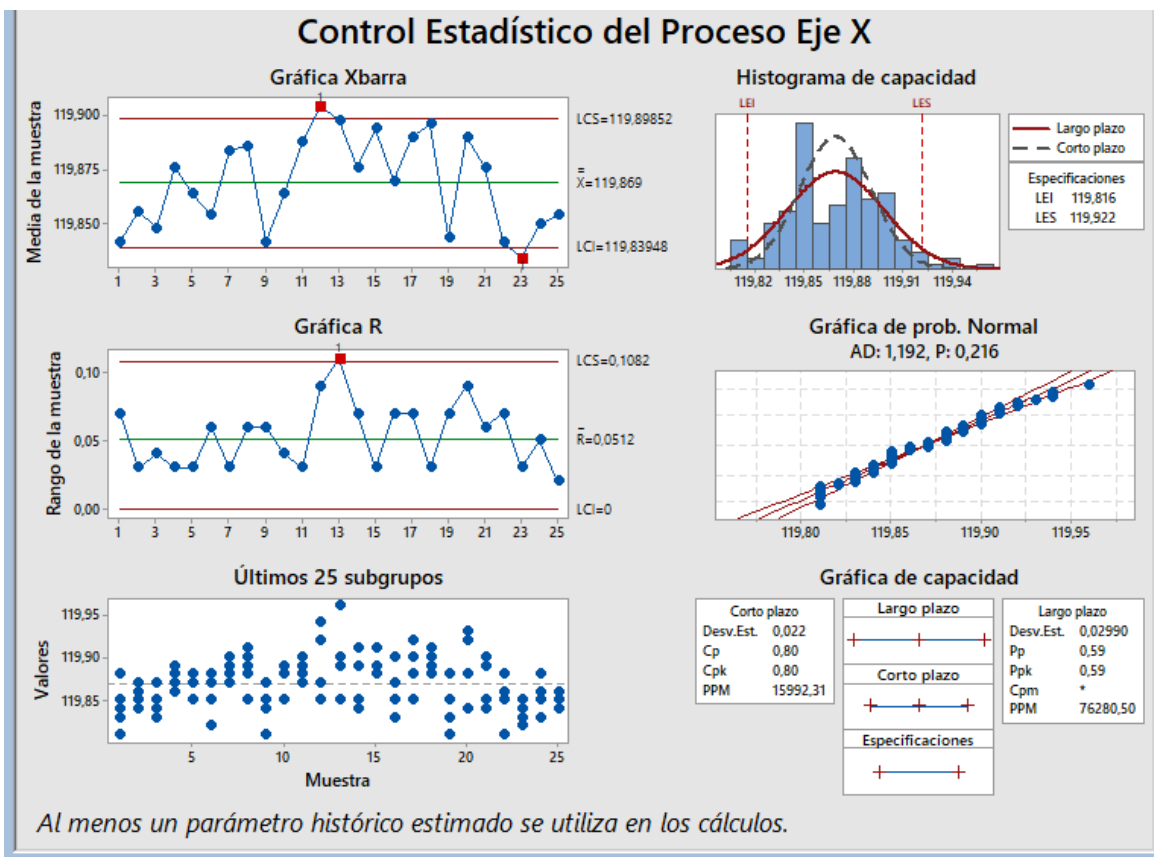


Figura 91 Resumen control estadístico proceso eje X

### 4.1.2. Control estadístico de procesos Eje Y

La medida teórica para este eje, es de 70 mm, mientras que las medidas experimentales son las que se muestran en la Tabla 42:

**Tabla 42**  
Medidas experimentales para carta de control eje Y

PRUEBA	EJE Y (ALTURA mm)					Y(MEDIA)	s (DESVIACIÓN ESTÁNDAR)
	M1	M2	M3	M4	M5		
1	69,92	69,94	69,96	69,9	69,87	69,918	0,035
2	69,9	69,92	69,88	69,87	69,93	69,9	0,026
3	69,84	69,85	69,87	69,9	69,91	69,874	0,030
4	69,85	69,87	69,89	69,85	69,84	69,86	0,020
5	69,87	69,85	69,91	69,83	69,85	69,862	0,030
6	69,96	69,9	69,94	69,92	69,91	69,926	0,024

