



# **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 EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO ROUTER CNC  
PARA FABRICACIÓN Y PERFORACIÓN DE CIRCUITOS PCB**

**AUTORES:**

**CADENA PROAÑO, ALEX DARÍO**

**CORELLA ZAMORA, JONATHAN PATRICIO**

**DIRECTOR: BORYS HERNÁN, CULQUI CULQUI**

**SANGOLQUÍ, AGOSTO 2018**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO ROUTER CNC PARA FABRICACIÓN Y PERFORACIÓN DE CIRCUITOS PCB"* fue realizado por los señores *Cadena Proaño Alex Dario* y *Corella Zamora Jonathan Patricio*, el mismo ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 07 de agosto del 2018

Firma:

---

**Ing. BORYS HERNÁN CULQUI CULQUI**  
C.C. 1710436427



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

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, *Cadena Proaño Alex Darío*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO ROUTER CNC PARA FABRICACIÓN Y PERFORACIÓN DE CIRCUITOS PCB*" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 07 de agosto del 2018

Firma

Alex Darío Cadena Proaño  
C.C. 1723927842



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

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, *Corella Zamora Jonathan Patricio*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO ROUTER CNC PARA FABRICACIÓN Y PERFORACIÓN DE CIRCUITOS PCB"* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 07 de agosto del 2018

Firma

Jonathan Patricio Corella Zamora

C.C. 1723329494



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

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORIZACIÓN**

*Nosotros, Cadena Proaño Alex Darío y Corella Zamora Jonathan Patricio, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO ROUTER CNC PARA FABRICACIÓN Y PERFORACIÓN DE CIRCUITOS PCB" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.*

Sangolquí, 07 de agosto del 2018

Alex Darío Cadena Proaño

C.C. 1723927842

Jonathan Patricio Corella Zamora

C.C. 1723329494

## **DEDICATORIA**

Dedico principalmente a Dios por darme la sabiduría y constancia para alcanzar este gran objetivo en mi formación profesional. A mi madre por ser el pilar más importante, demostrándome su cariño, paciencia y apoyo incondicional sin importar las adversidades que hemos pasado. A mi padre por tener la constancia y sacrificio de verme lograr mis objetivos. A mi hermano que a pesar de la distancia física, siento que estas siempre a mi lado y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí. A mi familia en general porque me brindaron su apoyo incondicional.

**Alex Darío Cadena Proaño**

## DEDICATORIA

Con mucha felicidad y esperanza, dedico este proyecto de tesis a Dios por escuchar las oraciones de mi madre desde que inicio mi aventura en la capital cuidándome y protegiéndome siempre.

Con mucho cariño y gratitud dedico este trabajo a cada uno de mis seres queridos quienes han sido la base sólida y mi soporte para lograr este objetivo sumamente gratificante para mí.

A mis padres Nelson y Lupe por darme siempre su confianza, por preocuparse de que no me falte nada y sobre todo por el bello hogar del que formo parte.

A mi hermana Lady por ser mi motivación y mi ejemplo de lucha, quiero verte siempre con las mismas fuerzas y feliz, hermanita.... Te amo!

A mi bella y amorosa novia Leslie por ser mi compañera y apoyo en la elaboración de esta tesis.

A mi hermano Jefferson y mi tía Gloria quienes siempre confiaron en mí, sin lugar a dudas son los mejores.

A mis amigos quienes siempre fueron compañía, complicidad y luz en momentos difíciles.

Jonathan Patricio Corella Zamora

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la fortaleza para superar los obstáculos y dificultades a lo largo de mi vida.

A mi madre que con su demostración y madre ejemplar me brindo todo su apoyo y cariño para no desfallecer ni rendirme ante nada

A mi padre por sus sabios consejos he logrado superar las dificultades presentadas.

A mi hermano que siempre lo tuve presente para alcanzar todos mis objetivos y mis sueños.

A mis compañeros de trabajo, con su ayuda y paciencia en la elaboración de la tesis.

A mi familia en general que siempre confió en mí

Alex Darío Cadena Proaño



## AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a mi Universidad por permitirme ser parte de esta familia y haberme permitido estudiar mi carrera, así también a los diferentes docentes que me brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante día a día.

Agradezco también a mi asesor de tesis Borys Culqui por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento, así como también haberme tenido toda la paciencia para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis.

Agradezco a mis padres que gracias a sus consejos y palabras de aliento me han ayudado a crecer como persona y a luchar por lo que quiero, me han enseñado valores como la integridad y honestidad que me han servido a lo largo de mi vida.

Jonathan Patricio Corella Zamora

## ÍNDICE DE CONTENIDO

GENERALIDADES.....	1
1.1 Fundamentos teóricos.....	1
1.1.1 Printed Circuit Board (PCB) .....	1
1.1.2 Máquina CNC .....	3
1.1.3 Partes de un equipo CNC .....	4
1.1.3.1 Estructura mecánica articulada.....	4
1.1.3.3 Sistemas CAD/CAM.....	6
1.1.3.4 Software de control especializado CNC.....	7
1.2 Definición del problema.....	7
1.3 Fundamentos teóricos.....	8
1.4 Alcance del proyecto.....	9
1.4.1 Componentes mecánicos .....	10
1.4.2 Componentes electrónicos.....	10
1.4.3 Software para implementación, análisis y simulación .....	11
1.5 Área de influencia .....	11
1.5.1 Objetivos .....	12
1.5.1.1 Objetivo general .....	12
1.5.1.2 Objetivos específicos.....	12
1.6 Descripción general del proyecto .....	12
1.6.1 Componentes mecánicos .....	13
1.6.1.1 Estructura de soporte.....	13
1.6.2 Componentes electrónicos.....	14
1.6.2.1 Nivel de control.....	15
1.6.2.2 Nivel de potencia.....	16
1.6.2.3 Interfaz Usuario Máquina.....	16
ESTADO DEL ARTE.....	17
2.1 Métodos para fabricación de PCBs .....	17
2.1.1 Métodos con Tinta indeleble .....	17

	x
2.1.1.1 CNC 17	
2.1.1.2 Manual.....	18
2.1.2 Método por planchado.....	18
2.1.3 Método con cintas adherentes .....	18
2.1.4 Método por Fresado CNC .....	19
2.2 Equipos para fabricación de PCBs mediante fresado CNC del mercado.....	20
2.3 Trabajos realizados en el Ecuador.....	23
2.4 Manufactura por fresado de PCBs .....	24
2.4.1 Normas aplicables al diseño del equipo .....	24
2.4.2 Criterios de diseño PCB .....	25
2.4.3 PCBs y sus características para mecanizado CNC.....	28
2.4.4 Herramientas de corte y parámetros de corte .....	30
2.4.4.1 Tramado .....	30
2.4.4.2 Aislamiento .....	32
2.4.4.3 Perforación .....	34
2.5 Especificaciones objetivo del equipo .....	35
DISEÑO MECATRÓNICO.....	36
3.1 Matriz de calidad.....	36
3.1.1 Definición de necesidades.....	36
3.1.2 Definición de características técnicas .....	37
3.1.3 QFD.....	38
3.1.4 Análisis de resultados de la matriz QFD.....	39
3.1.5 Diseño según criterios de la matriz QFD .....	39
3.1.6 Conclusiones del listado de métricas .....	41
3.1.7 Evaluación de los resultados .....	42
3.2 Diseño Mecánico.....	42
3.2.1 Esquema general .....	42
3.2.2 Potencia del motor portaherramientas.....	43
3.2.2.1 Parámetros de corte para fresado .....	44
3.2.2.2 Parámetros de corte para taladrado .....	49

	xi
3.2.2.3 Potencia eléctrica mínima del motor del portaherramientas .....	51
3.2.3 Diseño mecánico de cada subsistema.....	52
3.2.3.1 Dimensionamiento del diámetro del eje Z .....	53
3.2.3.2 Dimensionamiento del diámetro del eje X.....	71
3.2.3.3 Dimensionamiento del diámetro del eje Y .....	85
3.2.3.4 Selección del Husillo de bolas .....	99
3.2.3.5 Cálculo Torque motores .....	107
3.2.3.6 Selección elementos .....	112
3.3 Diseño y Modelado CAD.....	114
3.3.1 Modelado ensamble final .....	114
3.3.2 Diseño sub-ensamble Eje Z.....	116
3.3.3 Diseño sub-ensamble Eje X .....	116
3.3.4 Diseño sub-ensamble Eje Y .....	117
3.3.5 Bastidor estructural del equipo.....	119
3.3.6 Modelado carcaza de protección.....	120
3.4 Diseño eléctrico y electrónico .....	120
3.4.1 Diagrama de bloques del sistema.....	120
3.4.2 Nivel de Control.....	121
3.4.2.1 Hardware de control .....	121
3.4.2.1.1 Microcontrolador.....	122
3.4.2.1.2 Driver Motor a Pasos.....	124
3.4.2.1.3 Fines de Carrera .....	127
3.4.2.1.4 Esquema eléctrico y electrónico.....	127
3.4.2.2 Software de Control .....	128
3.4.2.2.1 Flujo de Proceso del Equipo CNC .....	128
3.4.2.2.2 Flat Cam .....	129
3.4.2.2.3 Universal G-Code.....	130
3.4.2.2.4 Firmware GRBL Controller .....	131
3.4.3 Nivel de Potencia .....	133
3.4.3.1 Motores a pasos.....	133

	xii
3.4.3.2 Motor Spindle.....	134
3.4.3.3 Dimensionamiento de la fuente.....	135
IMPLEMENTACIÓN.....	137
4.1 Subsistema eje X.....	137
4.2 Subsistema eje Y.....	138
4.3 Bastidor.....	139
4.4 Ensamble.....	139
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	145
5.1 Especificaciones alcanzadas del equipo CNC.....	145
5.2 Pruebas con diferentes anchos de pista.....	145
5.3 Prueba de velocidad.....	147
5.4 Pruebas de precisión.....	148
5.5 Prueba de fabricación de PCBs diferente tamaño.....	149
ANÁLISIS ECONÓMICO.....	152
6.1 Costos de materiales importados.....	152
6.2 Costos de materiales locales.....	153
6.3 Costos de servicios.....	154
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	155
7.1 Conclusiones.....	155
7.2 Recomendaciones.....	156
BIBLIOGRAFÍA.....	157

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Características de los PCBs digitales y analógicos.....</i>	3
<b>Tabla 2</b> <i>Efectos del cloruro férrico en la salud de las personas.....</i>	8
<b>Tabla 3</b> <i>Especificaciones técnicas del proyecto.....</i>	10
<b>Tabla 4</b> <i>Comparación de métodos de fabricación.....</i>	19
<b>Tabla 5</b> <i>Especificaciones de equipos comerciales para fabricación de circuitos PCBs.....</i>	22
<b>Tabla 6</b> <i>Separación mínima entre pistas para diferentes voltajes.....</i>	27
<b>Tabla 7</b> <i>Track Width (Ancho de pista) para pistas PCB.....</i>	27
<b>Tabla 8</b> <i>Especificaciones recomendadas para tramado.....</i>	32
<b>Tabla 9</b> <i>Relación entre la profundidad de corte y el ancho de pista generado.....</i>	33

<b>Tabla 10</b> Especificaciones para aislamiento.....	34
<b>Tabla 11</b> Especificaciones para el taladrado.....	34
<b>Tabla 12</b> Velocidades adecuadas para cada trabajo .....	35
<b>Tabla 13</b> Especificaciones objetivo del equipo .....	35
<b>Tabla 14</b> Requerimientos del usuario.....	37
<b>Tabla 15</b> Características Técnicas .....	37
<b>Tabla 16</b> Matriz QFD.....	38
<b>Tabla 17</b> Resultados matriz QFD.....	39
<b>Tabla 18</b> Módulos para el diseño .....	39
<b>Tabla 19</b> Módulo 1 Tipo de motor de traslación X, Y, Z (actuador).....	40
<b>Tabla 20</b> Módulo 1 Mecanismo de traslación X, Y, Z (Sistema mecánico).....	40
<b>Tabla 21</b> Módulo 2 (Motor spindle) .....	40
<b>Tabla 22</b> Módulo 3 (Velocidad spindle RPM).....	41
<b>Tabla 23</b> Módulo 4 Carcasa de protección .....	41
<b>Tabla 24</b> Listado de métricas .....	41
<b>Tabla 25</b> Parámetros de entrada para cálculos del Fresado.....	48
<b>Tabla 26</b> Resultados Fresado .....	49
<b>Tabla 27</b> Parámetros de entrada Taladrado .....	51
<b>Tabla 28</b> Resultados Taladrado .....	51
<b>Tabla 29</b> Características spindle.....	52
<b>Tabla 30</b> Parámetros fuerzas resultantes eje Z.....	54
<b>Tabla 31</b> Carga total vertical en el taladrado eje Z.....	55
<b>Tabla 32</b> Carga total vertical en el fresado eje Z.....	57
<b>Tabla 33</b> Distancias fuerza normal eje Z .....	58
<b>Tabla 34</b> Distancias fuerza lateral eje Z .....	59
<b>Tabla 35</b> Datos entrada cálculo momentos eje Z.....	64
<b>Tabla 36</b> Resultados reacciones, fuerzas cortantes y momentos flectores eje Z.....	67
<b>Tabla 37</b> Casos para cálculo momentos eje Z.....	67
<b>Tabla 38</b> Datos entrada cálculo de diámetro eje Z.....	69
<b>Tabla 39</b> Diámetro eje Z.....	69
<b>Tabla 40</b> Datos deflexión eje Z.....	70
<b>Tabla 41</b> Parámetros fuerzas resultantes eje X.....	72
<b>Tabla 42</b> Carga total vertical en el taladrado Eje X.....	73
<b>Tabla 43</b> Carga total vertical en el fresado Eje X.....	74
<b>Tabla 44</b> Carga total normal en el fresado Eje X .....	75
<b>Tabla 45</b> Carga lateral en el fresado Eje X.....	77
<b>Tabla 46</b> Reacciones, fuerzas cortantes y momentos flectores Eje X.....	81
<b>Tabla 47</b> Casos para el cálculo del momento flector Eje X.....	81
<b>Tabla 48</b> Momentos flectores máximos Eje X .....	82
<b>Tabla 49</b> Datos entrada cálculo de diámetro eje X.....	83

<b>Tabla 50</b> <i>Diámetro eje X</i> .....	83
<b>Tabla 51</b> <i>Datos deflexión eje X</i> .....	84
<b>Tabla 52</b> <i>Parámetros fuerzas resultantes eje Y</i> .....	86
<b>Tabla 53</b> <i>Carga total vertical en el taladrado eje Y</i> .....	87
<b>Tabla 54</b> <i>Datos entrada cálculo diámetro eje Y</i> .....	88
<b>Tabla 55</b> <i>Datos entrada cálculo diámetro eje Y</i> .....	89
<b>Tabla 56</b> <i>Datos entrada cálculo diámetro eje Y</i> .....	90
<b>Tabla 57</b> <i>Datos entrada cálculo diámetro eje Y</i> .....	94
<b>Tabla 58</b> <i>Datos entrada cálculo diámetro eje Y</i> .....	95
<b>Tabla 59</b> <i>Datos entrada cálculo diámetro eje Y</i> .....	95
<b>Tabla 60</b> <i>Datos entrada cálculo diámetro eje Y</i> .....	96
<b>Tabla 61</b> <i>Datos entrada cálculo diámetro eje Y</i> .....	97
<b>Tabla 62</b> <i>Datos entrada cálculo diámetro eje Y</i> .....	97
<b>Tabla 63</b> <i>Datos deflexión eje Y</i> .....	98
<b>Tabla 64</b> <i>Parámetros para selección del husillo del eje Z</i> .....	101
<b>Tabla 65</b> <i>Velocidad máxima y carga máxima husillo Eje Z</i> .....	101
<b>Tabla 66</b> <i>Parámetros para selección del husillo del eje X</i> .....	103
<b>Tabla 67</b> <i>Velocidad máxima y carga máxima husillo eje X</i> .....	103
<b>Tabla 68</b> <i>Parámetros para selección del husillo del eje Y</i> .....	105
<b>Tabla 69</b> <i>Velocidad máxima y carga máxima husillo eje Y</i> .....	105
<b>Tabla 70</b> <i>Datos deflexión eje Y</i> .....	107
<b>Tabla 71</b> <i>Inercia Equivalente motor Eje Z</i> .....	109
<b>Tabla 72</b> <i>Inercia Equivalente motor Eje X</i> .....	110
<b>Tabla 73</b> <i>Inercia Equivalente motor Eje Y</i> .....	111
<b>Tabla 74</b> <i>Inercia Equivalente motor Eje Y</i> .....	111
<b>Tabla 75</b> <i>Selección de motores a pasos por eje</i> .....	112
<b>Tabla 76</b> <i>Diferencias entre Microcontroladores AVR y PIC</i> .....	123
<b>Tabla 77</b> <i>Tarjetas de control</i> .....	124
<b>Tabla 78</b> <i>Selección de driver para cada motor.</i> .....	126
<b>Tabla 79</b> <i>Dimensionamiento fuente</i> .....	136
<b>Tabla 80</b> <i>Especificaciones reales del equipo.</i> .....	145
<b>Tabla 81</b> <i>Diferentes tamaños de pista</i> .....	147
<b>Tabla 82</b> <i>Pruebas de velocidad por eje.</i> .....	148
<b>Tabla 83</b> <i>Pruebas de velocidad</i> .....	149
<b>Tabla 84</b> <i>Costos de materiales importados</i> .....	152
<b>Tabla 85</b> <i>Costos de materiales locales</i> .....	153
<b>Tabla 86</b> <i>Costos de materiales locales</i> .....	154

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ejemplo de circuito PCB .....	1
<b>Figura 2</b> Articulaciones prismáticas de los ejes (a) X, (b) Y, (c) Z .....	5
<b>Figura 3</b> Diagrama esquemático de una CNC Shield.....	6
<b>Figura 4</b> Boceto de la propuesta del equipo a implementarse.....	13
<b>Figura 5</b> Diagrama de bloques de componentes mecánicos .....	14
<b>Figura 6</b> Diagrama de bloques de componentes mecánicos .....	15
<b>Figura 7</b> Circuito impreso desde el computador (Maquina Impresora) .....	17
<b>Figura 8</b> Método manual aplicación de tinta indeleble. ....	18
<b>Figura 9</b> Máquina de prototipado para PCB ProtoMat S103. ....	20
<b>Figura 10</b> Máquina CNC 3040 .....	21
<b>Figura 11</b> Equipo para fabricación de PCBs. Bungard CC2MTC. ....	21
<b>Figura 12</b> Máquina CNC de fabricación de placas SMD .....	23
<b>Figura 13</b> Resultados de la utilización de la máquina CNC .....	23
<b>Figura 14</b> Máquina CNC de 3 ejes .....	24
<b>Figura 15</b> Unidades empleadas en los PCB .....	25
<b>Figura 16</b> Distancia pitch.....	26
<b>Figura 17</b> Relleno de espacios vacíos en PCBs.....	28
<b>Figura 18</b> Tamaños estándar para circuitos impresos según la norma IPC .....	29
<b>Figura 19</b> Tipos de procesos a realizar .....	30
<b>Figura 20</b> Fresa punta plana de 2 flautas, zanco 1/8" .....	31
<b>Figura 21</b> Parámetros de corte para fresado.....	31
<b>Figura 22</b> Acabado con diferentes RPM y un mismo avance.....	32
<b>Figura 23</b> Fresa CNC con punta en V (zanco 1/8", 30°).....	33
<b>Figura 24</b> Esquema Máquina CNC.....	43
<b>Figura 25</b> Diagrama de cuerpo libre general .....	43
<b>Figura 26</b> Avance por revolución para una fresa con punta en V (zanco 1/8", 30°).....	45
<b>Figura 27</b> Esquema subsistema eje Z .....	53
<b>Figura 28</b> Componentes de la fuerza de corte en el plano XY .....	54
<b>Figura 29</b> Fuerza eje Z para carga vertical taladrado.....	55
<b>Figura 30</b> Fuerza eje Z para carga vertical fresado .....	56
<b>Figura 31</b> Fuerza normal .....	57
<b>Figura 32</b> Fuerza lateral .....	59
<b>Figura 33</b> Fuerza resultante guías lineales eje Z dirección X .....	62
<b>Figura 34</b> Fuerza resultante guías lineales eje Z dirección Y.....	63
<b>Figura 35</b> Esquema fuerzas plano XZ eje Z.....	63
<b>Figura 36</b> Esquema fuerzas plano XZ eje Z.....	64
<b>Figura 37</b> Esquema fuerzas plano YZ eje Z.....	65