CONTINUÍA





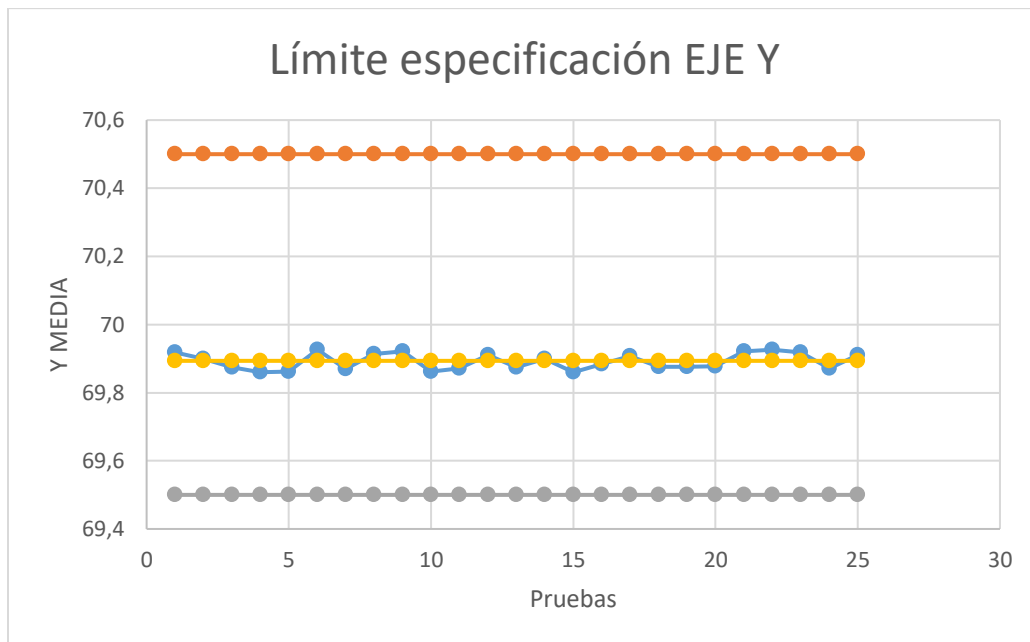
7	69,87	69,88	69,85	69,91	69,84	69,87	0,027
8	69,95	69,92	69,89	69,9	69,91	69,914	0,023
9	69,94	69,89	69,95	69,91	69,92	69,922	0,024
10	69,89	69,85	69,83	69,84	69,9	69,862	0,031
11	69,92	69,84	69,85	69,88	69,87	69,872	0,031
12	69,89	69,92	69,94	69,89	69,91	69,91	0,021
13	69,86	69,88	69,87	69,91	69,85	69,874	0,023
14	69,89	69,85	69,91	69,93	69,92	69,9	0,032
15	69,88	69,86	69,85	69,84	69,87	69,86	0,016
16	69,9	69,85	69,92	69,88	69,87	69,884	0,027
17	69,9	69,92	69,94	69,91	69,87	69,908	0,026
18	69,86	69,89	69,85	69,87	69,91	69,876	0,024
19	69,89	69,86	69,91	69,85	69,87	69,876	0,024
20	69,87	69,85	69,86	69,9	69,91	69,878	0,026
21	69,9	69,92	69,93	69,95	69,91	69,922	0,019
22	69,94	69,95	69,93	69,9	69,91	69,926	0,021
23	69,89	69,91	69,94	69,93	69,92	69,918	0,019
24	69,87	69,88	69,85	69,9	69,86	69,872	0,019
25	69,95	69,93	69,89	69,87	69,91	69,910	0,032
						69,892	0,025

De esta tabla, se puede observar el promedio de media de longitud ( $\bar{Y}$ ) y el promedio de la desviación estándar:

$$\bar{Y} = 69.892 \text{ [mm]}$$

$$\bar{s} = 0.0252 \text{ [mm]}$$

En la Figura 92, se muestra los valores de media obtenidos en las mediciones y los límites de especificación para el eje X considerando por requerimientos de diseño un error no mayor a 0.5 mm.



**Figura 92** Límite de especificación eje Y

En la Tabla 41 se muestran las respectivas constantes para cartas de control, teniendo en cuenta que las mediciones se realizaron en grupos de 5. De donde las constantes son las siguientes para este proceso:

- $A_3$ : 1.427 (Factor para límites de control de la Media)
- $C_4$ : 0.94 (Divisor para la estimación de la desviación estándar)
- $B_3$ : 0 (Factor para límites de control de la desviación estándar)
- $B_4$ : 2.089 (Factor para límites de control de la desviación estándar)

Con estas constantes seleccionadas, se procede a calcular los límites de control para las cartas de control, de la siguiente manera:

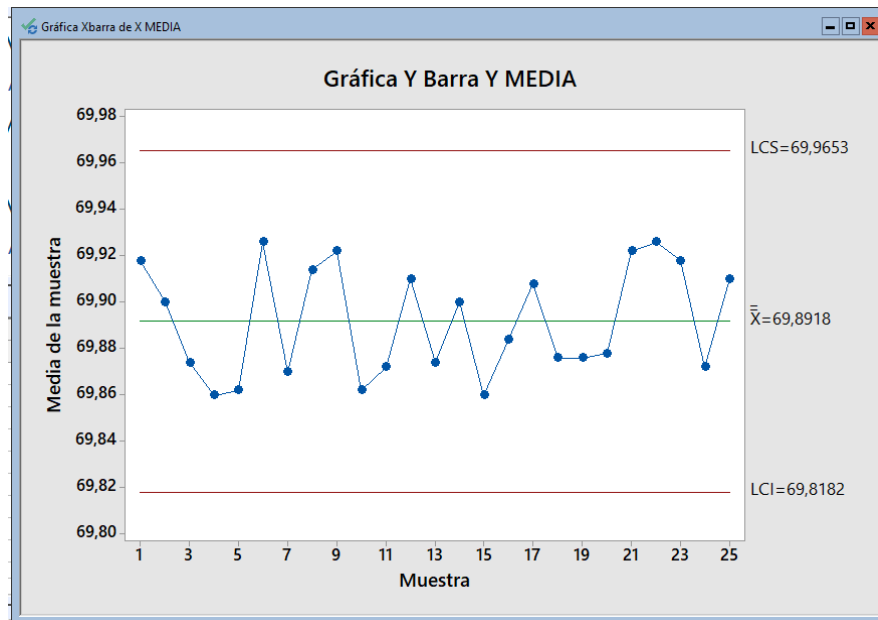
$$LCS_y = \bar{Y} + (A_3 * \bar{s}) = 69.892 + (1.427 * 0.0252) = 69.965$$

$$LCI_y = \bar{Y} - (A_3 * \bar{s}) = 69.892 - (1.427 * 0.0252) = 69.818$$

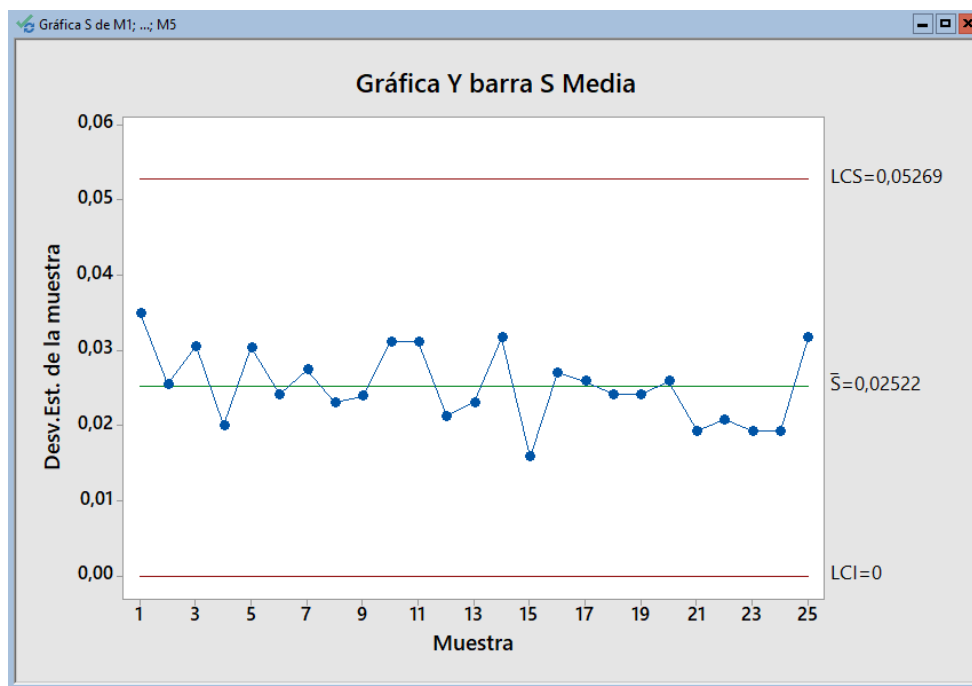
$$LCS_s = B_4 * \bar{s} = 2.089 * 0.0252 = 0.0527$$

$$LCI_s = B_3 * \bar{s} = 0 * 0.0238 = 0$$

Una vez realizado estos cálculos, se obtiene las gráficas correspondientes a la carta de control de media y de desviación estándar del eje Y, que se muestra en las Figuras 93 y 94:



**Figura 93** Gráfica de control Y media Eje Y



**Figura 94** Gráfica de control s media Eje Y

Como se observa en ambas cartas de control, la línea de dispersión de los datos experimentales está dentro de sus límites de control correspondientes, por lo cual se puede concluir que el proceso se encuentra en control estadístico.

Adicionalmente, en la Figura 95 se puede observar el control estadístico en resumen para el proceso del eje Y, en donde se observa la capacidad de control de dicho proceso, se puede ver que los puntos de dispersión de los datos obtenidos están dentro de los límites de control, además de ser una nube bastante horizontal y aleatoria, con esto se puede concluir que la muestra es estable.

Este resumen también muestra el histograma de capacidad en donde se observa que los datos de la muestra, están dentro de los límites de especificación, lo que implica que este proceso cumple con las especificaciones, además de poseer una gráfica que se asemeja a una campana de Gauss por lo que se puede decir que tiene una distribución aproximadamente normal.

En la gráfica de probabilidad normal, se tiene el patrón de puntos que se aproximan a una línea recta a excepción del extremo de derecho, sin embargo se considera que el proceso tiene una distribución normal pues es frecuente encontrar variabilidad en los extremos de la muestra.

Por último, en la gráfica de capacidad se muestran los valores de  $C_p$  y  $C_{pk}$ , con los cuales se puede concluir que por tener un valor bajo, el proceso para el eje X cumple con las especificaciones requeridas y que a largo plazo no presentará grandes cambios en las mismas.