<b>Figura 38</b> Esquema fuerzas plano YZ eje Z.....	66
<b>Figura 39</b> Diagramas fuerzas cortantes eje Z.....	68
<b>Figura 40</b> Diagramas momentos flectores eje Z.....	68
<b>Figura 41</b> Esquema para calcular la flexión en vigas.....	70
<b>Figura 42</b> Simulación deflexión eje Z.....	71
<b>Figura 43</b> Esquema Eje X.....	71
<b>Figura 44</b> Fuerzas eje X para carga vertical taladrado.....	72
<b>Figura 45</b> Fuerzas eje Z para carga vertical fresado.....	74
<b>Figura 46</b> Fuerza normal eje X.....	75
<b>Figura 47</b> Fuerza lateral eje X.....	76
<b>Figura 48</b> Fuerza resultante guías lineales eje X dirección Y.....	79
<b>Figura 49</b> Fuerza resultante guías lineales eje X dirección Z.....	80
<b>Figura 50</b> Esquema fuerzas plano XZ eje X.....	80
<b>Figura 51</b> Esquema fuerzas plano YZ eje X.....	81
<b>Figura 52</b> Diagrama fuerzas cortantes eje X.....	82
<b>Figura 53</b> Diagrama de momentos flectores eje X.....	82
<b>Figura 54</b> Deflexión eje X.....	85
<b>Figura 55</b> Esquema del eje Y.....	85
<b>Figura 56</b> Fuerzas eje Y para carga vertical taladrado.....	87
<b>Figura 57</b> Fuerzas eje Z para carga vertical fresado.....	88
<b>Figura 58</b> Esquema fuerza Fcx.....	89
<b>Figura 59</b> Esquema fuerza Fcy.....	90
<b>Figura 60</b> Fuerza resultante guías lineales eje Y dirección Z.....	93
<b>Figura 61</b> Fuerza resultante guías lineales eje Y dirección X.....	93
<b>Figura 62</b> Esquema fuerzas plano XY eje X.....	94
<b>Figura 63</b> Esquema fuerzas plano YZ eje Y.....	94
<b>Figura 64</b> Diagrama de fuerza cortante eje Y.....	96
<b>Figura 65</b> Diagrama momento flector eje Y.....	96
<b>Figura 66</b> Deflexión simulada eje Y.....	99
<b>Figura 67</b> Tipos de arreglos para el soporte de los husillos.....	100
<b>Figura 68</b> Nomenclatura para la selección de tornillos.....	101
<b>Figura 69</b> Selección del tornillo para el eje Z.....	102
<b>Figura 70</b> Selección del tornillo para el eje X.....	104
<b>Figura 71</b> Selección del tornillo para el eje Y.....	106
<b>Figura 72</b> Esquema torque motor.....	108
<b>Figura 73</b> Placa de aluminio.....	113
<b>Figura 74</b> Perfil rectangular.....	113
<b>Figura 75</b> Acople Flexible.....	113
<b>Figura 76</b> Rodamientos lineales.....	114
<b>Figura 77</b> Ensamble máquina CNC.....	115
<b>Figura 78</b> Ensamble máquina CNC.....	115

<b>Figura 79</b> Sub-ensamble eje Z.....	116
<b>Figura 80</b> Vista Isométrica sub-ensamble del eje X.....	116
<b>Figura 81</b> Mecanismo Eje X. Vista Frontal y Vista Posterior.....	117
<b>Figura 82</b> Sub ensamble Eje Y. Vista Isométrica, Frontal y Lateral Izq. respectivamente.....	118
<b>Figura 83</b> Carcaza de protección.....	119
<b>Figura 84</b> Carcaza de protección.....	120
<b>Figura 85</b> Esquema del sistema electrónico.....	121
<b>Figura 86</b> Esquema de un microcontrolador.....	122
<b>Figura 87</b> Esquema interno del driver A4988, circuitos puente H marcados.....	125
<b>Figura 88</b> Pines de control de un driver de motor a pasos.....	125
<b>Figura 89</b> Esquemas de conexión para los drivers.....	126
<b>Figura 90</b> Sensor fin de carrera.....	127
<b>Figura 91</b> Configuración Pull-up.....	127
<b>Figura 92</b> Esquema de un microcontrolador.....	128
<b>Figura 93</b> Esquema de un microcontrolador.....	129
<b>Figura 94</b> HMI del software Flat Cam.....	130
<b>Figura 95</b> HMI del software Universal G-Code Sender.....	131
<b>Figura 96</b> Seccionar los pulsos al driver para suavizar movimientos.....	132
<b>Figura 97</b> Motor Nema 17.....	134
<b>Figura 98</b> Motores Nema 23.....	134
<b>Figura 99</b> Motor Spindle 12000 rpm.....	135
<b>Figura 100</b> Fuente 12 VDC.....	136
<b>Figura 101</b> Placa móvil eje X, 180x139x10.....	137
<b>Figura 102</b> Placas laterales soporte eje X, dimensiones 160x60x10.....	138
<b>Figura 103</b> Placas móvil eje Y, dimensiones 284x274x10.....	138
<b>Figura 104</b> Placas laterales soporte eje Y.....	139
<b>Figura 105</b> Bastidor equipo CNC. Tubo rectangular 60x30x1.5.....	139
<b>Figura 106</b> Perforación en el bastidor según las placas de aluminio.....	140
<b>Figura 107</b> Sujeción del eje X y su spindle a la placa móvil del eje X.....	140
<b>Figura 108</b> Sujeción placa lateral bastidor eje X.....	141
<b>Figura 109</b> Sujeción placa frontal bastidor eje Y.....	141
<b>Figura 110</b> Sujeción placa frontal bastidor eje Y.....	142
<b>Figura 111</b> Acople flexible entre el motor y el tornillo SFU1605. (Eje Y).....	142
<b>Figura 112</b> Fotografía del sistema mecánico CNC.....	143
<b>Figura 113</b> Cableado electrónico del equipo CNC.....	144
<b>Figura 114</b> Equipo CNC ensamble final.....	144
<b>Figura 115</b> Baquelita con diferentes anchos de pista.....	146
<b>Figura 116</b> Diferentes tamaños de circunferencia.....	148
<b>Figura 117</b> Placa fabricada: B1 120x80 mm.....	150
<b>Figura 118</b> Placa fabricada: B2 170x120 mm.....	150
<b>Figura 119</b> Placa fabricada: D2 240x170 mm.....	151

## RESUMEN

Actualmente los circuitos PCBs son altamente utilizados en la fabricación de equipos, controladores y sistemas de control tanto a nivel industrial como en proyectos de investigación en universidades. Para su fabricación, se emplea, en su mayoría, el método por ataque químico con cloruro férrico el cual presenta riesgos para la salud humana y constituye un factor contaminante para las reservas acuíferas debido a que arroja hierro en las mismas. Es por ello que se realizó esta investigación, mediante el diseño y construcción de un equipo CNC para realizar el fresado y taladrado de las placas de cobre mediante arranque de viruta evitando el uso del cloruro. Adicionalmente el método CNC presenta ventajas tales como mayor precisión y menores tiempos de proceso, por otra parte, presenta la principal desventaja de costo de implementación, sin embargo, se diseñó la máquina en base a los requerimientos del cliente valorados mediante una matriz QFD con un enfoque en reducción de costos de manufactura manteniendo la calidad del equipo, la inversión final fue de un 15.8% menos que su competidor más cercano en el mercado nacional. El equipo se constituye de tres partes principales: mecánica, electrónica y software de control. Dentro de la parte mecánica se empleó el mecanismo de husillo de bolas y motores a pasos, logrando precisión y velocidades de avance para un buen acabado superficial. Los softwares empleados se caracterizan por ser libres y de fácil integración con la parte electrónica garantizando el trabajo autónomo de la máquina a partir del código G. Finalmente se realizaron pruebas para garantizar el correcto desempeño de la máquina.

### **PALABRA CLAVE:**

- **CNC**
- **PCBs**
- **FRESADO**

## **ABSTRACT**

Currently printed circuit boards (PCB's) are a common components of OEM equipment, controllers and control systems, at industrial level or in project research at universities. To develop PCB prototypes, the most common method is by chemical treatment with ferric chloride. This creates risks to human health and to environment due to contaminating factor of water reserves. This research was focused on the design and construction of a CNC equipment to drill and mill copper plates avoiding the use of chloride. Additionally, the CNC method has advantages such as greater precision and shorter process time, on the other hand, the main disadvantage is the implementation cost, and however, the machine was designed based on the customer's requirements with a QFD matrix with focus on reducing manufacturing costs but keeping the quality of the equipment. The final investment was 15.8% less than the closer competitor in the national market. The equipment consists of three main parts: mechanical, electronics and control software. The mechanism used are ball screw and stepper motors. This achieves a high precision and the speed creates a good surface finish. The software employed are license free and easy to integrate with the electronic part, guaranteeing the autonomous operation of the machine with the G code. Finally, several tests were carried out to guarantee the correct performance of the machine.

### **KEY WORDS:**

- **CNC**
- **PCBs**
- **MILLING**

## CAPITULO I

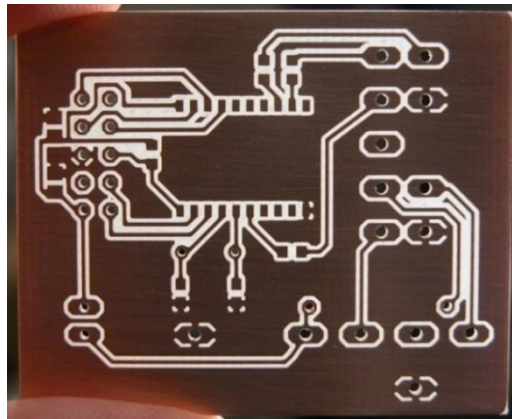
### GENERALIDADES

En este capítulo se describe el proyecto para diseñar y fabricar un equipo router CNC para fabricación de PCBs, se analizará fundamentos teóricos sobre el tema, además se da a conocer la justificación e importancia de la realización del proyecto y se concluye con los detalles de los elementos y sistemas de control que se pretenden utilizar en el desarrollo de esta máquina de control numérico.

#### 1.1 Fundamentos teóricos

##### 1.1.1 Printed Circuit Board (PCB)

Por el significado de sus siglas en inglés Printed Circuit Board o en español placa de circuito impreso, un PCB es una plancha base que consta de material aislante y material conductor. Este último forma pistas que permiten una interconexión eléctrica entre los diferentes componentes que se montan y sueldan en la misma. Como se puede ver en la Figura 1.



*Figura 1* Ejemplo de circuito PCB

Fuente: (RetroAmplis, 2017)

A los PCBs también se los conoce como Printed Wiring Board (PWB), que consiste en la placa de circuito con las pistas formadas y que únicamente le faltan los componentes.

En la actualidad se encuentran a las PCB en casi todos los dispositivos electrónicos. A medida que la tecnología avanza también las especificaciones de diseño para los circuitos impresos se vuelven más complejas, aumentando la densidad de los mismos y el número de componentes, el ruteado de las pistas se vuelve más complejo por lo que incluso se han implementado distintos sistemas software CAD para asistir en el diseño de estas placas. (Universidad Antonio de Nebrija, 2017)

El equipo que se busca implementar con la presente investigación tiene como principal objetivo fabricar circuitos impresos partiendo de un diseño previo, para el diseño del PCB el usuario deberá tener conocimientos del software CAD y de las normas IPC para realizar un enrutamiento correcto de las pistas y dimensionamiento de los elementos del circuito impreso. Por lo que para la parte conceptual e investigativa no se abordarán a profundidad estos temas.

Según (Cloombs, 2008) se puede clasificar a los circuitos PCBs en dos grandes grupos de acuerdo a sus características comunes y su funcionalidad. Estos grupos difieren mucho en sus necesidades y componentes electrónicos por lo que sus procesos de diseño y fabricación también son diferentes. A continuación en la Tabla 1 se puede observar esta clasificación con sus principales características.

**Tabla 1***Características de los PCBs digitales y analógicos*

<b>PCB, analógicos, RF, microondas</b>	<b>PCB, digitales</b>
Baja complejidad del circuito	Alta complejidad del circuito
Ajuste preciso de impedancia a menudo necesario	Tolerancia en el desajuste de impedancias
Pérdidas de señal mínimas necesarias	Tolerancia en la pérdida de señales
Solo de 1 y 2 capas	Muchas capas de señales y de potencia
Constantes dieléctricas bajas y uniformes	Constantes dieléctricas no primarias.

Fuente: (Cloombs, 2008)

### 1.1.2 Máquina CNC

Por sus siglas en español son máquinas de control numérico computarizado. Las aplicaciones para estos equipos son variadas, en procesos de manufactura como: tornos, fresadoras, cortadoras láser, impresoras 3D, en la industria se usan en celdas robotizadas. Estos equipos presentan ventajas importantes como las siguientes:

- Mayor precisión
- Homogeneidad y regularidad en los productos finales
- Funcionalidad y flexibilidad
- Reducción del tiempo de manufactura
- Elaboración de productos más complejos
- Mejor control de calidad.
- Mayor seguridad en las operaciones

Por otra parte presenta desventajas como:

- Costo de inversión elevado
- Capacitación de los operadores
- Personal capacitado para programar los equipos
- Costo de mantenimiento
- Mantener elevados volúmenes de producción para compensar la inversión. (Tejeira, 2017)

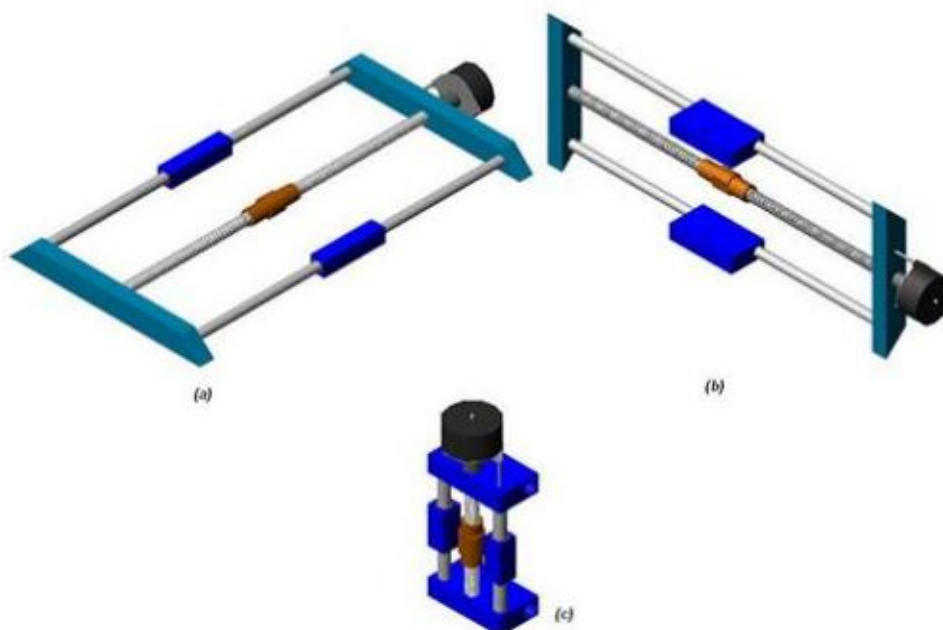
### **1.1.3 Partes de un equipo CNC**

A continuación se muestra una descripción de las principales partes de las que consta un equipo CNC.

#### **1.1.3.1 Estructura mecánica articulada**

La estructura mecánica del equipo a implementarse estará compuesta por un conjunto de eslabones que forman tres articulaciones lineales más un efector final que para nuestra máquina será un spindle, las articulaciones se encargan del posicionamiento de la herramienta, tres de ellas prismáticas y la rotacional perteneciente al efector final. Cada una de las articulaciones prismáticas responderá a un motor que será su actuador, dando como resultado un motor para cada uno de los ejes X, Y y Z. Los motores para los movimientos lineales posiblemente serían motores a pasos debido al mayor uso en este tipo de equipos y el motor para el efector final podría ser un motor DC, los mismos se seleccionarán una vez establecidas las especificaciones de diseño y requerimientos para el equipo. En la Figura 2 se puede observar un esquema de las articulaciones prismáticas correspondientes a los ejes de movimiento.





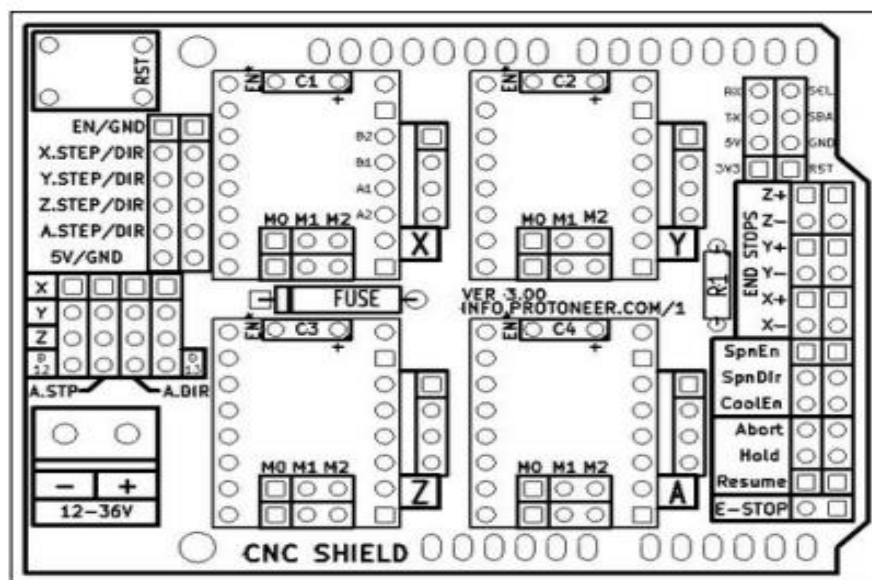
**Figura 2** Articulaciones prismáticas de los ejes (a) X, (b) Y, (c) Z  
Fuente: (Rangel, 2017)

### 1.1.3.2 Sistema eléctrico y electrónico de control

Los actuadores del equipo CNC serán eléctricos, por lo que necesitarán una parte de potencia y una parte control para gobernar los desplazamientos lineales de los ejes. La parte del circuito eléctrico de potencia se encarga de alimentar a los actuadores (motores eléctricos) sin afectar o interferir en el circuito de control que consta de una placa en donde se encuentra el microcontrolador y el conector USB que permite la comunicación con el software CNC en la computadora del cual se entrará a detalle más adelante.

Los microcontroladores son elementos electrónicos que funcionan con lógica TTL (lógica transistor transistor) tienen la propiedad de ser programables, lo que permite su uso en una variedad de proyectos. En la CNC se encargará de controlar el movimiento de los actuadores y trabaja conjuntamente con una CNC Shield que es una tarjeta electrónica que integra drivers para el uso

de motores a pasos bipolares y adicionalmente permite la programación de sensores fines de carrera. En la figura 3 se puede observar un diagrama esquemático de una tarjeta CNC Shield.



**Figura 3** Diagrama esquemático de una CNC Shield

Fuente: (García, 2017)

### 1.1.3.3 Sistemas CAD/CAM

Sistema Asistido por Computador de sus siglas en inglés, es un software que sirve para tener una representación gráfica de objetos en 2D o 3D, esto se realiza mediante programas informáticos, estos sistemas CAD pueden estar dirigidos a diferentes tipos de aplicaciones, donde el software nos permite tener una representación de nuestro prototipo con la ventaja que puede ser analizado físicamente para tener nuestro producto final, gracias a esta ventaja se puede disminuir costos de desarrollo, en nuestro caso el sistema CAD se usará como parte del diseño electrónico de los PCBs que sería el paso anterior al uso del equipo, adicionalmente será una herramienta para el diseño mecánico e identificar interacciones de las partes a construirse.

#### **1.1.3.4 Software de control especializado CNC**

Un software de control CNC es el encargado de transmitir el código G a un lenguaje de programación para las tarjetas programables y actuadores que funcionan en una máquina CNC, donde permite el movimiento de los ejes de la máquina mencionada.

### **1.2 Definición del problema**

Los circuitos impresos o PCBs son necesarios para la fabricación de equipos o controladores, agregando tarjetas de control, automatización o instrumentación, actualmente se utilizan tanto en las universidades como en la industria.