**Tabla 43**  
*Medidas experimentales para carta de control eje X e Y*

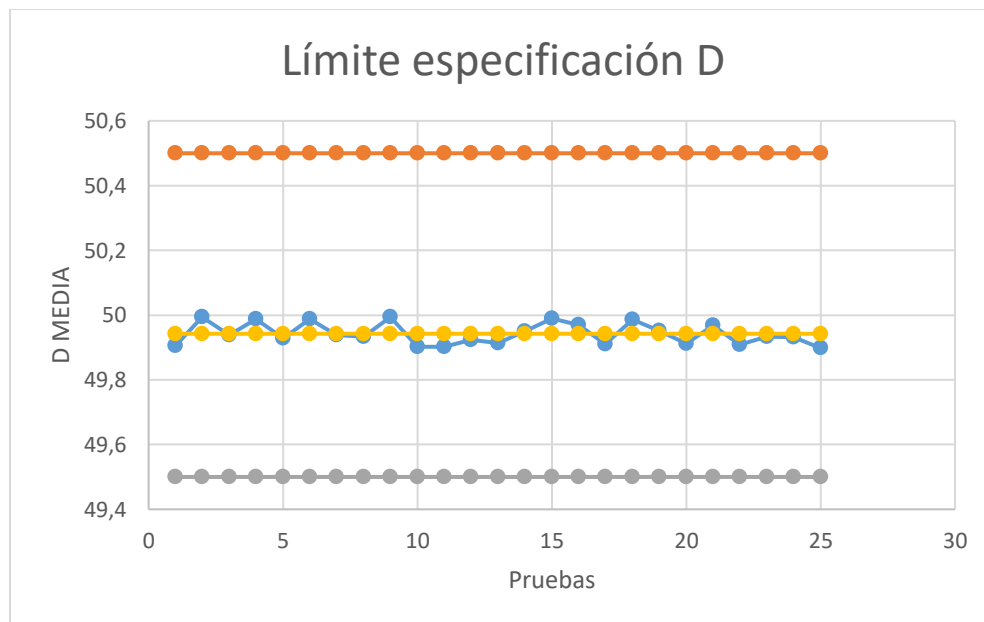
EJE X e Y (DIAMETRO mm)							
PRUEBA	M1	M2	M3	M4	M5	D (MEDIA)	s (DESVIACIÓN ESTÁNDAR)
1	49,9	49,95	49,87	49,93	49,88	49,906	0,034
2	49,98	50,02	49,99	50,01	49,97	49,994	0,021
3	49,91	49,92	49,95	49,93	49,98	49,938	0,028
4	50,01	49,99	49,98	50,01	49,95	49,988	0,025
5	49,93	49,95	49,97	49,9	49,89	49,928	0,034
6	49,95	50,01	49,98	50,03	49,97	49,988	0,032
7	49,94	49,97	49,91	49,89	49,98	49,938	0,038
8	49,98	49,95	49,91	49,9	49,93	49,934	0,032
9	50,02	49,99	49,97	50,01	49,98	49,994	0,021
10	49,88	49,87	49,91	49,93	49,92	49,902	0,026
11	49,9	49,92	49,87	49,89	49,93	49,902	0,024
12	49,89	49,94	49,91	49,93	49,95	49,924	0,024
13	49,94	49,95	49,89	49,88	49,91	49,914	0,031
14	49,96	49,92	49,99	49,95	49,93	49,95	0,027
15	49,97	49,99	50,01	50,03	49,95	49,99	0,032
16	49,95	49,94	49,97	49,99	50	49,97	0,026
17	49,93	49,89	49,91	49,87	49,95	49,91	0,032
18	50,02	50,01	49,98	49,97	49,95	49,986	0,029
19	49,97	49,95	49,93	49,94	49,97	49,952	0,018
20	49,95	49,89	49,92	49,91	49,89	49,912	0,025
21	49,96	49,95	50,01	50,02	49,9	49,968	0,049
22	49,89	49,88	49,95	49,92	49,9	49,908	0,028
23	49,93	49,92	49,95	49,97	49,9	49,934	0,027
24	49,98	49,9	49,91	49,95	49,92	49,932	0,033
25	49,89	49,88	49,92	49,93	49,87	49,898	0,026
						49,942	0,029

De esta tabla, se puede observar el promedio de media de diámetro (D) y el promedio de la desviación estándar:

$$\bar{D} = 49.942 \text{ [mm]}$$

$$\bar{s} = 0.0287 \text{ [mm]}$$

En la Figura 96, se muestra los valores de media obtenidos en las mediciones y los límites de especificación para el eje X considerando por requerimientos de diseño un error no mayor a 0.5 mm.



**Figura 96** Límite de especificación Diámetro

En la Tabla 41 se muestran las respectivas constantes para cartas de control, teniendo en cuenta que las mediciones se realizaron en grupos de 5. De donde las constantes son las siguientes para este proceso:

- $A_3$ : 1.427 (Factor para límites de control de la Media)
- $C_4$ : 0.94 (Divisor para la estimación de la desviación estándar)
- $B_3$ : 0 (Factor para límites de control de la desviación estándar)
- $B_4$ : 2.089 (Factor para límites de control de la desviación estándar)

Con estas constantes seleccionadas, se procede a calcular los límites de control para las cartas de control, de la siguiente manera:

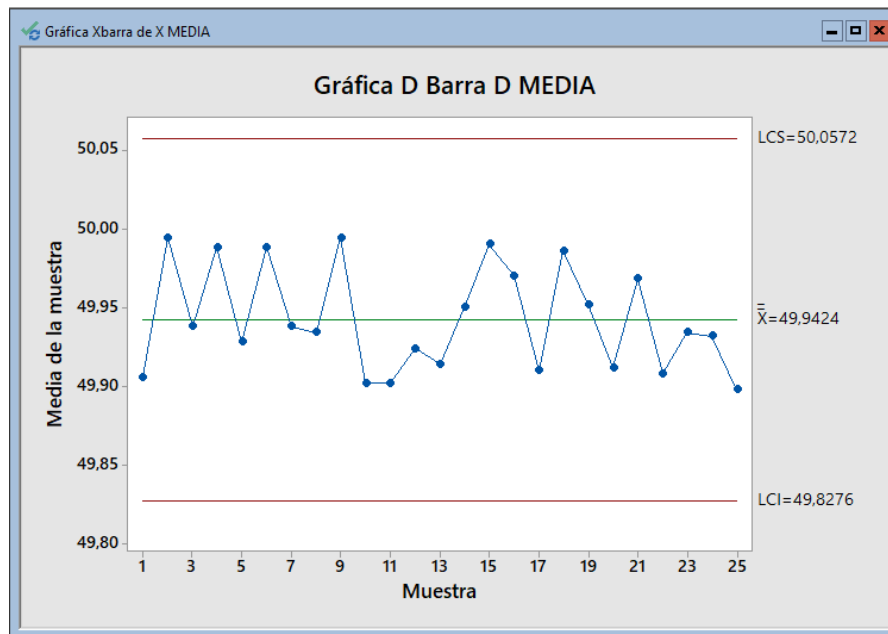
$$LCS_D = \bar{D} + (A_3 * \bar{s}) = 49.942 + (1.427 * 0.0287) = 50.057$$