El proyecto a implementarse está enfocado a los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas y estará ubicado en el laboratorio de Instrumentación Mecatrónica. Tiene como principal objetivo optimizar el proceso de fabricación de los circuitos impresos, brindando a nuestros compañeros una herramienta para que puedan desarrollar sus circuitos PCBs de una manera más eficiente, rápida, precisa y eliminando los riesgos del uso de químicos que se emplean con el método tradicional (método de ataque químico con planchado) más usado por estudiantes.

La elaboración de PCB por ataque químico introduce el uso principal del cloruro férrico el cual tiene muchos efectos en la salud de las personas. En la Tabla 2 se muestran algunos detalles de estas posibles afectaciones.

El método tradicional del ataque químico puede llegar a tener varias afectaciones graves en la salud de las personas, adicionalmente al ser un método manual presenta poca precisión y puede llegar a ser un proceso que requiere mucho tiempo además de tedioso. Es por todo eso que se busca implementar este equipo para el beneficio de la comunidad universitaria, facilitando la investigación y el desarrollo de proyectos futuros.

**Tabla 2***Efectos del cloruro férrico en la salud de las personas.*

<b>Rutas potenciales de ingreso al organismo</b>	<b>Efectos</b>
Inhalación	Efectos severos en las mucosas y nasales y miembros respiratorios como: picazón, ardor, tos, laringitis, reducción de la frecuencia respiratoria, jaqueca, náuseas y vómitos.
Ingestión	Vómitos, diarrea, quemaduras graves en la boca u órganos digestivos. Se puede detectar un envenenamiento por hierro en caso de orinar de color rosado.
Ojos	Visión borrosa, irritación, ardor, dolor y quemaduras graves.
Piel	Dermatitis, enrojecimiento, quemaduras.

Fuente: (Corporación Química Omega, 2017)

### 1.3 Fundamentos teóricos

Los circuitos impresos o PCB en la actualidad se han desarrollado hacia todos los campos de aplicación electrónica, las placas impresas se emplean para poner en contacto eléctrico a través de las pistas conductoras y brindar un soporte a los diferentes elementos de la tarjeta electrónica. Los circuitos PCB presentan ventajas como eliminar el cableado, reduciendo peso y volumen de la placa diseñada, eliminar errores de cableado además de mantener una disposición fija de los elementos.

Para proyectos de la universidad generalmente se usa el método tradicional, que es un proceso manual en el que se pega la tinta a la baquelita virgen mediante planchado y a continuación se le realiza un ataque químico a la zona no cubierta para que se desprenda el cobre de la misma, este método además de no ser automatizado y mantener tiempos de producción elevados, evidencia peligros ya que se realiza manipulación de elementos químicos como el ácido clorhídrico y cloruro

férrico que son contaminantes que pueden provocar irritaciones de la garganta, respiración jadeante entre otras afectaciones a bajos niveles, los síntomas empeoran al tratarse de exposiciones prolongadas, al llegar a medios acuáticos pueden producir cloruros que en caso de beberse en concentraciones elevadas pueden provocar diarreas.

En la actualidad las grandes industrias dedicadas a la manufactura de circuitos impresos utilizan procesos automatizados, utilizando diversas técnicas de fabricación conocidas. Estos equipos reducen significativamente en comparación al método tradicional los tiempos de operación, aumentan el volumen de producción y eliminan el factor del ataque químico del proceso manual, sin embargo los equipos existentes en el mercado alcanzan precios muy costosos por lo que no son una opción viable.

Dada la información presentada, se hace necesario el diseño de un sistema que pueda ejecutar de manera automática y con calidad el proceso de fabricación de los circuitos impresos, reduciendo riesgos ambientales, reduciendo el tiempo de fabricación de los mismos de una manera automatizada, eficiente y segura. El equipo router CNC a implementarse permitirá a los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas fabricar sus baquelitas PCB en menor tiempo que con el método tradicional por ataque químico, reduciendo los tiempos de producción y eliminando el riesgo ambiental generado por el uso del ácido.

#### **1.4 Alcance del proyecto**

El equipo trabajará a partir de un diseño previo de los circuitos PCB en un software CAD. El tamaño de las baquelitas no será superior a 200 x 200 mm, se contará con un manual de usuario para facilitar el uso del equipo a implementarse, adicionalmente una interfaz de usuario para poder comunicarse con el controlador. En la Tabla 3 se pueden identificar las características de desempeño técnicas del proyecto.

**Tabla 3***Especificaciones técnicas del proyecto*

<b>Especificaciones técnicas</b>	<b>Descripción</b>
Zona de trabajo (X Y Z)	200 mm x 200 mm x 30 mm
PCBs	Una capa (baquelita y fibra)
Precisión de posicionamiento	$\pm 0.1$ [mm]
Velocidad de rotación máx. (husillo)	8000 rpm
Velocidad X, Y (avance)	10 – 80 mm/s
Elementos de control	Tarjeta de control, drivers, panel de control/interfaz de usuario.
Actuadores	Motores a pasos (NEMA 17), servomotores y motor dc.
Elementos mecánicos	Estructura de soporte (mesa), estructura robot cartesiano (X, Y y Z), husillo.
Herramientas	Brocas punta de lanza para fresado y brocas para taladrado.

**1.4.1 Componentes mecánicos**

- Mecanismo de la mesa
- Mecanismo robot cartesiano
- Mecanismo para desbaste y perforación

**1.4.2 Componentes electrónicos**

- Sensores
- Actuadores
- Microcontrolador
- Driver de motores a pasos
- Fuente de poder
- Paro de emergencia
- Pulsadores

- Luces indicadoras

### **1.4.3 Software para implementación, análisis y simulación**

Para la parte mecánica se utilizará software CAD tanto para el modelado del equipo como para el análisis de esfuerzos y simulación de movimiento.

Para modelar y realizar los planos de las piezas a maquinar se usará un software de dibujo en 2D y modelado en 3D considerando las siguientes opciones: FreeCAD, Drafsight, etc.

Para el diseño de placas electrónicas y simulación de circuitos se utilizará un software que contenga los elementos a usarse en sus librerías, considerando utilizar Ares

Para generar código G, que son nuestros scripts de fabricación. Que indicarán por donde debe moverse y como deben girar los motores paso a paso, en nuestra área de trabajo, se considera utilizar CopperCAM, Mach3 o software libre como FlatCam o Inkscape.

Como software controlador de la CNC se considera utilizar Mach3 o software libre como Universal G Code Sender o GBRL Control.

## **1.5 Área de influencia**

El equipo beneficiará a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE ya que será planteado como proyecto de investigación, permitirá abordar temas de investigación como automatización y control, procesos de manufactura, diseño electrónico, etc.

El objetivo es beneficiar a la comunidad universitaria para poder realizar sus circuitos PCBs en menor tiempo, de manera más eficiente y ecológica debido a la eliminación del uso del ácido férrico en el método tradicional para los diferentes proyectos que se ejecutan por parte de las diferentes carreras del departamento.

## **1.5.1 Objetivos**

### **1.5.1.1 Objetivo general**

- Diseñar y construir un equipo CNC Router a través de la utilización de componentes mecánicos y electrónicos que permitan realizar fabricación y perforación de circuitos PCBs.

### **1.5.1.2 Objetivos específicos**

- Diseñar y construir una estructura cartesiana de tres grados de libertad utilizando sistemas CAD/CAM para trasladar el grabador en los ejes X, Y y Z.
- Controlar de manera automática el equipo mediante la generación de código G a partir del software de diseño electrónico.
- Realizar un equipo electrónico router CNC para la realización de circuitos PCB utilizando componentes de bajo costo para el laboratorio de instrumentación mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Verificar el funcionamiento del equipo a través de la realización de diversas pruebas para garantizar un óptimo funcionamiento.

## **1.6 Descripción general del proyecto**

El presente proyecto consiste en el Diseño y Construcción de un equipo router CNC para fabricación y perforación de circuitos PCBs; para lo cual se llevará a cabo:

- Diseño y construcción de la parte mecánica del equipo.
- Diseño y construcción de la parte electrónica del equipo.
- La programación y generación de código G a partir del diseño del circuito.
- Diseño de una interfaz y manual de usuario para el uso del equipo.
- Pruebas de funcionamiento y mejoramiento del equipo.



## 1.6.1 Componentes mecánicos

A continuación se detallan los elementos mecánicos:

### 1.6.1.1 Estructura de soporte.

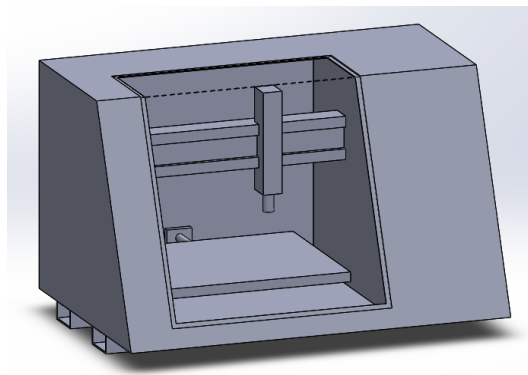
La estructura de soporte es el componente que alberga todos los demás elementos, básicamente consiste en la mesa donde se encontrará el área de trabajo para el efector final del robot cartesiano. Dentro de la mesa se encontrara los medios de sujeción de la baquelita virgen.

Adicionalmente brindará soporte para los mecanismos encargados de mover el spindle en los ejes X, Y y Z; y así desplazarse de acuerdo a las coordenadas que le envié el controlador.

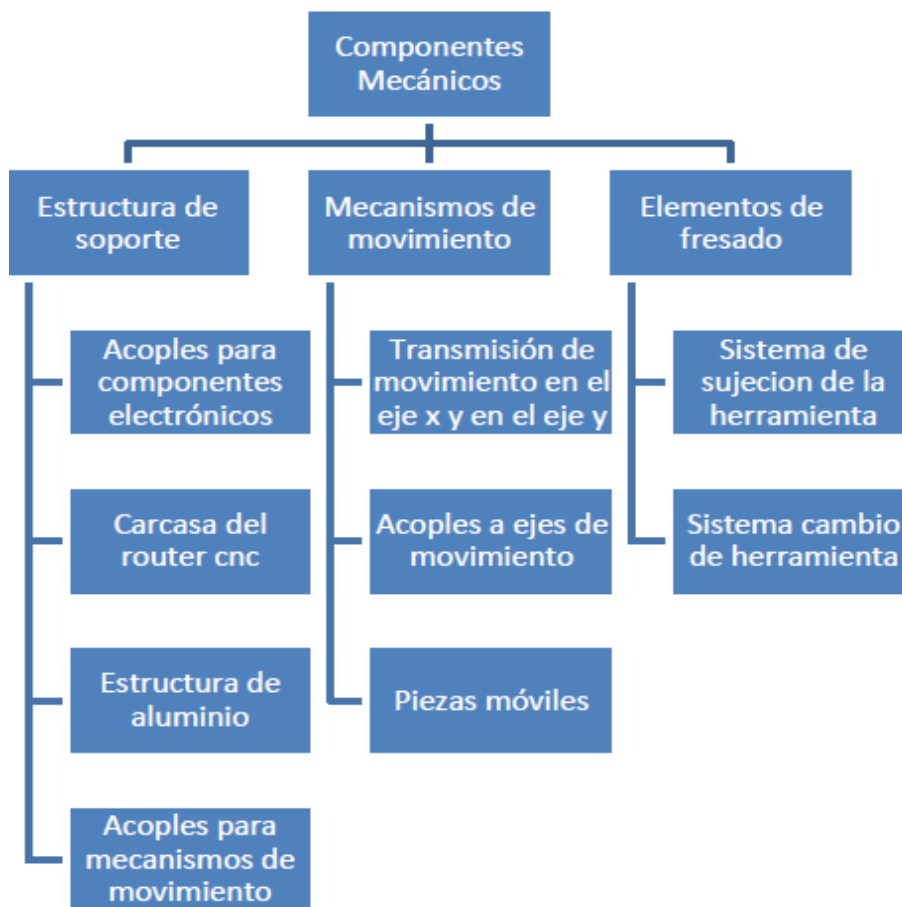
En la parte superior se encontrará la estructura de soporte específicamente para albergar al spindle que se encargara de realizar el desbaste en la superficie del material que se encuentre sobre la mesa.

Como parte de la estructura de soporte se encontrarán tres motores paso a paso con sus respectivos mecanismos que permitirán mover el actuador eléctrico que se encargara del desbaste, estos tres motores formarán una especie de robot cartesiano controlado numéricamente.

En la Figura 4 se observa un boceto del equipo a implementare, mientras que en la Figura 5 se muestra el diagrama de bloques de los componentes mecánicos.



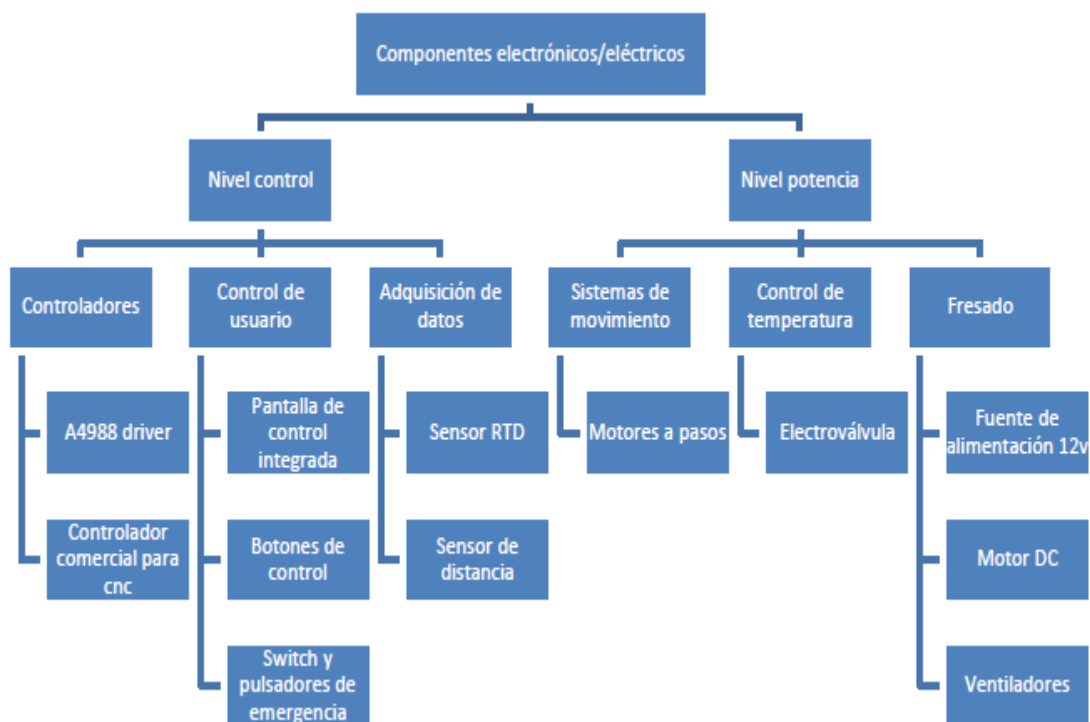
**Figura 4** Boceto de la propuesta del equipo a implementarse



*Figura 5* Diagrama de bloques de componentes mecánicos

### 1.6.2 Componentes electrónicos

A continuación se detallan los elementos a utilizar en la parte electrónica y eléctrica para adquisición y envío de señales al microcontrolador mediante el cual se gobernará el equipo router CNC. En la Figura 6 se muestra un diagrama de bloques de los componentes electrónicos y eléctricos que incluirá la máquina.



**Figura 6** Diagrama de bloques de componentes mecánicos

### 1.6.2.1 Nivel de control

- Controladores

El controlador se encargará de leer, interpretar las señales provenientes de los distintos sensores e interpretara el código G generado para el posicionamiento del efector final de nuestro actuador. Se plantea la posibilidad de usar los driver A4988 y el controlador comercial para CNC.

- Control de usuario

Panel de control físico con botones de control y de seguridad.

- Adquisición de datos

Se utilizarán fines de carrera para delimitar los espacios de la zona de trabajo.

### **1.6.2.2 Nivel de potencia**

- Sistema de movimiento

Sistema de actuadores que realizarán el movimiento de los ejes del equipo a través de la zona de trabajo. Se plantea la posibilidad de usar motores a pasos.

- Sistema de fresado, taladrado y herramientas

Se encargará de controlar el efector final, el cual permitirá el cambio de herramienta para las diferentes funciones del equipo ya sea fresado o taladrado.

- Circuito de potencia

Esta tarjeta se encargará de alimentar los actuadores que controlan los ejes X, Y y Z. Según el control que se implemente. Adicionalmente brindara potencia al motor encargado del desbaste.

### **1.6.2.3 Interfaz Usuario Máquina**

La comunicación entre el equipo y el usuario se facilitará con una interfaz que podrá ser física o virtual, de acuerdo al diseño que se establezca. Contará con un manual de usuario y disco con los programas que se implementen.

## CAPITULO II

### ESTADO DEL ARTE

En este capítulo del estado del arte se investiga el amplio contenido bibliográfico acerca de las tecnologías aplicadas en la fabricación de circuitos impresos además se establece una comparación entre los métodos investigados, así como también se describe las principales características que debe cumplir un equipo CNC para fabricación de PCBs, para finalmente establecer unas especificaciones objetivos de desempeño previas a la etapa de diseño.

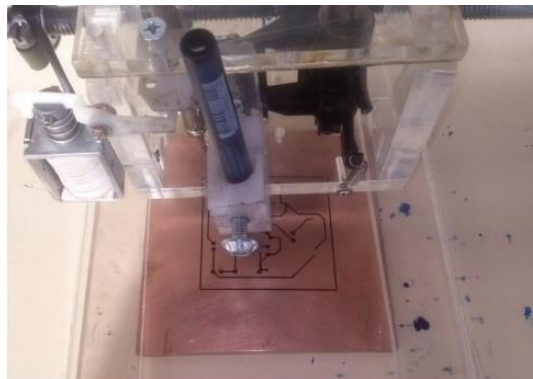
#### 2.1 Métodos para fabricación de PCBs

Las técnicas para fabricación de circuitos PCBs se pueden dividir en dos grupos principalmente: Elaboración de PCB mediante ataque químico y elaboración por máquinas automatizadas sin químicos.

##### 2.1.1 Métodos con Tinta indeleble

###### 2.1.1.1 CNC

Este método consiste en imprimir mediante un equipo de control numérico una tinta especial, formando las pistas del circuito PCB. Para posteriormente realizar el ataque químico.



**Figura 7** Circuito impreso desde el computador (Maquina Impresora)  
Fuente: (TITUAÑA, 2015)

### 2.1.1.2 Manual

Este proceso consiste en dibujar mediante un marcador con tinta indeleble de manera directa y a pulso las rutas de conexión sobre la placa virgen, esta tinta especial se adhiere a la superficie del cobre con el fin de evitar que este se desprenda en el siguiente paso con el ataque químico.



*Figura 8* Método manual aplicación de tinta indeleble.

Fuente: (Salas, 2017)

### 2.1.2 Método por planchado

Este método consiste en imprimir las pistas electrónicas en un papel especial llamado termotransferible y luego adherir al cobre mediante calor, generalmente se plancha en este método, una vez adheridas las pistas a la placa de cobre se procede a colocar la lámina de cobre en ácido férrico, este atacará químicamente a la plancha de cobre quedando únicamente a la vista las pistas que fueron cubiertas por el papel termotransferible con calor.

### 2.1.3 Método con cintas adherentes

En el método con cintas adherentes se da forma a las pistas del PCB adhiriendo cintas especiales que protegerán las zonas que se quiere evitar que se desprenda de la placa de cobre al momento de realizar el ataque químico.

### 2.1.4 Método por Fresado CNC

Como se ha venido indicando el método por fresado CNC evita la necesidad de realizar un ataque químico, convirtiéndolo en un método más limpio, quizás requiere una inversión mucho mayor pero eso se compensa con la reducción de tiempos de proceso y alta calidad.

Este método consiste en generar un código G a partir del diseño PCB, este código se pasa a una máquina de control numérico que posiciona a la fresa, eliminando el material innecesario y así formar las pistas de cobre.

A continuación en la siguiente tabla se presenta una comparativa de los principales métodos de fabricación de PCBs en la cual se asigna una calificación de 1 a 5; donde 1 es la menor calificación que representa un menor beneficio y 5 la más alta o mayor beneficio.

En la Tabla 4 se compara los diferentes métodos utilizados para fabricar PCB, teniendo como parámetros de calificación la economía, el tiempo, precisión, accesibilidad y el aspecto ambiental. Se puede observar en la misma tabla que el método por fresado CNC presenta mejores prestaciones que los demás métodos.

**Tabla 4**  
*Comparación de métodos de fabricación*

Métodos de fabricación		Factores					Suma Total
		Económico	Precisión	Tiempo	Accesibilidad	Ambiental	
Con ataque químico	Tinta indeleble	3	5	3	3	1	15
	Por planchado	4	3	1	4	1	13
	Cinta adherente	3	3	3	3	2	14
Sin ataque químico	Fresado CNC	2	5	5	3	4	19

De la Tabla 4 se puede concluir que el método sin ataque químico mediante fresado CNC presenta mayores ventajas en relación a los otros analizados principalmente por los factores de precisión, tiempo y el más inclusivo acorde a las nuevas tendencias el ambiental o ecológico.

## 2.2 Equipos para fabricación de PCBs mediante fresado CNC del mercado

El equipo fresador ProtoMat S103 de LPKF que se observa en la Figura 9 sirve para la fabricación de prototipos y placas pequeñas de circuitos PCBs, está especialmente enfocado al diseño de circuitos para aplicaciones de señales microondas y circuitos de alta frecuencia (HF). Puede trabajar con materia prima de sustratos blandos y flexibles debido a la limitación y control neumático. (LPKF, 2017)



**Figura 9** Máquina de prototipado para PCB ProtoMat S103.  
Fuente: (LPKF, 2017)

El equipo CNC 3040 para la elaboración de PCB de la Figura 10. Se controla desde un computador mediante el puerto paralelo o USB, este equipo utiliza código G y tiene una zona de trabajo efectiva de 370 (X) mm \* 280 (Y) mm \* 55 (Z) mm. Se conecta con un computador mediante puerto paralelo o USB. (China CNC Zone, 2017)





**Figura 10** Máquina CNC 3040  
Fuente: (China CNC Zone, 2017)

En la Figura 11 se muestra el equipo BUNGARD CC2MTC. Esta máquina de alta calidad permite rutear las pistas mediante un taladro. (POIROT, 2017)



**Figura 11** Equipo para fabricación de PCBs. Bungard CC2MTC.  
Fuente: (POIROT, 2017)

La Universidad Técnica del Norte en la facultad de Ingeniería en ciencias aplicadas en la carrera de Ingeniería en Mecatrónica, se llevó a cabo un proyecto de tesis de grado de título “Construcción de una máquina impresora de circuitos impresos para el laboratorio de automatización industrial de la carrera de ingeniería mecatrónica” en el que se plantea una máquina impresora de circuitos impresos, debido a la complejidad y gran demanda actual de la *fabricación*

de circuitos PCB, el equipo consta de dos grandes sistemas, el electrónico y el mecánico. (Tituaña, 2015)

El Laboratorio de Instrumentación Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas no cuenta al momento con este tipo de equipo que permita brindar este servicio y facilidades a sus estudiantes.

En la Tabla 5 se muestran una comparativa de las características de cada equipo mostrado anteriormente.

Es necesario mencionar que las máquinas ProtoMat103 y Bungard CCMTC son equipos de uso industrial diseñados para altos volúmenes de producción y de un costo de inversión mucho más elevado razón por la cual nuestra referencia va a ser la CNC 3040.

**Tabla 5**

*Especificaciones de equipos comerciales para fabricación de circuitos PCBs*

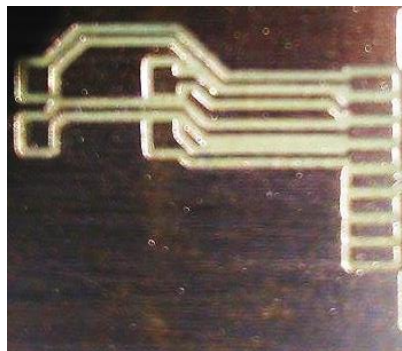
<b>Características</b>	<b>ProtoMat103</b>	<b>CNC 3040</b>	<b>BUNGARD CC2MTC</b>
Fabricante	LPKF	China CNC Zone	BUNGARD BFL
Zona de trabajo (X Y Z)	229 mm x 305 mm x 35/22 mm	275 mm x 385 mm x 55 mm	270 mm x 325 mm x 38 mm
Precisión	± 0,02 mm	0,03mm	± 0,02 mm
Velocidad de rotación máx. (husillo)	100000 rpm	8000 rpm	30000 - 63000 rpm
Velocidad de perforación	120 hoyos / min		300 hoyos/min
Velocidad X, Y	150 mm/s	5 - 15 mm /s	0,02 - 150 mm/s
Dimensiones	670 x 540 x 840 mm	620 x 580 x 480 mm	700 x 550 x 300 mm
Peso	60 Kg	28 Kg	30 Kg
Fuente de alimentación	90 - 240 V, 50 - 60 Hz, 450 W	110 V	110 - 240 V, 50 - 60 Hz, 1500 W
Accesorio necesario	Extracción de polvo, Computador	Computador	Computador

### 2.3 Trabajos realizados en el Ecuador

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en la facultad de Informática y Electrónica se desarrolló una máquina CNC para la fabricación de placas PCB con elementos SMD, proyecto de titulación denominado “Diseño e implementación de una máquina CNC para la fabricación de placas de circuito impreso para componentes SMD”, el cual utilizó una placa Arduino UNO R3 como tarjeta principal para el control, el software principal que utilizan para la generación de código G a partir de un diseño CAD es FlatCam, software de código abierto desarrollado por Python. En la Figura 12 se puede observar la máquina CNC. Por otra parte en la Figura 13 se muestra una placa elaborada por la máquina mencionada.



**Figura 12** Máquina CNC de fabricación de placas SMD  
Fuente: (GAIBOR & CARRION , 2015)



**Figura 13** Resultados de la utilización de la máquina CNC  
Fuente: (GAIBOR & CARRION , 2015)

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en la facultad de Mecánica se desarrolló una maquina CNC para la fabricación de placas PCB, proyecto de titulación denominado “Diseño y construcción de una máquina CNC de 3 ejes para el ruteo de pistas y taladrado de circuitos impresos (PCBs) por EMC2, aplicable en tarjetas de recuperación de PLCS”, el software EMC2 es un sistema basado en Linux para control numérico de máquinas que controla el movimiento de los ejes de la máquina, que interpreta el código G. En la Figura 14 se observa el prototipo final CNC.



**Figura 14** Máquina CNC de 3 ejes

Fuente: (Canga Perez & Lamiña Chicaiza , 2016)

## **2.4 Manufactura por fresado de PCBs**

Como se ha venido indicando el método de fresado CNC para elaboración de PCBs es muy utilizado en la actualidad por presentar varias ventajas a continuación se presentara aspectos importantes en la manufactura de PCBs, que se deben tener en cuenta para poder establecer las especificaciones objetivo de diseño como: normas y elementos de los PCBs, tipos de PCBs, secuencia de operaciones, tipos de PCBs y parámetros de corte recomendados.

### **2.4.1 Normas aplicables al diseño del equipo**

Las normas que serán un soporte para el diseño de nuestra máquina CNC son:

- Norma IPC2221 Estándares genéricos para Circuitos Impresos.
- ISO 6983 Estándares de código G.
- Catálogo para selección de guías lineales. (Techno, 2014)

## 2.4.2 Criterios de diseño PCB

A pesar de que nuestro equipo no aborda el tema del diseño electrónico de PCBs, debido a que el equipo partirá del diseño ya existente convirtiéndolo a código G como ya se ha expresado anteriormente, es necesario conocer ciertos términos y valores mínimos propios de las reglas de diseño para así poder hacer una selección de los diferentes parámetros de corte y herramientas a emplearse, a continuación se incluyen algunos términos con sus respectivos valores según la norma:

- Al hablar de diseño electrónico es importante conocer las unidades denominadas MIL ya que la mayoría de los programas de diseño usan estas unidades como se puede observar en la Figura 15.

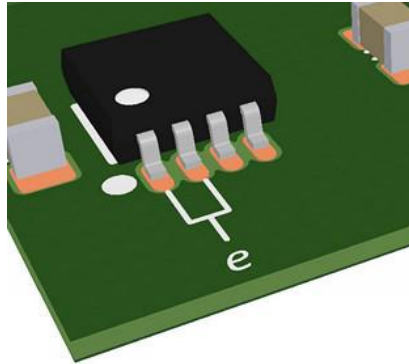
$$1'' = 25.4 \text{ mm}$$

$$1 \text{ MIL} = 1/1000'' = 0.001'' = 0.0254 \text{ mm}$$



**Figura 15** Unidades empleadas en los PCB  
Fuente: (Peter, 2018)

- El término pitch hace referencia a la distancia entre la línea céntrica de dos pines o pads de un mismo componente. En integrados THD el paso típico es de 2.54 mm, en componentes SMD el paso estándar es de 1.27 mm. En la Figura 16 se puede observar la representación de este término.



**Figura 16** Distancia pitch.  
Fuente: (Microensamble SAS, 2017)

- El término clearance hace referencia a la distancia mínima entre dos pistas con el propósito de evitar interferencias. El valor estándar recomendado para las pistas en PCBs de cobre es de 0.75 mm pudiendo ser mayor en caso de requerimientos de diseño pero no menor a los valores mínimos establecidos en la de la norma IPC-2221A.

A continuación en la Tabla 6 se presentan las distancias mínimas que deben tener las pistas de un circuito para diferentes valores de voltaje entre ellas, estos parámetros son importantes a considerar en el diseño de un circuito PCB y serán consideradas para definir el tamaño mínimo que se podrá fabricar con el equipo CNC.

- Trace Width representa el ancho de la pista como tal. Por norma se dice que los tamaños de clearance y trace width deben ser mayores que el tamaño de la broca, la norma IPC para diseño de circuitos electrónicos establece valores recomendados según la corriente que va a pasar por la pista, como se muestra en la Tabla 7

- *Track Width (Ancho de pista) para pistas PCB.*

**Tabla 6**

*Separación mínima entre pistas para diferentes voltajes.*

Voltaje entre Conductores DC o AC	Espacio Mínimo (mm)						
	Bare Board				Assembly		
	B1	B2	B3	B4	A5	A6	A7
0-15	0.05	0.1	0.1	0.05	0.13	0.13	0.13
16-30	0.05	0.1	0.1	0.05	0.13	0.25	0.13
31-50	0.1	0.6	0.6	0.13	0.13	0.4	0.13
51-100	0.1	0.6	1.5	0.13	0.4	0.5	0.13
101-150	0.2	0.6	3.2	0.4	0.4	0.8	0.4
151-170	0.2	1.25	3.2	0.4	0.4	0.8	0.4
171-250	0.2	1.25	6.4	0.4	0.4	0.8	0.8
251-300	0.2	1.25	12.5	0.4	0.4	0.8	0.8
301-500	0.25	2.5	12.5	0.8	0.8	1.5	0.8
>500	0.0025/V	0.005/V	0.025/V	0.00305/V	0.00305/V	0.00305/V	0.00305/V

Fuente: (IPC, 2013)

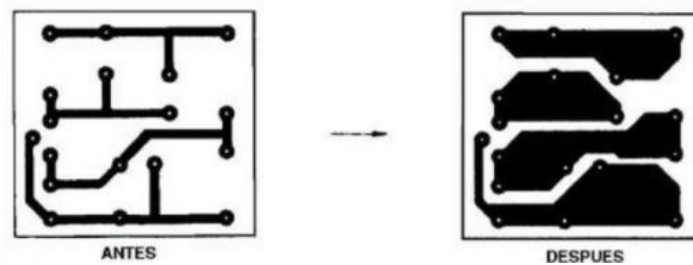
**Tabla 7**

*Track Width (Ancho de pista) para pistas PCB*

Corriente (A)	Ancho de pista (mil)	Ancho de pista (mm)
1	10	0.25
2	30	0.76
3	50	1.27
4	80	2.03
5	110	2.79
6	150	3.81
7	180	4.57
8	220	5.59

Fuente: (Electronics Project Design, 2017)

- Una de las opciones de diseño electrónico que puede ser muy importante para reducir tiempos de procesos, reducir el uso del equipo y alargar la vida útil de las herramientas de corte es el relleno de espacios vacíos, reduciendo el área que debe ser trabajada por la herramienta como se muestra en la Figura 17, adicionalmente ayuda a que las pistas conduzcan corrientes mayores y presenten menor resistencia.



**Figura 17** Relleno de espacios vacíos en PCBs.

Fuente: (Vásquez, 2017)

### 2.4.3 PCBs y sus características para mecanizado CNC

Las baquelitas que son la materia prima de la máquina para realizar un PCB están compuestas de dos capas; una capa conductora superficial y una capa aislante de base. La capa conductora generalmente es de un laminado de cobre, este metal es muy utilizado en la electrónica debido a sus buenas características de conductividad y maleabilidad. Los estándares para el espesor de cobre van desde 17.5, 35, 70 y 105 micras. Las PCB más comunes tienen 1.6 mm de espesor y un laminado de cobre de 35 micras (0.035 mm).

A continuación se muestran los diferentes tipos de PCBs según su tipo de capa aislante o sustrato, adicionalmente se muestran las características de cada placa para los procesos de mecanizado en una CNC.

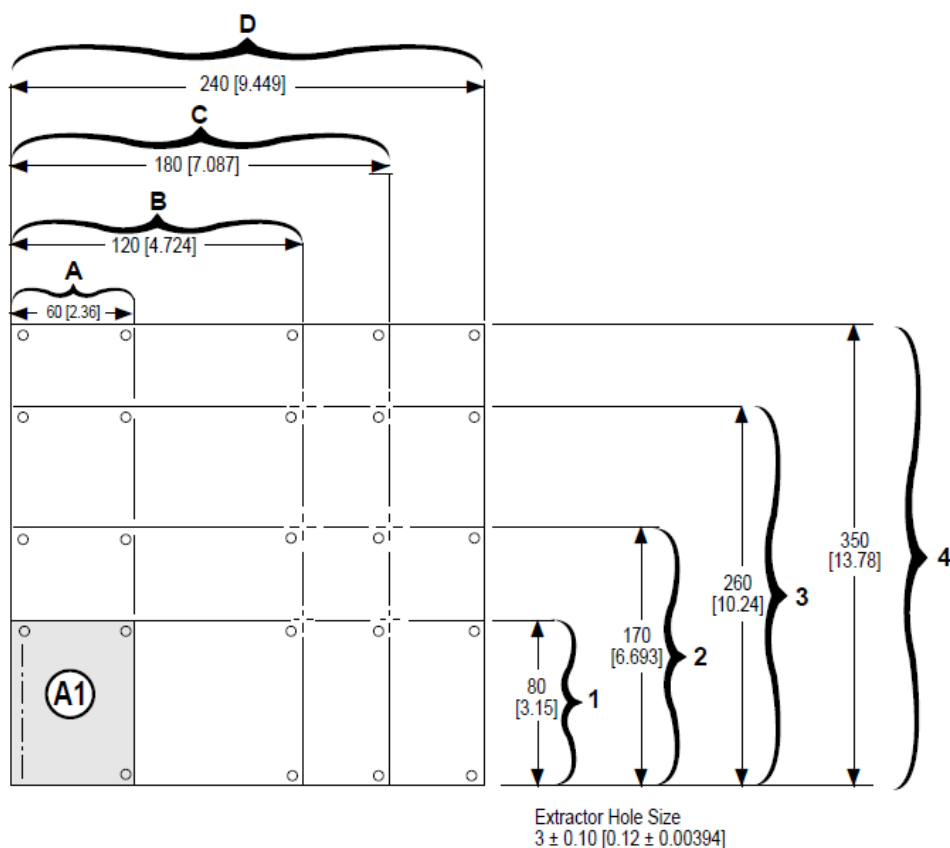
- FR-2 (Papel Fenólico/Baquelita) grabado, taladrado y fresado
- FR-3 (Papel Fenólico y Epoxi) grabado, taladrado y fresado



- FR-4 (Fibra de vidrio) grabado, taladrado y fresado
- CEM3 grabado, taladrado y fresado

Placas como la FR-2 no garantizan un buen acabado de fresado debido a sus propiedades mecánicas, la PCB recomendada para trabajos de mecanizado en CNC es la tipo CEM3 por su sustrato de baquelita con una fina película de fibra y una capa fina de cobre además produce menos desgaste de las herramientas por sus buenas propiedades mecánicas. (Bueno, 2005)

Otro aspecto importante a considerarse es el tamaño de los PCBs, para este punto se presenta la norma estandarizada para circuitos impresos denominada Eurocard. Como se muestra en la Figura 18 aumenta de 60 en 60 mm en el eje Y, y de 45.45 mm lo ancho.

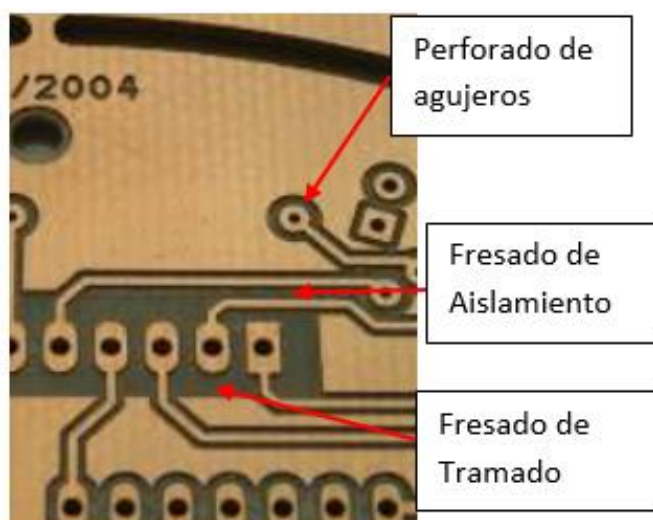


**Figura 18** Tamaños estándar para circuitos impresos según la norma IPC  
Fuente: (IPC, 2013)

El área de trabajo máxima será de 240x170 mm, con la facilidad de realizar placas de tamaños B1, B2, D2 para el equipo.

#### 2.4.4 Herramientas de corte y parámetros de corte

Existen diferentes herramientas de corte para trabajos a realizar en los PCBs, en la se muestran las diferentes operaciones que se pueden realizar y a continuación las herramientas propias para cada uno de ellos. Los procesos que se pueden realizar son fresado de aislamiento, fresado de tramado y perforado como se muestra en la Figura 19.



*Figura 19* Tipos de procesos a realizar

##### 2.4.4.1 *Tramado*

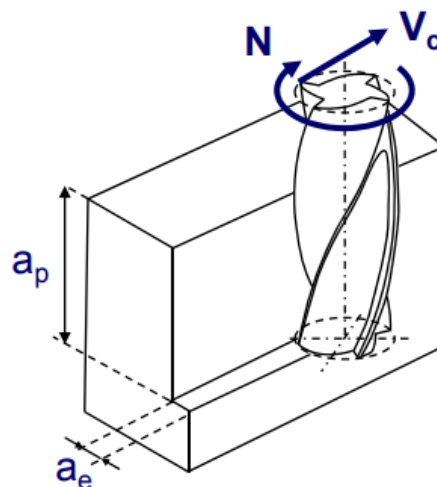
El tramado se lo realiza para retirar gran cantidad de cobre de la baquelita o la fibra, donde es recomendable usar fresas de punta plana y de esta manera reducir el número de pasadas para cubrir una mayor área de cobre, tomando en cuenta que si se utiliza una fresa de mayor diámetro se va a realizar menos pasadas pero los ángulos más agudos no podrán ser detallados. En la Figura 20 se puede observar el tipo de herramienta correspondiente a este proceso.



**Figura 20** Fresa punta plana de 2 flautas, zanco 1/8”  
Fuente: (Think & Tinker, 2017)

En la Figura 21 se pueden identificar los parámetros de corte para el proceso de manufactura, adicionalmente en la Tabla 8 se muestran los valores de los parámetros de corte para las herramientas de tramado.

Esta herramienta presenta una geometría de la punta con dos flautas para un corte más preciso y reducción de la vibración. En la Figura 22 se puede observar un acabado superficial con una combinación entre velocidad de rotación del spindle y de avance. Se puede notar que se tiene un mejor acabado en los bordes con los parámetros de la derecha.