$$LCI_D = \bar{D} - (A_3 * \bar{s}) = 49.942 - (1.427 * 0.0287) = 49.828$$

$$LCS_S = B_4 * \bar{s} = 2.089 * 0.0252 = 0.060$$

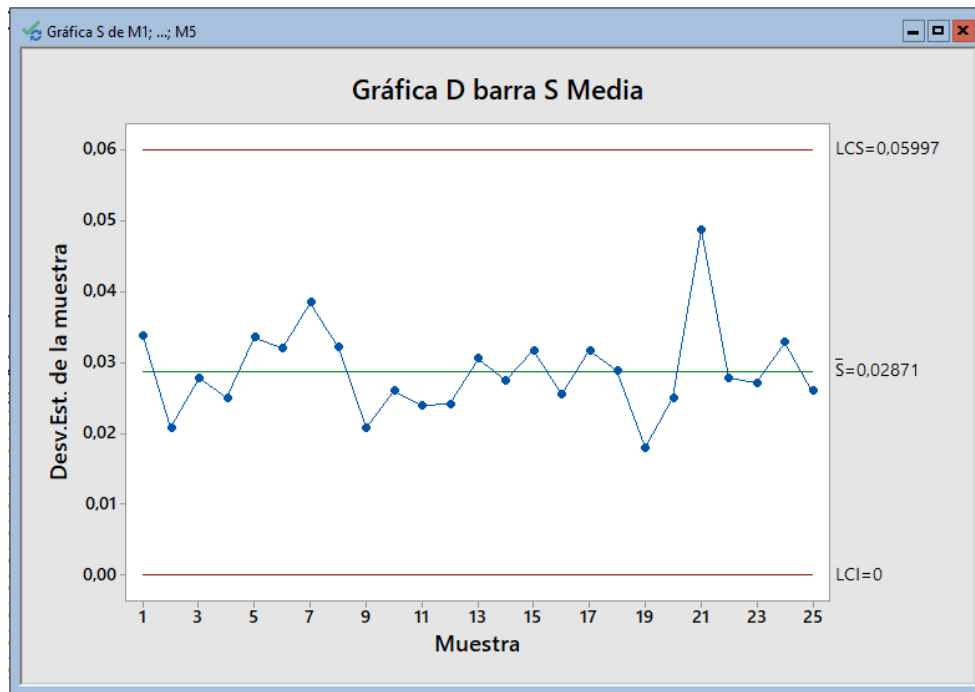
$$LCI_S = B_3 * \bar{s} = 0 * 0.0238 = 0$$

Una vez realizado estos cálculos, se obtiene las gráficas correspondientes a la carta de control de media y de desviación estándar del eje X e Y, que se muestra en las Figuras 97 y 98:



**Figura 97** Gráfica de control D media Eje X e Y





**Figura 98** Gráfica de control s media Eje X e Y

Como se observa en ambas cartas de control, la línea de dispersión de los datos experimentales está dentro de sus límites de control correspondientes, por lo cual se puede concluir que el proceso se encuentra en control estadístico.

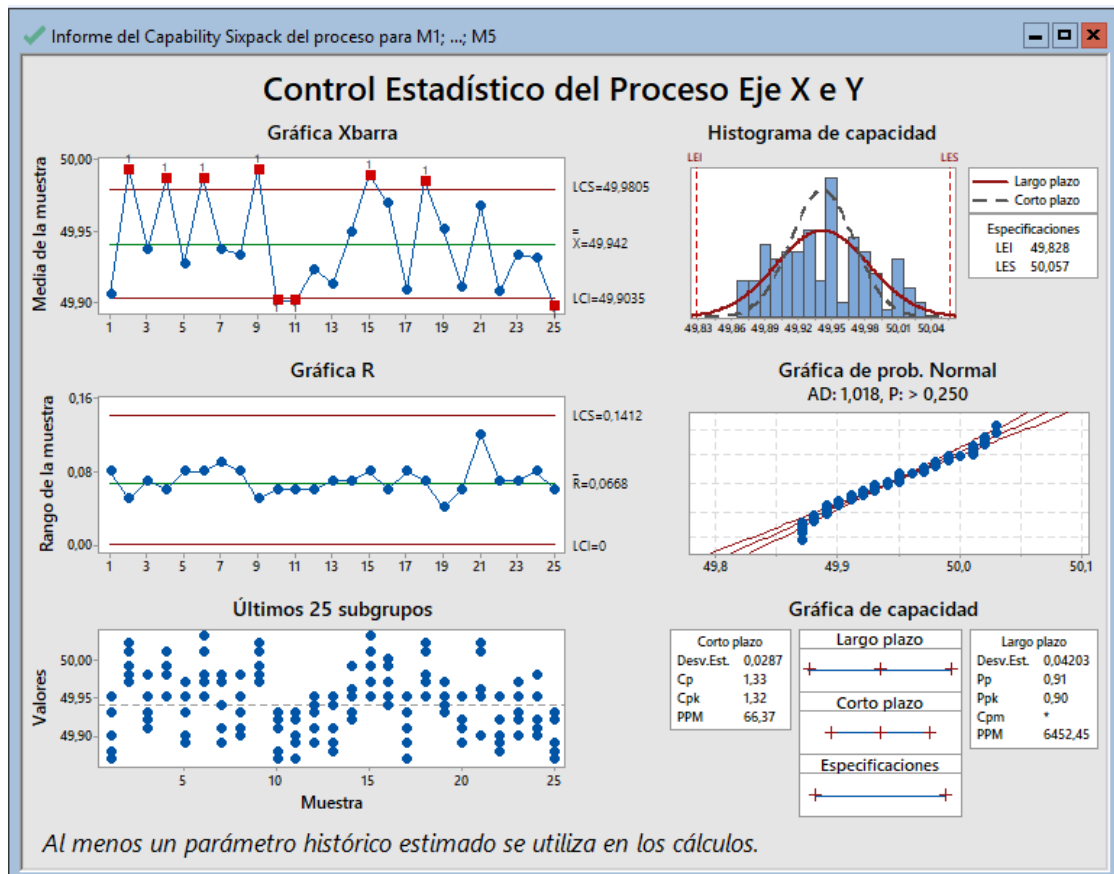
Adicionalmente, en la Figura 99 se puede observar el control estadístico en resumen para el proceso del eje Y, en donde se observa la capacidad de control de dicho proceso, se puede ver que los puntos de dispersión de los datos obtenidos están dentro de los límites de control, además de ser una nube bastante horizontal y aleatoria, con esto se puede concluir que la muestra es estable.