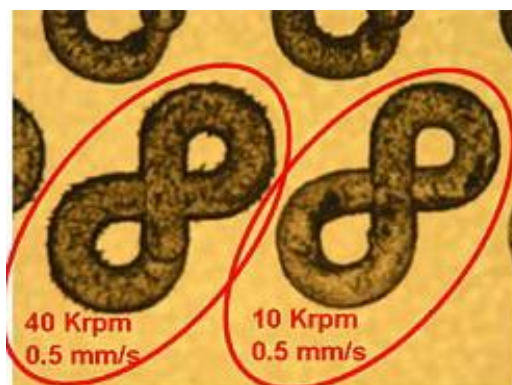


**Figura 21** Parámetros de corte para fresado.  
Fuente: (Think & Tinker, 2017)

**Tabla 8***Especificaciones recomendadas para tramado*

Zanco	3.18 mm (1/8")
Longitud	36.07 mm
Diámetros	0.6 mm
	2 mm
	3.2 mm
Profundidad de corte ( $a_p$ )	1.5D
RPM	10K – 40K
Avance	0.5 mm/s

Fuente: (Think &amp; Tinker, 2017)

**Figura 22** Acabado con diferentes RPM y un mismo avance.

Fuente: (MITS, 2017)

#### 2.4.4.2 Aislamiento

Este procedimiento consiste en realizar un contorno en los conductores de la placa impresa, obteniendo un área sin conductividad eléctrica, este método de aislamiento se utiliza para el contorno de pistas y pads. Este tipo de trabajo es realizado por fresas de tipo V tienen una alta resolución de corte y fuerza en la punta, de esta manera se asegura una remoción total del cobre, en la Figura 23 se muestra en ejemplo de esta herramienta. Las especificaciones de las brocas de punta en V están de acuerdo al espesor de la baquelita y al aislamiento que se lo va a realizar, es

importante revisar la profundidad de corte con estas brocas ya que el diámetro efectivo varía de acuerdo al valor que ingrese en Z hacia la PCB.



**Figura 23** Fresa CNC con punta en V (zanco 1/8", 30°)  
Fuente: (BangGood, 2017)

Es importante utilizar los parámetros adecuados. En el fresado de pistas se recomienda el uso de una broca en V a 60 grados esta herramienta varia su diámetro efectivo dependiendo de la profundidad que ingrese la punta en la baquelita, este diámetro efectivo se puede calcular con la Tabla 9, el valor recomendado en Z para perforación con este tipo de herramienta es de 0.015 mm.

**Tabla 9**

*Relación entre la profundidad de corte y el ancho de pista generado.*

Ángulo de la Herramienta	Ancho generado por cada 0.01 mm de penetración [mm]	Incremento en la profundidad requerido por cada 0.01 mm en el ancho [mm]
90°	0.02	0.005
60°	0.012	0.009
45°	0.008	0.012

Los parámetros de corte recomendados para esta operación se muestran en la Tabla 10 a continuación:

**Tabla 10***Especificaciones para aislamiento*

Geometría en V (Punta de lanza)	
Zanco	3.18 mm (1/8")
Longitud	38.1 mm
Máxima $\alpha_p$ según ángulo:	
30°	4.5 mm
45°	1.9 mm
60°	1.4 mm
90°	0.8 mm
RPM	2K - 60K
Máxima ( $\alpha_e$ ) FR4	0.25 mm

Fuente: (Think &amp; Tinker, 2017)

**2.4.4.3 Perforación**

Para la perforación se debe tomar en cuenta el elemento electrónico que estará en la placa PCB ya que de acuerdo a los terminales que este tenga dicho elemento, el diámetro de la broca cambiara. En la tabla 11 se muestran parámetros estándar recomendados para el taladrado de PCBs.

**Tabla 11***Especificaciones para el taladrado*

Zanco	3.18 mm (1/8")
Longitud	38.1 mm
Diámetros	0.2 - 6.35 mm
RPM	2K - 60K

Fuente: (Think &amp; Tinker, 2017)

Según (Díaz, 2015) los parámetros de corte ideales para fresado y perforado de PCBs dependen en gran parte del montaje del equipo, pero establece como valores estándares los que se muestran en la Tabla 12 a continuación.

**Tabla 12***Velocidades adecuadas para cada trabajo*

Trabajo	Velocidad de rotación	Velocidad de traslación X e Y
Fresado de pistas	Rápida	Rápida, 2.5 mm/s
Taladrado	Rápida	Lenta, 0.84 mm/s

Fuente: (Díaz, 2015)

## 2.5 Especificaciones objetivo del equipo

En base a las investigaciones realizadas y datos recolectados presentadas anteriormente finalmente se redefinen las especificaciones técnicas objetivo del equipo en la Tabla 13 a continuación:

**Tabla 13***Especificaciones objetivo del equipo*

Especificaciones técnicas	Descripción
Zona de trabajo (X Y Z)	240 mm x 170 mm x 30 mm
PCBs	Una capa (baquelita y fibra)
Precisión de posicionamiento	$\pm 0.1$ [mm]
Velocidad de rotación máx. (husillo)	12000 rpm
Velocidad X, Y (avance)	2 – 15 mm/s
Elementos de control	Tarjeta de control, drivers, panel de control/interfaz de usuario.
Actuadores	Motores a pasos (NEMA 17), servomotores y motor dc.
Elementos mecánicos	Estructura de soporte (mesa), estructura robot cartesiano (X, Y y Z), husillo.
Herramientas	Brocas punta de lanza para fresado y brocas para taladrado.

## CAPITULO III

### DISEÑO MECATRÓNICO

El capítulo presenta el despliegue de la función calidad (QFD) esta metodología permite diseñar productos que se adapten a las necesidades del usuario, relacionando las necesidades con sus respectivos aspectos técnicos de ingeniería, a partir de estos requerimientos se procede a realizar el diseño mecánico, eléctrico y electrónico del equipo CNC para fabricación y perforación de circuitos PCBs.

#### **3.1 Matriz de calidad**

##### **3.1.1 Definición de necesidades**

Las necesidades son requerimientos establecidos por el usuario, necesidades que permiten identificar los requerimientos funcionales que debe poseer el producto. Permitiendo realizar un diseño que genere satisfacción en el cliente en nuestro caso lo estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Se realizaron encuestas a treinta estudiantes con el objetivo determinar estas necesidades prioritarias para los futuros usuarios del equipo CNC.

En la Tabla 14 se muestran las necesidades que serán el punto de partida para identificar posibles mejoras en el diseño del equipo CNC, con el objetivo de encontrar varias alternativas realizables y elegir la opción que cumpla los requerimientos.



**Tabla 14***Requerimientos del usuario*

No.	Requerimientos del usuario
1	Que sea liviano
2	De fácil operación y mantenimiento
3	Pistas generadas en el cobre sean uniformes
4	Agradable a la vista
5	Que sea pueda lograr precisión en la realización de los agujeros y pistas
6	Que sea bajo costo
7	Que brinde seguridad al ser manipulado
8	Que el movimiento del spindle sea preciso para lograr realizar placas de calidad

**3.1.2 Definición de características técnicas**

Para determinar las métricas necesarias para llevar de diseño se realizó la elaboración de la matriz QFD, la misma que recoge las expectativas de los clientes y las traduce a características técnicas y operativas satisfactorias. Después de haber analizados las necesidades del usuario, se puede establecer un lenguaje técnico para cada requerimiento como se muestra en la Tabla 15.

**Tabla 15***Características Técnicas*

No.	Características técnicas
1	Tipo de motor (traslación X,Y, Z)
2	Carcaza de protección
3	Motor Spindle
4	Selección de parámetros de corte
5	Dimensiones
6	Peso de materiales
7	Fácil acoplamiento entre piezas.
8	Acabado superficial máquina

A continuación en la Tabla 16 se presenta la matriz QFD desarrollada para el diseño de la máquina CNC para fabricación y perforación de circuitos PCBs.

### 3.1.3 QFD

**Tabla 16**  
*Matriz QFD*

				<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Legend</th> </tr> <tr> <td>⊙</td> <td>Muy Relacionado</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>○</td> <td>Correlacionado</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>▲</td> <td>Poco Relacionado</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>++</td> <td>Strong Positive Correlation</td> <td></td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>Positive Correlation</td> <td></td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>Negative Correlation</td> <td></td> </tr> <tr> <td>▼</td> <td>Strong Negative Correlation</td> <td></td> </tr> <tr> <td>▼</td> <td>Objective Is To Minimize</td> <td></td> </tr> <tr> <td>▲</td> <td>Objective Is To Maximize</td> <td></td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>Objective Is To Hit Target</td> <td></td> </tr> </table>								Legend		⊙	Muy Relacionado	9	○	Correlacionado	3	▲	Poco Relacionado	1	++	Strong Positive Correlation		+	Positive Correlation		-	Negative Correlation		▼	Strong Negative Correlation		▼	Objective Is To Minimize		▲	Objective Is To Maximize		X	Objective Is To Hit Target	
Legend																																											
⊙	Muy Relacionado	9																																									
○	Correlacionado	3																																									
▲	Poco Relacionado	1																																									
++	Strong Positive Correlation																																										
+	Positive Correlation																																										
-	Negative Correlation																																										
▼	Strong Negative Correlation																																										
▼	Objective Is To Minimize																																										
▲	Objective Is To Maximize																																										
X	Objective Is To Hit Target																																										
				<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Columna #</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Dirección de mejora</th> </tr> <tr> <td colspan="2">Minimizar (▼), Maximizar (▲), No aplica (x)</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>7</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>▲</td> <td>▲</td> <td>▲</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>▲</td> <td>X</td> <td>X</td> </tr> </table>								Columna #		Dirección de mejora		Minimizar (▼), Maximizar (▲), No aplica (x)		1	2	3	4	5	6	7	8	▲	▲	▲	X	X	▲	X	X										
Columna #																																											
Dirección de mejora																																											
Minimizar (▼), Maximizar (▲), No aplica (x)																																											
1	2	3	4	5	6	7	8																																				
▲	▲	▲	X	X	▲	X	X																																				
Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Requerimientos de cliente	Requerimientos funcionales	Weight / Importance	1	2	3	4	5	6	7	8																													
1	9	15.2	5.0	Movimiento del spindle sea preciso para lograr realizar placas de calidad	Traslación X,Y,Z	5	⊙		○	⊙	▲																																
2	9	15.2	5.0	Que brinde seguridad al ser manipulado	Carcasa de protección	5	○	⊙	○				○																														
3	9	15.2	5.0	Que se pueda lograr precisión en la realización de los agujeros y pistas	Motor spindle	5	⊙		⊙	○	▲																																
4	9	15.2	5.0	Pistas generadas en el cobre sean uniformes	Selección de parámetros de corte	5	○		○	⊙																																	
5	9	12.1	4.0	Que sea de bajo costo	Dimensiones	4	○	○	○		⊙	○	○	○																													
6	9	9.1	3.0	Que sea liviano	Peso de materiales	3	▲	▲	▲		⊙	⊙	▲																														
7	9	9.1	3.0	De fácil operación y mantenimiento	Fácil acoplamiento entre piezas	3	▲	▲	▲				⊙																														
8	9	9.1	3.0	Agradable a la vista	Acabado superficial máquina	3	▲	⊙	▲		○			⊙																													
				Max Relationship Value in Column			9	9	9	9	9	9	9	9																													
				Weight / Importance			427.3	272.7	336.4	318.2	248.5	118.2	172.7	118.2																													
				Relative Weight			21.2	13.6	16.7	15.8	12.3	5.9	8.6	5.9																													

### 3.1.4 Análisis de resultados de la matriz QFD

Una vez analizados todos los requerimientos del usuario mediante la matriz QFD, se determina el nivel de importancia de las características técnicas del diseño a través del porcentaje de ponderación, como se muestra en la Tabla 17.

**Tabla 17**  
*Resultados matriz QFD*

	<b>Característica técnica</b>	<b>Porcentaje de aprobación</b>
1	Traslación X,Y,Z	21.20%
2	Motor spindle	16.70%
3	Selección de parámetros de corte	15.80%
4	Carcasa de protección	13.60%
5	Dimensiones	12.30%
6	Fácil acoplamiento entre piezas	8.60%
7	Peso de materiales	5.90%
8	Acabado superficial máquina	5.90%

### 3.1.5 Diseño según criterios de la matriz QFD

Una vez determinadas las características técnicas más importantes se procede a determinar las posibilidades para implementar los diseños. Considerando los siguientes módulos que se muestran en la Tabla 18 para el diseño del equipo CNC.

**Tabla 18**  
*Módulos para el diseño*

<b>Módulo</b>	<b>Característica</b>	<b>Función</b>
1	Traslación X,Y,Z	Determina el tipo de motor y el mecanismo a utilizar para el movimiento X,Y,Z
2	Motor spindle	Determina el tipo de husillo a utilizar
3	Selección de parámetros de corte	Determina los parámetros de corte ideales óptimos para el proceso de manufactura
4	Carcasa de protección	Determina el material para la construcción de la carcasa

En los módulos de diseño se consideró también el tipo de partes que se iba a realizar.

- Módulo 1: Traslación X, Y, Z.

Para este módulo se considera la selección del actuador y el sistema mecánico que conformarían el mecanismo de translación X, Y, Z. En las Tablas 19 y 20 se muestra las comparaciones y el orden de selección para cada uno.

**Tabla 19**

*Módulo 1 Tipo de motor de translación X, Y, Z (actuador)*

Opciones	Costo	Tamaño	Orden de selección
Motor a pasos	Alto	Medio	1
Motor DC	Medio	Alto	2
Servomotor	Bajo	Medio	3

**Tabla 20**

*Módulo 1 Mecanismo de translación X, Y, Z (Sistema mecánico)*

Opciones	Precisión	Costo	Lubricación	Orden de selección
Husillo de Bolas	+/-0.05 mm por cada 300 mm de largo	Medio	No necesita	1
Tornillo de potencia	+/-0.21 mm por cada 300 mm de largo	Bajo	Si necesita	2

Fuente: (Specialty Motions, Inc, 2014)

- Módulo 2: Motor spindle

**Tabla 21**

*Módulo 2 (Motor spindle)*

Opciones	Complejidad de control	Costo	Orden de selección
Motor DC	Baja	Bajo	1
Motor AC	Alta	Alto	2

- Módulo 3: Selección de parámetros de corte

Dentro de la selección de parámetros de corte no se tiene opciones de diseño ya que se deben seleccionar las adecuadas para el tipo de proceso de manufactura y material a trabajar estas

se seleccionarán y justificarán en el capítulo de diseño mecánico más adelante, sin embargo de toda la información revisada anteriormente se puede comparar las opciones que se muestran en la Tabla 22 correspondientes a la velocidad del spindle.

**Tabla 22**

*Módulo 3 (Velocidad spindle RPM)*

Opciones	RPM	Costo	Variador de Frecuencia	Orden de selección
Motor DC	12000	Bajo	No	1
Motor AC	24000	Alto	Si	2

(Konmison, 2017)

- Módulo 4: Carcasa de protección

**Tabla 23**

*Módulo 4 Carcasa de protección*

Opciones	Costos de manufactura	Resistencia a golpes	Orden de selección
Acrílico	Baja	Media	1
Vidrio	Media	Baja	2

### 3.1.6 Conclusiones del listado de métricas

A continuación se muestra en la Tabla 24 el listado de métricas a considerar en el desarrollo del proyecto.

**Tabla 24**

*Listado de métricas*

Característica	Métrica
Mecanismo de traslación X,Y,Z	Husillo de bolas
Motor de traslación X,Y,Z	Motor a pasos
Motor spindle	Motor DC
Carcasa de protección	Acrílico

### 3.1.7 Evaluación de los resultados

- Con los resultados obtenidos se plantea construir la máquina con materiales livianos y resistentes, siendo los actuadores enfocados a tener la mayor precisión en la elaboración de la PCB.
- Se utilizará un husillo de bolas como mecanismo de traslación X, Y, Z debido a la baja fricción que produce el mecanismo, alta eficiencia mecánica de alrededor del 90% con el fin de alargar la vida útil del equipo.
- Debido a los altos costos de implementación de un motor AC se utilizará un motor DC que cumpla con las especificaciones técnicas de trabajo.
- Para seguridad en la manipulación del equipo se implementará una carcasa de acrílico.

## 3.2 Diseño Mecánico

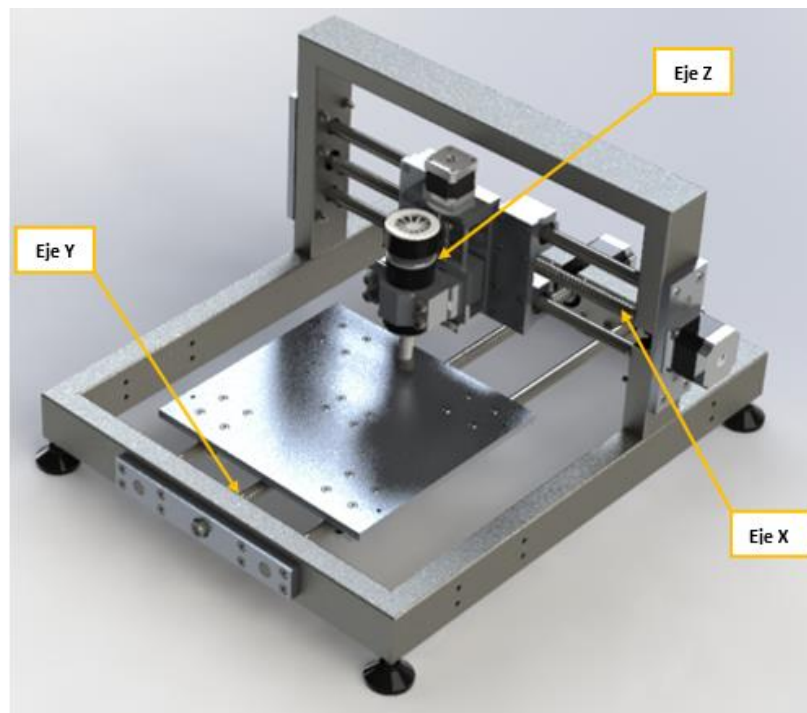
En esta sección se describe los cálculos desarrollados para la selección de ejes, husillos de bolas, torque y potencia de motores.

### 3.2.1 Esquema general

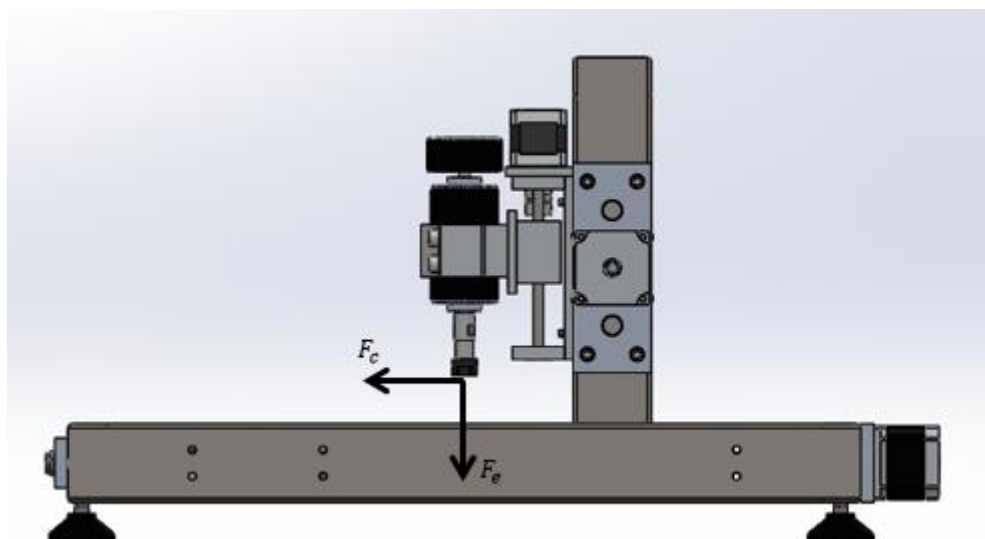
En el esquema de la Figura 24 se muestran los subsistemas en los que se dividió la máquina dependiendo de cada eje de movimiento considerando los siguientes:

- Subsistema Eje X
- Subsistema Eje Y
- Subsistema Eje Z

Por otra parte en la Figura 25 se muestra el diagrama de cuerpo libre global del equipo CNC, en el cual se puede notar las fuerzas de corte y empuje que se analizarán más adelante, la acción del peso de la estructura que genera reacciones sobre las 4 patas del equipo.



*Figura 24* Esquema Máquina CNC



*Figura 25* Diagrama de cuerpo libre general

### 3.2.2 Potencia del motor portaherramientas

A partir de los parámetros de corte (para fresado y taladrado) se calcula el torque y la potencia mínima necesaria del motor.

### 3.2.2.1 Parámetros de corte para fresado

La potencia de corte es la energía que se necesita para remover material de la placa por medio de la rotación de la herramienta. Para el fresado se presentan las siguientes ecuaciones:

$$pc = \frac{pa * pr * vf * kc}{60 * 1000} \quad (3.1)$$

**pc** = potencia de corte de fresado [W]

**vf** = velocidad de avance [mm/min]

**kc** = fuerza específica de corte [N/mm<sup>2</sup>]

**pa** = profundidad axial de fresado [mm]

**pr** = profundidad radial de fresado [mm]

- Velocidad de avance **V<sub>f</sub>** [mm/min]

$$V_f = f * n \quad (3.2)$$

$$n = \frac{1000 * Vc}{\pi * d} \quad (3.3)$$

$$f = fz * z \quad (3.4)$$

**n** = velocidad de rotación de la herramienta [rpm]

**vc** = velocidad corte superficial [m/min]

**vc** = 30 m/min (Tibanta, 2018)

**d** = diámetro de la herramienta [mm]

**f** = avance [mm/rev]

**fz** = avance por diente para fresado frontal [mm/ diente]



$z = \text{número de dientes de la herramienta [diente/rev]}$

Del catálogo (Techno, 2014) se selecciona el avance por diente para una herramienta de diámetro de 1mm, como se observa en la Figura 26.

Size	Diameter	Feed	Speed	Retract	Z-Axis-Offset	Max-Hits	Chipload	SFM
	(inch)	(Inches/min)	(k-rpm)	(inches/min)	(inches)		(mils/rev)	
0.10mm	0.0040	20	80	200	-0.011	500	0.25	84
0.13mm	0.0050	23	80	300	-0.011	600	0.29	105
0.15mm	0.0059	27	80	300	-0.011	800	0.34	124
#96	0.0063	30	80	400	-0.011	800	0.38	132
#95	0.0067	33	80	400	-0.012	800	0.41	140
#94	0.0071	37	80	500	-0.012	1000	0.46	149
#93	0.0075	40	80	500	-0.012	1000	0.50	157
#92	0.0079	43	80	500	-0.012	1200	0.54	165
#91	0.0083	47	80	600	-0.012	1200	0.59	174
#90	0.0087	50	80	600	-0.012	1200	0.63	182
#89	0.0091	53	80	700	-0.012	1500	0.66	190
#88	0.0095	57	80	700	-0.012	1500	0.71	199
0.25mm	0.0098	60	80	800	-0.012	1500	0.75	205
#87	0.0100	61	80	800	-0.012	1500	0.76	209
#86	0.0105	65	80	800	-0.012	1500	0.81	220
#85	0.0110	68	80	900	-0.013	1700	0.85	230
#84	0.0115	71	80	900	-0.013	1700	0.89	241
0.30mm	0.0118	73	80	1000	-0.013	1700	0.91	247
#83	0.0120	75	80	1000	-0.013	1800	0.94	251
#82	0.0125	78	80	1000	-0.013	1800	0.98	262
#81	0.0130	81	80	1000	-0.013	1800	1.01	272
#80	0.0135	87	80	1000	-0.013	2000	1.09	283
0.35mm	0.0138	87	80	1000	-0.013	2000	1.09	289
#62	0.0380	180	60	1000	-0.019	2000	3.00	600
#61	0.0390	177	59	1000	-0.019	2000	3.00	600
1.00mm	0.0394	174	58	1000	-0.019	2000	3.00	600
#60	0.0400	171	57	1000	-0.019	2000	3.00	600
#59	0.0410	168	56	1000	-0.020	2000	3.00	600
1.05mm	0.0413	168	56	1000	-0.020	2000	3.00	600
#58	0.0420	165	55	1000	-0.020	2000	3.00	600
#57	0.0430	159	53	1000	-0.020	2000	3.00	600
1.10mm	0.0433	159	53	1000	-0.020	2000	3.00	600
1.15mm	0.0453	153	51	1000	-0.021	2000	3.00	600

**Figura 26** Avance por revolución para una fresa con punta en V (zanco 1/8", 30°)

Fuente: (BangGood, 2017)

$$f = 3 \frac{\text{mils}}{\text{rev}} * \frac{0.0254 \text{ mm}}{1 \text{ mils}} = 0.0762 \frac{\text{mm}}{\text{rev}}$$

A partir de la ecuación 3.4 se calcula el avance por diente para fresado frontal [mm/diente].

$$f = fz * z$$

$$\frac{f}{z} = fz$$

$$fz = \frac{f}{z} = \frac{0.0762}{2} = 0.0381 \text{ mm/diente}$$

- Espesor medio de la viruta  $hm$  [mm]

$$hm = \frac{2 * fz * pr}{d * \text{acos} \left( 1 - \frac{2 * pr}{d} \right)} \quad (3.5)$$

$fz$  = avance por diente para fresado frontal [mm/diente]

$pr$  = profundidad radial de fresado [mm]

$d$  = diámetro de la herramienta [mm]

- Fuerza específica de corte  $kc$  [ $N/mm^2$ ]

$$kc = kc1 * hm^{-zc} \quad (3.6)$$

$kc1$  = fuerza específica de corte

$hm$  = promedio del grosor de la viruta [mm]

$zc$  = factor de corrección

- Profundidad de corte radial  $a_e$  [mm]

$$a_e = \frac{3}{4} D_e \quad (3.7)$$

$D_e$  = Diámetro de corte (mm)

- Fuerza de corte  $fc$  [N]

$$f_c = k_c * a_c \quad (3.8)$$

$$a_c = h_m * p_a \quad (3.9)$$

**$k_c$**  = fuerza específica de corte  $N/mm^2$

**$a_c$**  = área de corte ( $mm^2$ )(sección de la viruta)

**$h_m$**  = promedio del grosor de la viruta [mm]

**$p_a$**  = profundidad axial de fresado [mm]

- Par de corte  $m_c$  [ $N * mm$ ]

$$m_c = \frac{p_a * p_r * f * k_c}{2 * \pi} \quad (3.10)$$

**$p_a$**  = profundidad axial de fresado (mm)

**$p_r$**  = profundidad radial de fresado (mm)

**$f$**  = avance [mm/rev]

**$k_c$**  = fuerza específica de corte [ $N/mm^2$ ]

- Potencia de corte  $p_c$  [W]

$$p_c = \frac{p_a * p_r * v_f * k_c}{60 * 1000} \quad (3.11)$$

- Potencia eléctrica del motor  $p_e$  [W]

$$p_e = \frac{100 * p_c}{\eta_e} \quad (3.12)$$

**$p_c$**  = potencia de corte

$n_e = \text{eficiencia eléctrica del motor}$

- Potencia eléctrica mínima aceptable del motor  $p_{ef}$  [W]

$$p_{ef} = p_e * f_s \quad (3.13)$$

$p_e = \text{potencia eléctrica del motor}$

$f_s = \text{factor seguridad}$

A continuación en la Tabla 25 se resumen todos los parámetros de entrada que servirán para calcular los parámetros de trabajo para el fresado.

**Tabla 25**

*Parámetros de entrada para cálculos del Fresado*

Parámetros de corte	Datos	Unidades
Velocidad de corte (Vc)	30	m/min
Avance (f)	0.0762	mm/rev
Número de diente (z)	2	dientes
Diámetro de la herramienta (d)	1	mm
Profundidad radial (pr)	0.75	mm
Profundidad axial (pa)	0.15	mm
Kc1	1400	N/mm <sup>2</sup>
zc	0.15	
Eficiencia del motor	80%	
Factor de seguridad	1.5	

Fuente: (Arévalo & Hermosa, 2014)

Con las ecuaciones detalladas anteriormente y los parámetros de entrada anteriores finalmente se obtienen los parámetros de trabajo para el fresado los cuales se resumen en la Tabla 26.

**Tabla 26**  
*Resultados Fresado*

Parámetros de corte	Datos	Unidades
Velocidad de Rotación de la Herramienta (n)	9549.29	rpm
Avance por diente (fz)	0.0381	mm/diente
Velocidad o tasa de avance (Vf)	727.66 (12.12)	mm/min (mm/s)
Par de corte (Mc)	3.28	Nmm.
Área de corte (ac)	0.0041	mm <sup>2</sup>
Espesor medio de viruta (hm)	0.03	mm
Constante de proporcionalidad de fuerza (kc)	2402.89	N/mm <sup>2</sup>
Fuerza de corte (fc)	9.84	N
Potencia de corte (pc)	3.28	W
Potencia eléctrica necesaria del motor (pe)	4.09	W
Potencia eléctrica final necesaria del motor (pef)	6.15	W

### 3.2.2.2 Parámetros de corte para taladrado

Para el taladrado se presentan las siguientes ecuaciones:

$$n = \frac{Vc * 1000}{\pi D} \quad (3.14)$$

$n$  = Velocidad de rotación de la herramienta [rpm]

$Vc$  = Velocidad de corte superficial [m/min]

$d$  = diámetro de la herramienta [mm]

- Velocidad de avance vf [mm/min]

$$vf = f * n \quad (3.15)$$

$f$  = avance[mm/rev]

$fz$  = avance por dientes para fresado frontal [m/diente]

$z$  = Número de dientes de la herramienta [diente/rev]

- La fuerza axial de empuje en el taladrado está dada por T:

$$T = 11.4 * k * d * (100 * f)^{0.85} [N] \quad (3.16)$$

$k$  = factor del material

$d$  = diámetro (mm)

$vf$  = Avance [mm/min]

$n$  = Velocidad de rotación [rpm]

$f$  = avance [mm/rev]

- Potencia de corte para taladrado está dada por:

$$pc = \frac{1.25 * d^2 * k * n * (0.056 + 1.5 * f)}{100} \quad (3.17)$$

- Potencia eléctrica del motor  $pe$  [W]

$$pe = \frac{100 * pc}{n_e} \quad (3.18)$$

$pc$  = potencia de corte

$n_e$  = eficiencia eléctrica del motor

- Potencia eléctrica mínima aceptable del motor  $pef$  [W]

$$pef = pe * fs \quad (3.19)$$

$pe$  = potencia eléctrica del motor

$fs$  = factor seguridad

En la Tabla 27 se muestran los parámetros de entrada para los cálculos del taladrado.

**Tabla 27**

*Parámetros de entrada Taladrado*

Parámetros de corte	Datos	Unidades
Velocidad de corte ( $V_c$ )	30	m/min
Avance ( $f$ )	0.0762	mm/rev
Número de diente ( $z$ )	2	
Diámetro de la herramienta ( $d$ )	1	mm
Eficiencia del motor	80%	
Factor de seguridad	1.5	mm

Fuente: (Arévalo & Hermosa, 2014)

En la Tabla 28 se muestran los parámetros de trabajo para el proceso de taladrado de una placa PCB. Los cálculos se realizaron para el uso de una herramienta de 1 mm de diámetro.

**Tabla 28**

*Resultados Taladrado*

Parámetros de corte	Datos	Unidades
Velocidad de Rotación de la Herramienta ( $n$ )	9549.29	rpm
Avance por diente ( $f_z$ )	0.0381	mm/diente
Velocidad o tasa de avance ( $V_f$ )	727.66	mm/min
Fuerza de Corte o de Empuje ( $T$ )	38.43	N
Potencia de Corte ( $pc$ )	12.19	W
Potencia eléctrica necesaria del motor ( $pe$ )	15.25	W
Potencia eléctrica final necesaria del motor ( $pef$ )	22.87	W

### 3.2.2.3 Potencia eléctrica mínima del motor del portaherramientas

De los cálculos realizados se obtuvieron los siguientes valores:

- Potencia de fresado: 6.15 W

- Potencia de taladrado: 22.87 W
- Velocidad de corte: 9549.29 rpm

Se selecciona un motor cuya potencia nominal sea mayor a 22.87 W por lo cual se seleccionó el motor con las siguientes especificaciones de la Tabla 29. Es el motor de menor potencia comercial que cumple con la especificación de alta velocidad más de 10.000 rpm.

**Tabla 29**

*Características spindle*

Voltaje de Funcionamiento	110 VAC
Potencia	500 W
Velocidad	12000 rpm
Torque	5000 g-cm
Resistencia de aislamiento	>2 MΩ
Diámetro	52 mm
Longitud del motor	200 mm
Precisión eje	0.01 – 0.03

Fuente: (AliExpress, 2018)

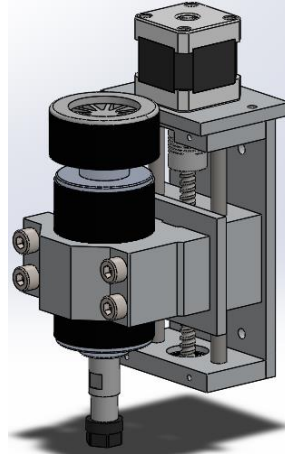
### 3.2.3 Diseño mecánico de cada subsistema

Se realiza el análisis de las fuerzas resultantes para el caso de taladrado y fresado para cada subsistema considerando la fuerza axial (taladrado) y la fuerza de corte (fresado) obtenidos en los parámetros de corte. Se calcula el diámetro mínimo del eje a partir del momento flector máximo. Con dicho valor se calcula el momento de inercia y la deflexión máxima de cada eje a fin de garantizar el adecuado desempeño de la estructura. Se realiza la selección del husillo de bolas a partir de la longitud y diámetro del eje. A continuación se realiza el cálculo del torque necesario para el movimiento de cada eje a fin de seleccionar el motor adecuado.



### 3.2.3.1 Dimensionamiento del diámetro del eje Z

A continuación en la Figura 27 se muestra el esquema del subsistema del eje Z.



*Figura 27* Esquema subsistema eje Z

#### 3.2.3.1.1 Cálculo de las fuerzas Resultantes

Se requiere calcular el momento flector máximo al que está expuesto el eje para ello se realiza el análisis de las fuerzas resultantes sobre los ejes a partir del valor de las fuerzas que actúan sobre la herramienta que son las siguientes:

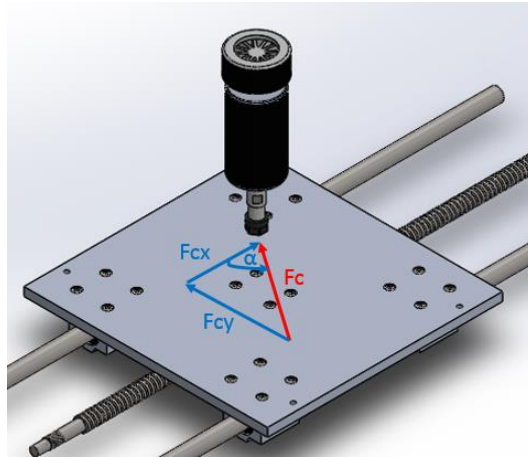
$L_{zt}$ : Carga total vertical en el taladrado

$L_{zf}$ : Carga total vertical en el fresado

$F_{cx}$ : Fuerza de corte paralela al eje x

$F_{cy}$ : Fuerza de corte paralela al eje y

Se considera en el ruteado de pistas en un circuito impreso que se pueda requerir el mecanizado de alguna pista que forme un ángulo  $\alpha$  con el plano XY como se analiza en la Figura 28, lo que permite calcular cada componente de la fuerza de corte en los ejes X e Y respectivamente.



**Figura 28** Componentes de la fuerza de corte en el plano XY

Para el cálculo de las fuerzas resultantes y análisis de carga se parte de los datos de la Tabla 30 hacen referencia a los elementos de la Figura 27. Por tal razón se debe entender que a partir de los tamaños para las baquelitas seleccionados en las especificaciones objetivo se parte de un esquema 3D dimensionado de manera que tenga los recorridos necesarios.

**Tabla 30**

*Parámetros fuerzas resultantes eje Z*

Parámetro	Representación	Valor	Unidad
Longitud de las guías	$L_o$	120	mm
Masa del motor	$W_m$	1.368	kg
Masa de la estructura que sujeta el motor	$W_e$	0.32	kg
Fuerza de empuje	$F_a$	38.43	N

$$L_{zt} = F_a + W_m + W_e \quad (3.20)$$

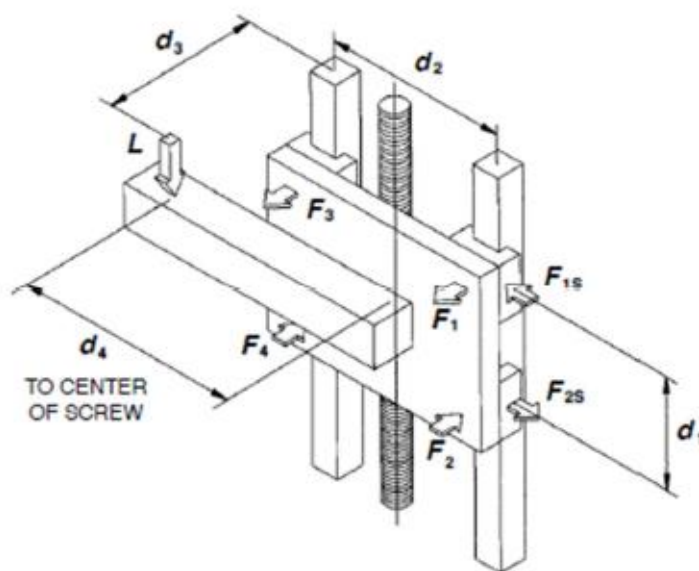
$$L_{zt} = 38.43 + 1.368 * 9.8 + 0.32 * 9.8 = 54.97 \text{ N}$$

$$L_{zf} = W_m + W_e \quad (3.21)$$

$$L_{zf} = 1.368 * 9.8 + 0.32 * 9.8 = 16.54 \text{ N}$$

- **Taladrado**

Las fuerzas se calculan a partir del diagrama de cuerpo libre de la Figura 29 y las fórmulas catálogo H835 de la empresa Techno inc. (Techno, 2014).



**Figura 29** Fuerza eje Z para carga vertical taladrado  
Fuente: (Techno, 2014)

**Tabla 31**

Carga total vertical en el taladrado eje Z

TALADRADO		
Parámetro	Valor	Unidad
$d_1=d_{z1}$	25	mm
$d_2=d_{z2}$	50	mm
$d_3=d_{z31}$	56.6	mm
$d_4=d_{z41}$	0	mm

Para la Figura 29 se utilizan las ecuaciones 3.22 ,3.23, 3.24 y 3.25 descritas en el catálogo.