Este resumen también muestra el histograma de capacidad en donde se observa que los datos de la muestra, están dentro de los límites de especificación, lo que implica que este proceso cumple con las especificaciones, además de poseer una gráfica que se

asemeja a una campana de Gauss por lo que se puede decir que tiene una distribución aproximadamente normal.

En la gráfica de probabilidad normal, se tiene el patrón de puntos que se aproximan a una línea recta a excepción del extremo de derecho, sin embargo se considera que el proceso tiene una distribución normal pues es frecuente encontrar variabilidad en los extremos de la muestra.

Por último, en la gráfica de capacidad se muestran los valores de  $C_p$  y  $C_{pk}$ , con los cuales se puede concluir que por tener un valor bajo, el proceso para el eje X cumple con las especificaciones requeridas y que a largo plazo no presentará grandes cambios en las mismas.

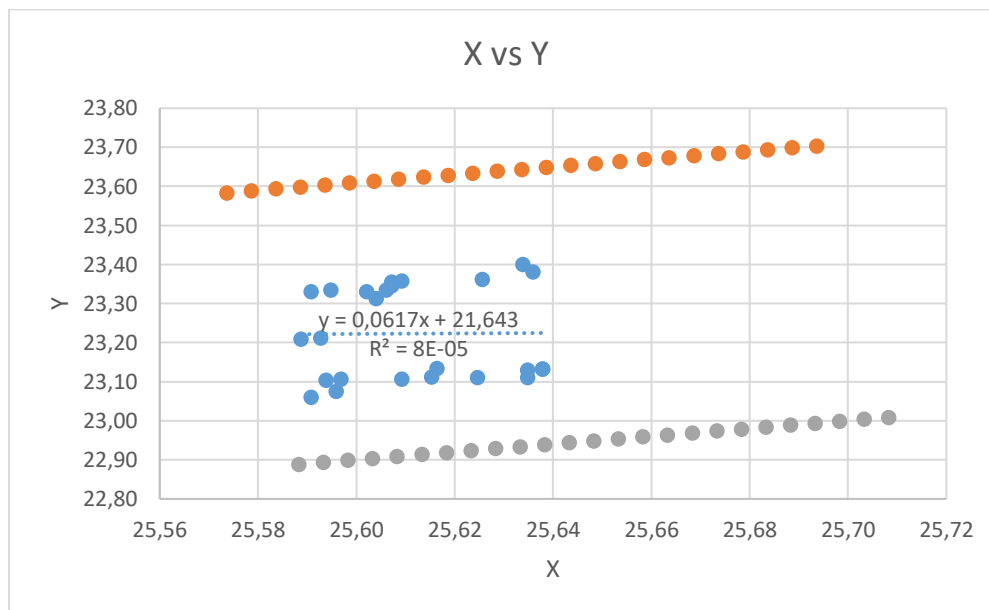


**Figura 99** Resumen control estadístico proceso eje X e Y

#### 4.1.3.2. Carta de control y regresión lineal (B.J. Mandel)

Esta teoría combinada, es una técnica efectiva para el control de procesos en una situación en la cual las variables están altamente correlacionadas con el tiempo (largo plazo).

Lo que se hace en primera instancia, es una gráfica de los datos obtenidos, y realizar una regresión lineal para poder predecir valores de respuesta a un futuro, lo que se muestra en la Figura 100:



**Figura 100** Gráfica X vs Y

Con la regresión lineal realizada en las muestras tomadas, se calcula con una prueba Student de la siguiente manera:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y)}{S_e \sqrt{\frac{n^2}{N} + n + \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - X)]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}}}$$

En donde:

$X_i$ : Valor de x después de la regresión realizada

$Y_i$ : Valor de y después de la regresión realizada para cada valor  $X_i$

$Y$ : Valor de y para establecer la regresión lineal de control

$X$ : Valor de x para establecer la regresión lineal de control

Para lo cual se tiene los siguientes datos:

$$n = 1$$

$$N = 25$$

$$S_e = 0.029$$

$$\bar{D} = 25.61$$

**Tabla 44**

*Medidas para el cálculo de la prueba Student*

Pruebas	X	Y	$X_i$	$Y_i$	$Y_i - Y$	$X_i - \bar{D}$	$X - \bar{D}$	$(X - \bar{D})^2$
1	25,59	23,21	25,431	23,222	0,010	-0,180	-0,019	0,000
2	25,64	23,13	24,149	23,225	0,092	-1,462	0,026	0,001
3	25,61	23,36	27,779	23,223	-0,134	2,168	-0,002	0,000
4	25,63	23,13	24,104	23,225	0,094	-1,507	0,023	0,001
5	25,60	23,31	27,056	23,223	-0,090	1,444	-0,007	0,000
6	25,63	23,11	23,780	23,225	0,114	-1,831	0,023	0,001
7	25,61	23,11	23,727	23,223	0,116	-1,884	-0,002	0,000
8	25,61	23,36	27,749	23,223	-0,132	2,138	-0,004	0,000
9	25,64	23,13	24,149	23,225	0,092	-1,462	0,026	0,001
10	25,59	23,06	22,970	23,222	0,162	-2,642	-0,021	0,000
11	25,59	23,33	27,346	23,222	-0,108	1,734	-0,021	0,000
12	25,60	23,33	27,350	23,223	-0,108	1,738	-0,009	0,000
13	25,60	23,11	23,708	23,222	0,117	-1,903	-0,015	0,000
14	25,62	23,11	23,818	23,223	0,111	-1,794	0,004	0,000
15	25,64	23,38	28,171	23,225	-0,156	2,560	0,024	0,001
16	25,63	23,36	27,858	23,224	-0,138	2,247	0,014	0,000
17	25,59	23,33	27,406	23,222	-0,112	1,795	-0,017	0,000
18	25,63	23,40	28,465	23,225	-0,175	2,854	0,022	0,000
19	25,62	23,13	24,157	23,224	0,090	-1,454	0,005	0,000
20	25,60	23,07	23,207	23,222	0,147	-2,404	-0,016	0,000
21	25,62	23,11	23,791	23,224	0,113	-1,820	0,013	0,000
22	25,59	23,10	23,663	23,222	0,119	-1,948	-0,018	0,000

CONTINÚA



<b>23</b>	25,61	23,35	27,587	23,223	-0,122	1,975	-0,004	0,000
<b>24</b>	25,61	23,33	27,410	23,223	-0,111	1,798	-0,005	0,000
<b>25</b>	25,59	23,21	25,371	23,222	0,013	-0,241	-0,023	0,001
				$\Sigma$	0,005	-0,083		0,007
				$\Sigma^2$		0,007		

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y)}{S_e \sqrt{\frac{n^2}{N} + n + \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - X)]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}}} = \frac{0.005}{0.029 * \sqrt{\frac{1^2}{25} + 1 + \frac{0.007}{0.007}}} = 0.0126$$

Como el valor calculado de t es menor que 2, se puede concluir que el valor crítico de significancia está en el nivel 5 de percentiles, con lo que se puede decir que el valor acumulativo perdido no es estadísticamente significativo diferente de cero.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

El presente proyecto se logró culminar de manera exitosa, logrando satisfacer los requerimientos del solicitante, enfocando el diseño en los 4 parámetros fundamentales obtenidos en la sección 3.2, los cuales son precisión, exactitud, velocidad de corte de la máquina, costo de manufactura y facilidad de adquisición de los materiales para su construcción. Facilitando con esto el uso de la máquina cortadora de plasma del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, obteniendo una máquina autónoma para el corte de materiales eléctricamente conductores de hasta un espesor de 10 mm, capacidad dada por la máquina de corte del laboratorio.

Se diseñó e implementó un robot tipo cartesiano para corte por plasma de tres grados de libertad con una precisión de 0.1mm y control adecuado de sus actuadores, además de poseer un área de trabajo de 1.2x1.2 m y poder trabajar en un área de 2x2m, lo cual fue un requerimiento inicial de diseño.

Se diseñó y seleccionó de manera adecuada los actuadores de la máquina de corte, para este caso motores paso a paso, logrando con esto que exista un correcto funcionamiento de los mismos, sin tener sobrecargas en cuanto al peso que dichos actuadores están destinados a mover.

Se logró obtener valores adecuados para el corte en cuanto a velocidad de avance mayor a los 6000mm/min que se plantearon como diseño previo, corriente de la máquina de hasta 60 A para su máxima capacidad de corte de material de 12 mm de espesor y a

una presión de trabajo de la antorcha de 85 PSI, estos parámetros varían dependiendo del espesor de material que se vaya a cortar, para lo cual se debe verificar dichos valores en el manual correspondiente de la máquina de corte.

Las guías para el desplazamiento lineal del pórtico diseñadas, fueron adecuadas ya que el deslizamiento no presenta fricción, por lo que evita un sobre esfuerzo de los motores y a su vez del controlador (driver) de los mismos.

En cuanto a la configuración del software de control Mach3, ya que se emplean dos motores para el movimiento del eje X de la máquina, fue necesario coordinar de manera adecuada estos motores, haciendo el uno esclavo del otro en cuanto a la señal que recibe, y adicionalmente tener un giro horario para un motor y un giro antihorario para el segundo motor, logrando tener un avance adecuado del pórtico.

El mecanismo de transmisión piñón-cremallera, optimizó los recursos para la construcción de la máquina, además de lograr tener la capacidad de carga adecuada para la misma, y una precisión suficiente para el avance de la máquina de corte, para este caso como se mostró en los resultados del Capítulo IV, se tiene un error menor a 0.5 mm por lo que las medidas tomadas como prueba están dentro de los límites de especificación y los límites de control calculados.

Los elementos de protección diseñados y seleccionados fueron los adecuados, para tener un correcto y seguro funcionamiento de los elementos eléctricos y electrónicos, el cableado fue el adecuado en cuanto a dimensiones de cable, evitando tener pérdidas de tensión considerables, es decir mayores al 5%, previamente establecido.

La estructura de soporte, es la adecuada para las cargas a las cuales estará sometida, con el proceso de soldadura en sus uniones, se logró una estructura robusta y estable, evitando vibraciones al momento de corte, lo cual causaría deformaciones o errores al momento de corte.

El proyecto fue planteado inicialmente para ser realizado en un período de 6 meses posterior a la aprobación del mismo, sin embargo el presente proyecto se desarrolló a lo largo de 8 meses, por lo que se tiene un retraso en el tiempo del 33.33% aproximadamente, esto debido a la falta de experiencia en los procesos de manufactura y al tiempo de maquinado de los mismos.

## **5.2. Recomendaciones**

El sistema de transmisión requiere de una adecuada lubricación para facilitar el movimiento del pórtico evitando el rozamiento entre los elementos, además de evitar que dichos elementos se desgasten de una manera apresurada, es decir mejorar la vida útil de estos.

El sistema de transmisión presenta una correcta precisión, suficiente para lo que fue proyectado, sin embargo si se desea una mejor precisión, se recomienda usar un sistema de tornillo de bolas recirculantes que como se mencionó anteriormente es el mejor sistema de transmisión en cuanto a avance y precisión se trata.

Para el uso de la máquina se recomienda, tener las seguridades apropiadas, en cuanto al uso de EPP (elementos de protección personal), adecuada extracción de gases nocivos, y tener la cama de agua lista para el funcionamiento de la máquina.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- *Aplicaciones Control Difuso.* (s.f.). Obtenido de <http://ccia.ei.uvigo.es/docencia/IA/1213/transparencias/ejemplo-control-difuso.pdf>
- Castiglione, N. (2011). *Transmisión de los movimientos a los ejes de los CNC-Routers.* Obtenido de <http://www.revistalettreros.com/pdf/108-034a039.pdf>
- Castillo, R. A. (2007). *Apuntes para la materia de Cinemática de las Máquinas.* San Luis Potosí.
- *CNC Programming Basics.* (2012). Obtenido de <http://www.slideshare.net/shlxtn/cnc-programming-basics>
- *Componentes de una máquina.* (2010). Obtenido de <https://prezi.com/natmlw7qrud/los-componentes-de-una-maquina/>
- Group, B.-A. M. (2011). *Facts about plasma technology and plasma cutting.*
- Haase, E. -B. (2005). *Máquina Neumática.* Madrid.
- Herramientas, D. M. (2014). *Corte por Plasma.* Obtenido de <http://www.demaquinasyherramientas.com/maquinas/corte-por-plasma-generalidades>
- Industry, D. (2008). *Sistema de arraste por correa dentada.* Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/cross-morse/product-20096-411757.html>
- Ingemecánica. (2017). *Transmisión por Cadenas.* Obtenido de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn127.html>
- IPAC. (2015). *Catálogo Productos y Servicios.* Quito.
- Kelly, S. G. (2012). *Mechanical Vibrations, Theory and Applications.* En S. G. Kelly, *Mechanical Vibrations, Theory and Applications.* USA: Cengage.
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de Control Automático.* México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- Madrid, U. C. (2008). *Introducción Teoría de Mecanismos.* Madrid.
- Mikell, P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas.* México: Prentice Hall.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas.* México: Pearson.
- Pyrosisproject. (2013). *Máquinas, Herramientas y CNC.* Obtenido de <https://pyrosisproject.wordpress.com>
- Ramirez Cardona, D. A. (2011). *Automatización de un torno paralelo, mediante un control numérico computarizado.* Obtenido de <https://es.slideshare.net/RobertoH1234/automatizacion-deuntornoparaleloconcontrolbasadoenpc>
- Rao, S. S. (2012). *Vibraciones Mecánicas.* En S. S. Rao, *Vibraciones Mecánicas* (págs. 135-138). México: Pearson.
- Rauscher, H. (2010). *Plasma Technology for Hyperfunctional Surface.* Wiley-VCH.
- Ruiz, L. (2004). *El Control Numérico Computarizado en el Desarrollo Industrial.* Portugal: GK.
- Shabana, A. A. (1996). *Theory of Vibration.* En A. A. Shabana, *Theory of Vibration* (págs. 79-81, 125-126). New York: Springer.

- SonRobots.com. (2008). *Motores, servomotores y motores paso a paso*. Obtenido de <http://sonrobots.com/arduinos/motores-servomotores-y-motores-paso-a-paso/>
- UNAL. (2014). *Máquinas - Herramienta CNC*. Obtenido de [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/mecatronica/docs\\_curso/Anexos/TUTORIALcnc/DOCUMENTOS/otros/M%Elquinas%20herramienta%20CNC.pdf](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/mecatronica/docs_curso/Anexos/TUTORIALcnc/DOCUMENTOS/otros/M%Elquinas%20herramienta%20CNC.pdf)
- Veleztecno, M. (2012). *Transmisión por cadena*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=hTx2xrXe-Ho>
- XYZCNC. (2013). *Control de Movimiento Lineal CNC* . Obtenido de <http://www.xyzcnc.com.mx/componentes-cnc/husillo-embalado/>
- Zúniga, Á. (2014). Diseño y Construcción de un equipo para corte de planchas con plasma operado por computador. págs. 11-12.

## **ANEXO 1: DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE LA CALIDAD (QFD)**

## **ANEXO 2: PLANOS MECÁNICOS**

## **ANEXO 3: PLANOS ELÉCTRICOS**

## **ANEXO 4: MANUAL DE USUARIO MACH 3**

## **ANEXO 5: MANUAL GEGKO G540**