Como se puede notar estas ecuaciones analizan las cargas a partir de las distancias entre los puntos de apoyo y ejes del eje Z.

$$F_1 = F_3 = \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right) \quad (3.22)$$

$$F_2 = F_4 = -\frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right) \quad (3.23)$$

$$F_{1s} = F_{3s} = \frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.24)$$

$$F_{2s} = F_{4s} = -\frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.25)$$

La fuerza  $L_{zt}$  es una reacción siendo de signo negativo. Las fuerzas resultantes para ambos ejes o guías son iguales y sus ecuaciones son:

$$F_{zt13} = -\frac{L_{zt}}{2} \left( \frac{d_{z31}}{d_{z1}} \right) \quad (3.26)$$

$$F_{zt13} = -\frac{54.97 \text{ N} (56.6 \text{ mm})}{2} \left( \frac{25 \text{ mm}}{25 \text{ mm}} \right)$$

$$F_{zt13} = -62.22 \text{ N}$$

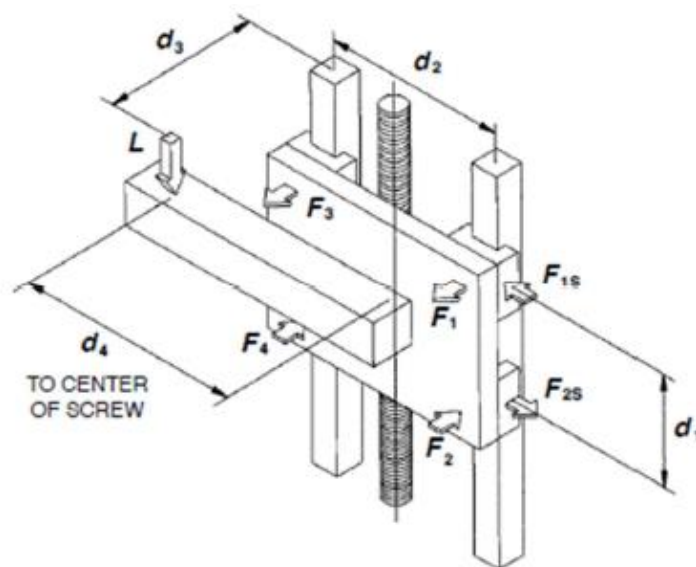
$$F_{zt24} = -F_{zt13} \quad (3.27)$$

$$F_{zt24} = 62.22 \text{ N}$$

- **Fresado**

A fin de considerar las componentes de la fuerza de corte en el cálculo para el caso de fresado de pistas de circuito impreso se realizó una modificación de los nombres de las fórmulas del catálogo y se utilizó como referencia las Figuras 30, 31 y 32 donde se muestran las fuerzas que actúan sobre las guías del eje Z

Fuerza vertical



**Figura 30** Fuerza eje Z para carga vertical fresado  
Fuente: (Techno, 2014)

**Tabla 32***Carga total vertical en el fresado eje Z*

FRESADO		
Parámetro	Valor	Unidad
$d_1=d_{z1}$	25	mm
$d_2=d_{z2}$	50	mm
$d_3=d_{z31}$	56.6	mm
$d_4=d_{z41}$	0	mm

Se utilizan para la Figura 30 las mismas ecuaciones descritas en el catálogo para la Figura 29. En este caso la fuerza  $L_{zf}$  se aplica en el sentido que esta dibujado L porque no es una reacción.

$$F_{zp13} = \frac{L_{zf}}{2} \left( \frac{d_{z31}}{d_{z1}} \right) \quad (3.28)$$

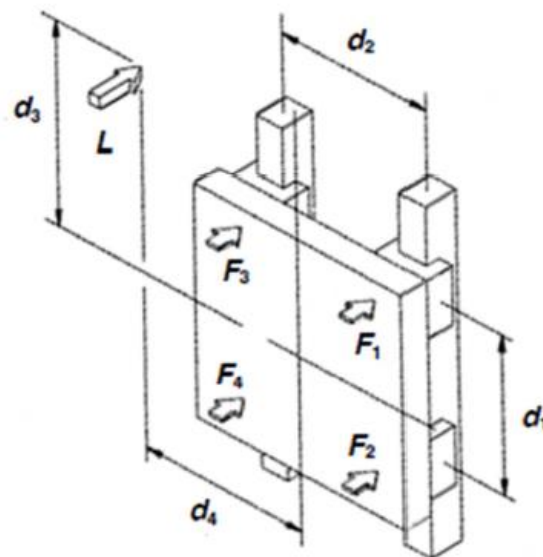
$$F_{zp13} = \frac{16.54 \text{ N}}{2} \left( \frac{56.6}{25} \right)$$

$$F_{zp13} = 18.73 \text{ N}$$

$$F_{zp24} = -F_{zp13} \quad (3.29)$$

$$F_{zp24} = -18.73 \text{ N}$$

Fuerza normal

**Figura 31** Fuerza normal

Fuente: (Techno, 2014)

**Tabla 33***Distancias fuerza normal eje Z*

FRESADO		
Parámetro	Valor	Unidad
$d_1=d_{z1}$	25	mm
$d_2=d_{z2}$	50	mm
$d_3=d_{z32}$	60	mm
$d_4=d_{z42}$	0	mm

Las ecuaciones para la Figura 31 descritas en el catálogo se muestran a continuación:

$$F_1 = \frac{L}{4} - \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} + \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.30)$$

$$F_2 = \frac{L}{4} + \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} + \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.31)$$

$$F_3 = \frac{L}{4} - \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} - \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.32)$$

$$F_4 = \frac{L}{4} + \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} + \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.33)$$

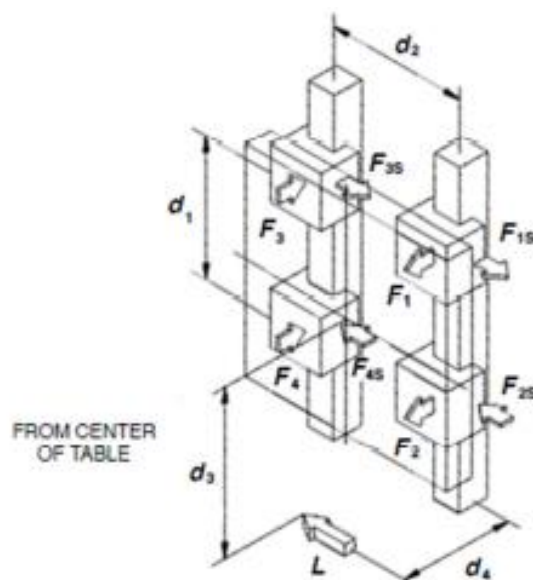
Las Fuerzas  $F_{zn13}$  y  $F_{zn24}$  están en el sentido de X negativo por lo que se debe considerar el signo.

$$F_{zn13} = - \left[ \frac{F_{cx}}{4} - \frac{F_{cx}}{2} \left( \frac{d_{z32}}{d_{z1}} \right) \right] \quad (3.34)$$

$$F_{zn24} = - \left[ \frac{F_{cx}}{4} + \frac{F_{cx}}{2} \left( \frac{d_{z32}}{d_{z1}} \right) \right] \quad (3.35)$$

A continuación se analizará la fuerza lateral.

## Fuerza lateral



**Figura 32** Fuerza lateral

Fuente: (Techno, 2014)

**Tabla 34**

*Distancias fuerza lateral eje Z*

FRESADO		
Parámetro	Valor	Unidad
$d_1=d_{z1}$	25	mm
$d_2=d_{z2}$	50	mm
$d_3=d_{z32}$	60	mm
$d_4=d_{z42}$	0	mm

Las ecuaciones para la Figura 32 descritas en el catálogo se muestran a continuación:

$$F_1 = F_2 = \frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.36)$$

$$F_3 = F_4 = -\frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.37)$$

$$F_{1s} = F_{3s} = \frac{L}{4} + \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right) \quad (3.38)$$

$$F_{2s} = F_{4s} = \frac{L}{4} - \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right) \quad (3.39)$$

A continuación en las ecuaciones 3.40, 3.41, 3.42 y 3.43 se muestran las fuerzas resultantes.

$$F_{zl12} = \frac{F_{Cz}}{2} \left( \frac{d_{z43}}{d_{z2}} \right) \quad (3.40)$$

$$F_{zl34} = -\frac{F_{Cz}}{2} \left( \frac{d_{z43}}{d_{z2}} \right) \quad (3.41)$$

$$F_{zls13} = \frac{F_{Cz}}{4} - \frac{F_{Cz}}{2} \left( \frac{d_{z33}}{d_{z1}} \right) \quad (3.42)$$

$$F_{zls24} = -\left( \frac{F_{Cz}}{4} - \frac{F_{Cz}}{2} \left( \frac{d_{z33}}{d_{z1}} \right) \right) \quad (3.43)$$

### Fuerza Resultantes

Las fuerzas resultantes de fresado en los puntos 1, 2, 3, y 4 se muestran en las ecuaciones 3.44, 3.45, 3.46 y 3.47.

- Punto 1

$$F_{zz1}(\alpha) = F_{zp13} + F_{zn13} + F_{zl12} \quad (3.44)$$

$$F_{zz1}(\alpha) = \frac{L_{zf}}{2} * \frac{d_{z31}}{d_{z1}} - f_c * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left( \frac{d_{z32}}{d_{z1}} \right) \right] + f_c * \sin(\alpha) * \frac{1}{2} \left( \frac{d_{z43}}{d_{z2}} \right)$$

$$F_{zz1}(\alpha) = \frac{16.54}{2} * \frac{56.6}{25} - f_c * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left( \frac{60}{25} \right) \right] + f_c * \sin(\alpha) * \frac{1}{2} \left( \frac{56.6}{50} \right)$$

$$F_{zz1}(\alpha) = 18.72 - 9.84 * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left( \frac{60}{25} \right) \right] + 9.84 * \sin(\alpha) * \frac{1}{2} \left( \frac{56.6}{50} \right)$$

$$F_{zz1}(\alpha) = 18.72 + 9.348 \cos(\alpha) + 5.57 * \sin(\alpha)$$

$$F_{zz1s}(\alpha) = F_{zls13} \quad (3.45)$$

$$F_{zz1s}(\alpha) = f_c * \sin(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left( \frac{d_{z33}}{d_{z1}} \right) \right]$$



$$F_{zz1s}(\alpha) = 9.84 * \sin(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left( \frac{60}{25} \right) \right]$$

$$\mathbf{F}_{zz1s}(\alpha) = -\mathbf{9.348} * \sin(\alpha)$$

- Punto 2

$$F_{zz2}(\alpha) = F_{zp}24 + F_{zn}24 + F_{zl}12 \quad (3.46)$$

$$F_{zz2}(\alpha) = -18.72 - f_c * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left( \frac{60}{25} \right) \right] + f_c * \sin(\alpha) * \frac{1}{2} \left( \frac{56.6}{50} \right)$$

$$F_{zz2}(\alpha) = -18.72 - 9.84 * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left( \frac{60}{25} \right) \right] + 9.84 * \sin(\alpha) * \frac{1}{2} \left( \frac{56.6}{50} \right)$$

$$\mathbf{F}_{zz2}(\alpha) = -\mathbf{18.72} - \mathbf{14.27} \cos(\alpha) + \mathbf{5.57} * \sin(\alpha)$$

$$F_{zz2s}(\alpha) = F_{zls}24 \quad (3.47)$$

$$F_{zz2s}(\alpha) = - \left[ f_c * \sin \left( \alpha * \frac{\pi}{180} \right) \right] * \left[ \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left( \frac{d_{z33}}{d_{z1}} \right) \right]$$

$$F_{zz2s}(\alpha) = -9.84 * \sin(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left( \frac{60}{25} \right) \right]$$

$$\mathbf{F}_{zz2s}(\alpha) = -\mathbf{14.27} * \sin(\alpha)$$

- Punto 3

$$F_{zz3}(\alpha) = F_{zp}13 + F_{zn}13 + F_{zl}34 \quad (3.48)$$

$$F_{zz3}(\alpha) = \frac{L_{zf}}{2} * \frac{d_{z31}}{d_{z1}} - f_c * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left( \frac{d_{z32}}{d_{z1}} \right) \right] - f_c * \sin(\alpha) * \frac{1}{2} \left( \frac{d_{z43}}{d_{z2}} \right)$$

$$F_{zz3}(\alpha) = 18.72 - f_c * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left( \frac{60}{25} \right) \right] - f_c * \sin(\alpha) * \frac{1}{2} \left( \frac{56.6}{50} \right)$$

$$F_{zz3}(\alpha) = 18.72 - 9.84 * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left( \frac{60}{25} \right) \right] - 9.84 * \sin(\alpha) * \frac{1}{2} \left( \frac{56.6}{50} \right)$$

$$\mathbf{F}_{zz3}(\alpha) = \mathbf{18.72} + \mathbf{9.348} \cos(\alpha) - \mathbf{5.57} * \sin(\alpha)$$

$$\mathbf{F}_{zz3s}(\alpha) = \mathbf{F}_{zz1s}(\alpha)$$

$$\mathbf{F}_{zz3s}(\alpha) = -\mathbf{9.348} * \sin(\alpha)$$

- Punto 4

$$F_{zz4}(\alpha) = F_{zp24} + F_{zn24} + F_{zl34} \quad (3.49)$$

$$F_{zz4}(\alpha) = -\frac{L_{zf}}{2} * \frac{d_{z31}}{d_{z1}} - f_c * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left( \frac{d_{z32}}{d_{z1}} \right) \right] - f_c * \sin(\alpha) * \frac{1}{2} \left( \frac{d_{z43}}{d_{z2}} \right)$$

$$F_{zz4}(\alpha) = -18.72 - f_c * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left( \frac{60}{25} \right) \right] - f_c * \sin(\alpha) * \frac{1}{2} \left( \frac{56.6}{50} \right)$$

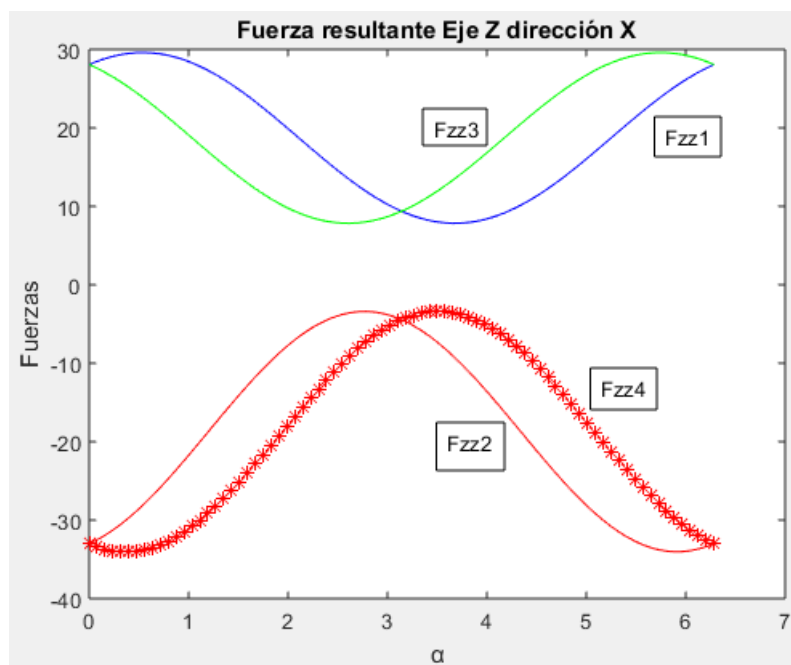
$$F_{zz4}(\alpha) = -18.72 - 9.84 * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left( \frac{60}{25} \right) \right] - 9.84 * \sin(\alpha) * \frac{1}{2} \left( \frac{56.6}{50} \right)$$

$$F_{zz4}(\alpha) = -18.72 - 14.27 \cos(\alpha) - 5.57 * \sin(\alpha)$$

$$F_{zz4s}(\alpha) = F_{zz2s}(\alpha) = -14.27 * \sin(\alpha) \quad (3.50)$$

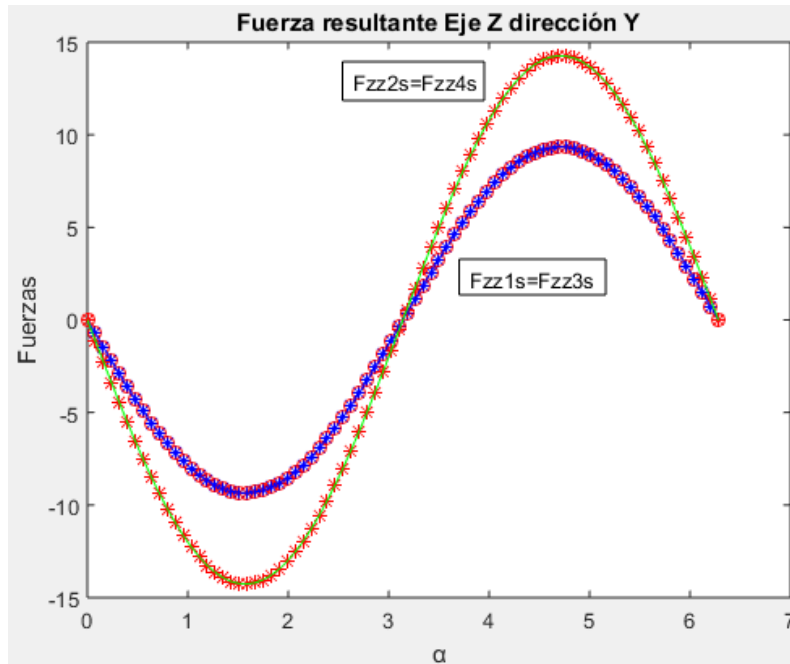
La Figura 33 muestra la fuerza resultante en las guías lineales del eje z en dirección X.

Como se puede observar las guías están sometidas a esfuerzos cíclicos.



**Figura 33** Fuerza resultante guías lineales eje Z dirección X

La Figura 34 muestra la fuerza resultante en las guías lineales del eje z en dirección Y.



**Figura 34** Fuerza resultante guías lineales eje Z dirección Y

### 3.2.3.1.2 Cálculo del momento flector máximo

Se presentan los diagrama de fuerzas resultantes  $F_b$ ,  $F_c$ ,  $F_f$  y  $F_g$  de las Figuras 35 y 37, para el cálculo del momento flector máximo.

- Cálculo del momento flector máximo plano XZ

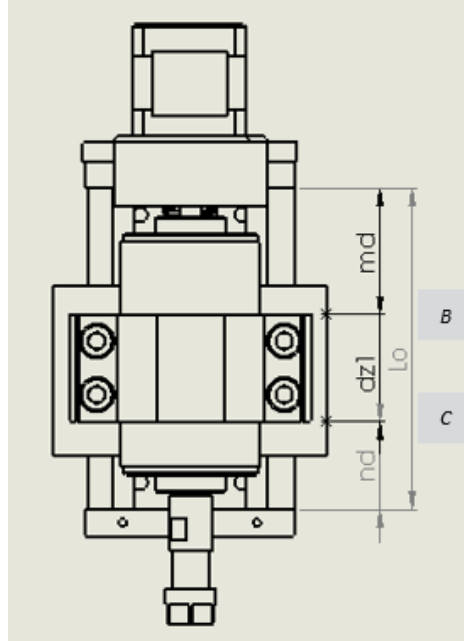
En la Figura 35 se muestra el esquema de fuerzas presentes en el eje z del plano XZ.



**Figura 35** Esquema fuerzas plano XZ eje Z

- Distancias

En la Figura 36 se muestra las distancias relacionadas a la Figura 35. La distancia  $m_d$  es variable, pues el rodamiento lineal se desplaza a lo largo del eje.



**Figura 36** Esquema fuerzas plano XZ eje Z

$$\frac{d_{z1}}{2} \leq m_d \leq L_o - \frac{3d_{z1}}{2} \quad (3.51)$$

$$n_d = L_o - d_{z1} - m_d \quad (3.52)$$

En la Tabla 35 se muestran nuestras distancias medidas a partir del diseño CAD inicial de la Figura 36.

**Tabla 35**

*Datos entrada cálculo momentos eje Z*

$m_d$	52.73 mm
$d_{z1}$	14.54 mm
$n_d$	52.73 mm
$L_o$	120 mm

- Reacciones

$$R_d = \frac{F_b * m_d + F_c * (m_d + d_{z1})}{L_o} \quad (3.53)$$

$$R_a = F_b + F_c - R_d \quad (3.54)$$

- Fuerza Cortante

$$V_a = -R_a \quad (3.55)$$

$$V_b = V_a + F_b \quad (3.56)$$

$$V_c = V_b + F_c \quad (3.57)$$

$$V_d = V_c - R_d \quad (3.58)$$

- Momento Flector

$$M_a = 0 \quad (3.59)$$

$$M_b = M_a + V_a * m_d \quad (3.60)$$

$$M_c = M_b + V_b * d_{z1} \quad (3.61)$$

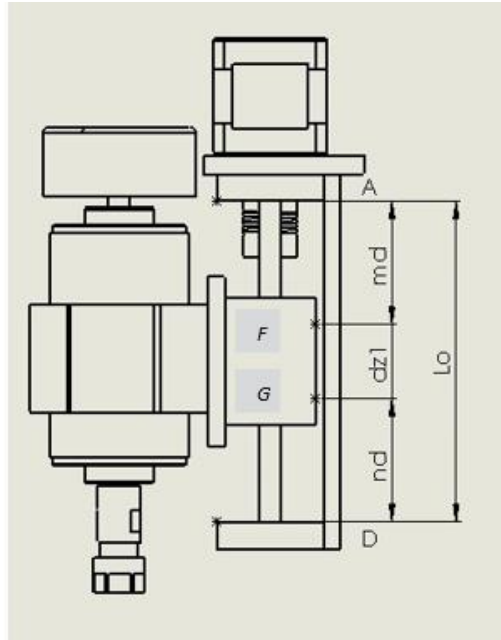
$$M_d = M_c + V_c * n_d \quad (3.62)$$

- **Cálculo momento flector máximo YZ**

En la Figura 37 se muestra el esquema de fuerzas presentes en el eje z del plano YZ. Mientras que en la Figura 38 se puede observar de donde se obtienen la distancias para el plano YZ.



**Figura 37** Esquema fuerzas plano YZ eje Z



**Figura 38** Esquema fuerzas plano YZ eje Z

- Reacciones

$$R_h = \frac{F_f * m_d + F_g * (m_d + d_{z1})}{L_o} \quad (3.63)$$

$$R_e = F_f + F_g - R_h \quad (3.64)$$

- Fuerza Cortante

$$V_e = -R_e \quad (3.65)$$

$$V_f = V_e + F_f \quad (3.66)$$

$$V_g = V_e + F_g \quad (3.67)$$

$$V_h = V_g - R_h \quad (3.68)$$

- Momento Flector

$$M_e = 0 \quad (3.69)$$

$$M_f = M_e + V_e * m_d \quad (3.70)$$

$$M_g = M_f + V_f * d_{z1} \quad (3.71)$$

$$M_h = M_g + V_g * n_d \quad (3.72)$$

- Momento flector máximo

A continuación se detallan los momentos resultantes, puesto que el punto B y F se encuentran a la misma posición, al igual que los puntos C y G, se obtiene dos momentos resultantes.

$$M_{z1} = \sqrt{(M_f)^2 + (M_b)^2} \quad (3.73)$$

$$M_{z2} = \sqrt{(M_g)^2 + (M_c)^2} \quad (3.74)$$

Con los valores de  $m_d$ ,  $d_{z1}$ ,  $n_d$ , y  $L_o$  se realiza el cálculo de las reacciones, fuerzas cortantes y momentos flectores, cuyos resultados se muestra en la Tabla 36.

**Tabla 36**

*Resultados reacciones, fuerzas cortantes y momentos flectores eje Z*

Reacciones	Fuerza cortante		Momento flector	
$R_a$	-7.54 N	$V_a$ 7.54 N	$M_a$	0 N mm
$F_b$	-62.23 N	$V_b$ -54.69 N	$M_b$	397.59 N mm
$F_c$	62.23 N	$V_c$ 7.54 N	$M_c$	-397.59 N mm
$R_d$	7.54 N	$V_d$ 0	$M_d$	$6.25 \cdot 10^{-13}$ N mm

Se procede a realizar el cálculo del momento flector máximo para los 3 casos que se detallan a continuación, a fin de escoger el más crítico.

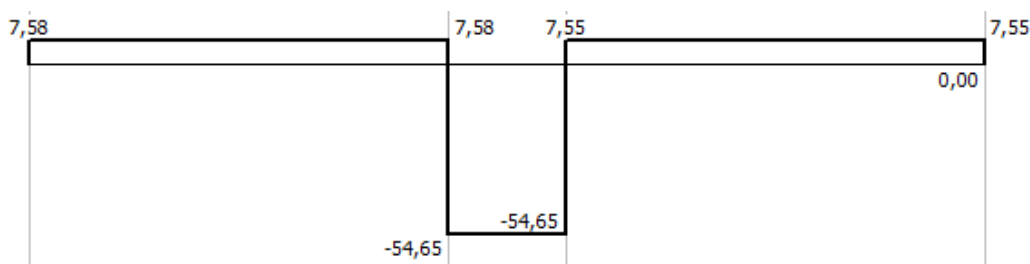
**Tabla 37**

*Casos para cálculo momentos eje Z*

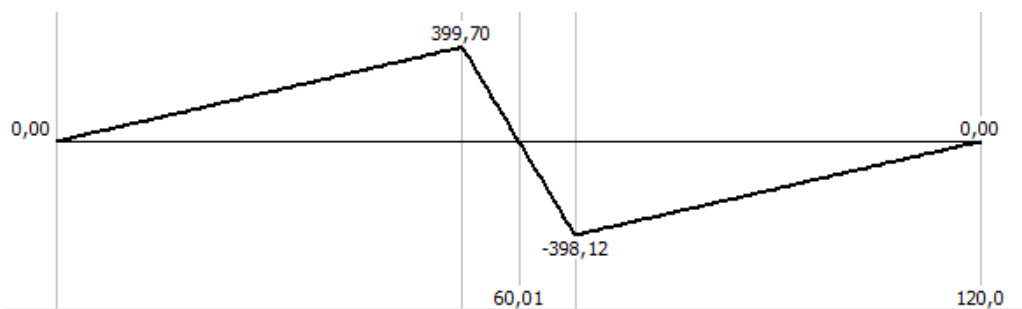
Caso 1: Taladrado	Caso 2: Fresado eje X	Caso 3: Fresado eje Y
$F_b = F_{zt13}$	$F_b = F_{zz1}$	$F_b = F_{zz3}$
$F_c = F_{zt24}$	$F_c = F_{zz2}$	$F_c = F_{zz4}$
$F_f = 0$	$F_f = F_{zz1s}$	$F_f = F_{zz3s}$
$F_g = 0$	$F_g = F_{zz2s}$	$F_g = F_{zz4s}$
$M = 397.58 \text{ Nmm}$	$M = 179.37 \text{ Nmm}$	$M = 179.37 \text{ Nmm}$

Como se observa en la Tabla 37 es momento flector máximo del eje Z es de 397.58 Nmm, valor que se utilizará para el cálculo del diámetro.

A continuación en las Figura 39 y 40 se muestra el diagrama de las fuerzas cortantes y momentos flectores del eje Z.



**Figura 39** Diagramas fuerzas cortantes eje Z



**Figura 40** Diagramas momentos flectores eje Z

### 3.2.3.1.3 Cálculo del diámetro

Basados en el momento flector máximo calculado, se realiza el dimensionamiento del diámetro del eje aplicando las ecuaciones de diseño de elementos de máquinas considerando un factor de seguridad de 2.5 para el diseño. El valor de la resistencia a la fluencia  $S_y$  fue seleccionado correspondiente al material usado para los ejes.



**Tabla 38***Datos entrada cálculo de diámetro eje Z*

Datos entrada		
$S_y$	210	$N/mm^2$
$M$	397.58	$Nmm$
$F_s$	2.5	

(Budynas &amp; Keith, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 2008)

$$\sigma_{max} = \frac{S_y}{F_s} \quad (3.75)$$

$$S_m = \frac{M}{\sigma_{max}} \quad (3.76)$$

$$d_z = \sqrt[3]{\frac{32 * S_m}{\pi}} \quad (3.77)$$

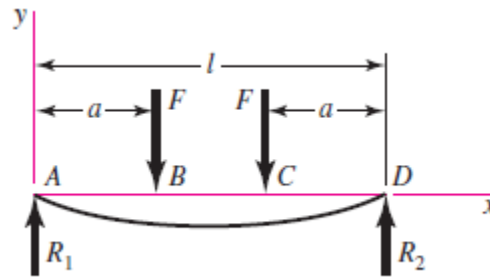
**Tabla 39***Diámetro eje Z*

Datos salida		
$\sigma_{max}$	84	$N/mm^2$
$S_m$	4.73	$Nmm$
$d_z$	3.64	mm

A partir de los resultados obtenidos se realiza la selección del diámetro del eje que debe ser mayor a 3.64 mm, para el eje Z se seleccionará un eje de 8 mm por cumplir con el diseño y por venir adicionado el sistema mecánico requerido para equipo.

### 3.2.3.1.4 Cálculo de deflexión

Para calcular la deflexión máxima en el eje Z se utiliza el diagrama de la Figura 40.



**Figura 41** Esquema para calcular la flexión en vigas  
(Budynas & J. Keith, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 2008)

A continuación en la Tabla 40 se realiza el cálculo de la deflexión a fin de determinar la deformación que sufrirá el eje cuando se someta a las cargas aplicadas.

**Tabla 40**

*Datos deflexión eje Z*

Datos entrada		
<b>m</b>	56.3	g
<b>d<sub>y</sub></b>	8	mm
<b>L</b>	120	mm
<b>F</b>	62.22	N
<b>a</b>	52.7	mm
<b>E</b>	190x10 <sup>9</sup>	Pa

Se realiza el cálculo del momento de Inercia a partir de la ecuación 3.78.

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (3.78)$$

$$I = \frac{\pi * 8^4}{64} = 2.010 * 10^{-10} mm^4$$

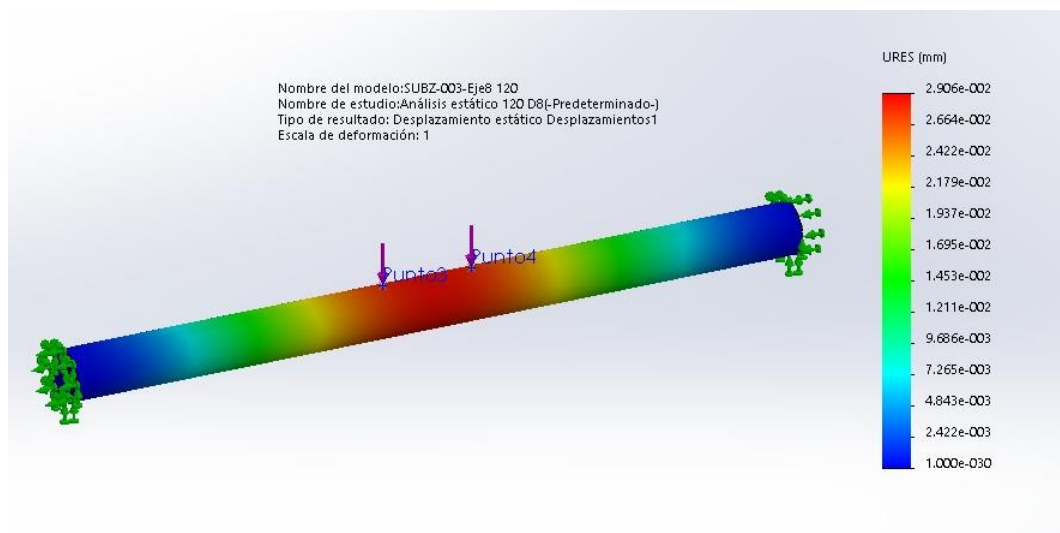
Se realiza el cálculo de la deflexión a partir de la ecuación 3.79.

$$\delta = \frac{Fa(3x^2 + a^2 - 3lx)}{6EI} \quad (3.79)$$

$$\delta = \frac{62.23N * 52.7mm(3 * 120 mm^2 + 52.7 mm^2 - 3 * 120 mm * 52.7mm)}{6 * 190 * 10^9 \frac{N}{m^2} * 2.010 * 10^{-10} mm^4}$$

$$\delta = 0.0296 \text{ mm}$$

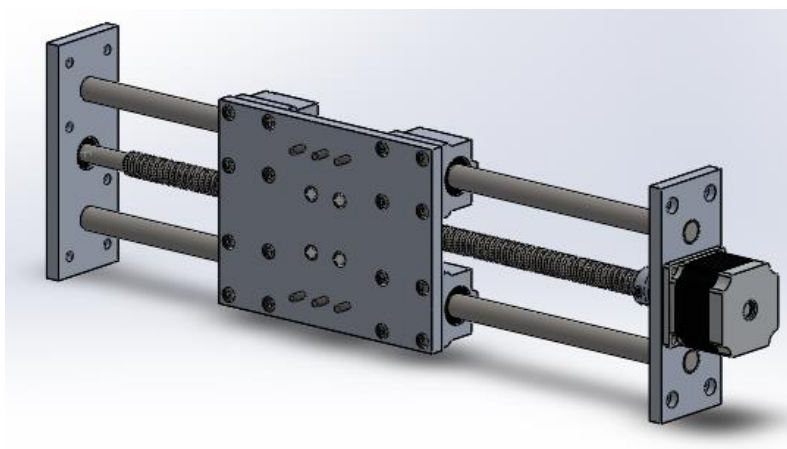
En la Figura 42 se realiza la simulación del eje Z en un software CAD en el que se obtiene como resultado una deflexión de 0.02906 mm.



**Figura 42** Simulación deflexión eje Z

### 3.2.3.2 Dimensionamiento del diámetro del eje X

A continuación, en la Figura se muestra el esquema del subsistema del eje X.



**Figura 43** Esquema Eje X

### 3.2.3.2.1 Cálculo de las fuerzas Resultantes

Se requiere calcular el momento flector máximo al que está expuesto el eje para ello se realiza el análisis de las fuerzas resultantes a partir de los datos de la Tabla 41 que hacen referencia a los elementos de la Figura 43.

**Tabla 41**

*Parámetros fuerzas resultantes eje X*

Parámetro	Parámetro	Valor	Unidad
Longitud de las guías	$L_o$	454	mm
Masa de los rodamientos lineales	$W_m$	0.15	kg
Masa de la estructura móvil	$W_e$	6.1	kg
Fuerza axial o de empuje	$F_a$	38.43	N

A partir de la ecuación 3.20 y 3.21 empleadas en el diseño del eje Z, se calcula la carga total para el taladrado y el fresado respectivamente ahora para el eje X.

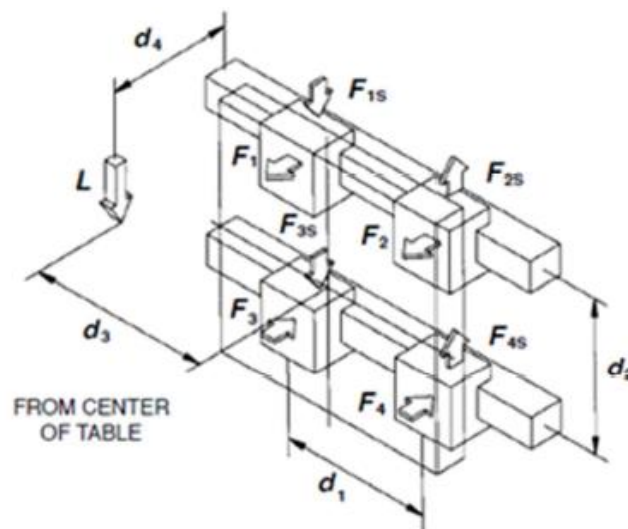
$$L_{zt} = F_a + W_m + W_e$$

$$L_{zt} = 38.43 + 0.15 * 9.8 + 6.1 * 9.8 = 99.74 \text{ N}$$

$$L_{zf} = W_m + W_e$$

$$L_{zf} = 0.15 * 9.8 + 6.1 * 9.8 = 61.31 \text{ N}$$

- **Taladrado**



**Figura 44** Fuerzas eje X para carga vertical taladrado  
Fuente: (Techno, 2014)

Las fuerzas se calculan a partir del diagrama de cuerpo libre de la Figura 44 y de las fórmulas del catálogo H835 de la empresa Techno inc. (Techno, 2014)

Las distancias para el sistema del eje X se resumen en la Tabla 42.

**Tabla 42**

*Carga total vertical en el taladrado Eje X*

TALADRADO		
Parámetro	Valor	Unidad
$d_1=d_{x1}$	130	mm
$d_2=d_{x2}$	88	mm
$d_3=d_{x31}$	0	mm
$d_4=d_{x41}$	185.1	mm

Para la Figura 44 se utilizan las ecuaciones 3.80 ,3.81, 3.82 y 3.83 descritas en el catálogo.

$$F_1 = F_2 = \frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.80)$$

$$F_3 = F_4 = -\frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.81)$$

$$F_{1s} = F_{3s} = -\left[ \frac{L}{4} - \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right) \right] \quad (3.82)$$

$$F_{2s} = F_{4s} = -\left[ \frac{L}{4} + \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right) \right] \quad (3.83)$$

- **Fuerzas resultantes**

La fuerza  $L_{zt}$  es una reacción siendo de signo negativo. Las fuerzas resultantes para ambos ejes o guías son iguales y sus ecuaciones son:

$$F_{xt12} = -\frac{L_{zt}}{2} * \frac{d_{x41}}{d_{y2}} \quad (3.84)$$

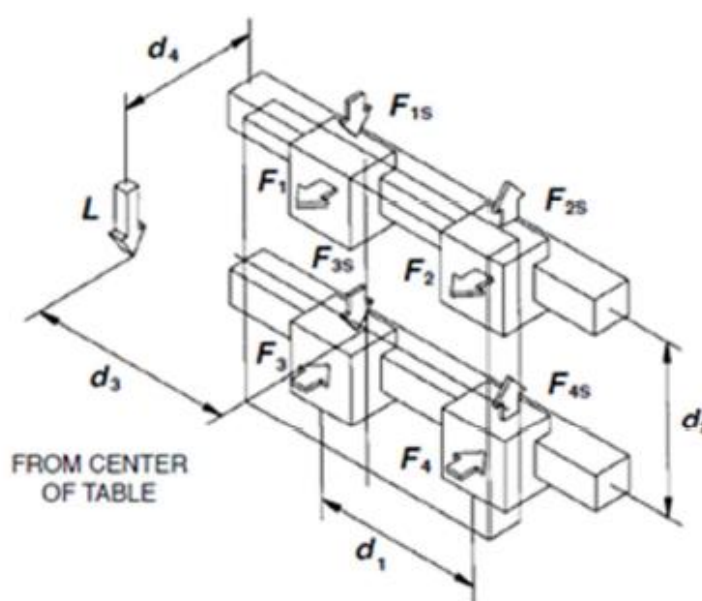
$$F_{xt34} = -F_{xt12} \quad (3.85)$$

$$F_{xts} = -\frac{-L_{xt}}{4} \quad (3.86)$$

- **Fresado**

A fin de considerar las componentes de la fuerza de corte en el cálculo para el caso de fresado de pistas de circuito impreso se realizó una modificación de los nombres de las fórmulas del catálogo y se utilizó como referencia las Figuras 44, 45 y 46 donde se muestran las fuerzas que actúan sobre las guías del eje X.

Fuerza Vertical



**Figura 45** Fuerzas eje Z para carga vertical fresado  
Fuente: (Techno, 2014)

**Tabla 43**

*Carga total vertical en el fresado Eje X*

FRESADO		
Parámetro	Valor	Unidad
$d_1=d_{x1}$	130	mm
$d_2=d_{x2}$	88	mm
$d_3=d_{x31}$	0	mm
$d_4=d_{41}$	185.1	mm
$d_{x42}$	185.1	mm

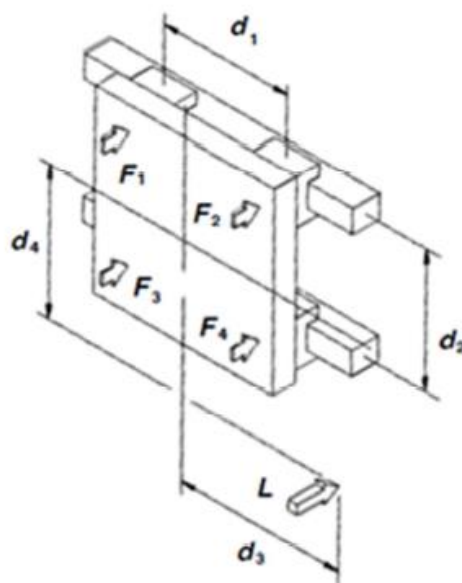
Se utilizan para la Figura 45 las mismas ecuaciones descritas en el catálogo para la Figura 44. En este caso la fuerza  $L_{zf}$  se aplica en el sentido que está dibujado L porque no es una reacción.

$$F_{xp12} = \frac{L_{zf}}{2} * \frac{d_{x41}}{d_{x2}} \quad (3.87)$$

$$F_{xp34} = -F_{xt12} \quad (3.88)$$

$$F_{xs} = -\frac{L_{zf}}{4} \quad (3.89)$$

Fuerza normal



**Figura 46** Fuerza normal eje X  
Fuente: (Techno, 2014)

**Tabla 44**

*Carga total normal en el fresado Eje X*

FRESADO		
Parámetro	Valor	Unidad
$d_1=d_{x1}$	130	mm
$d_2=d_{x2}$	88	mm
$d_3=d_{x32}$	0	mm
$d_4=d_{42}$	111.95	mm

Las ecuaciones para la Figura 46 descritas en el catálogo se muestran a continuación:

$$F_1 = \frac{L}{4} - \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} + \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.90)$$

$$F_2 = \frac{L}{4} + \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} - \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.91)$$

$$F_3 = \frac{L}{4} - \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} - \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.92)$$

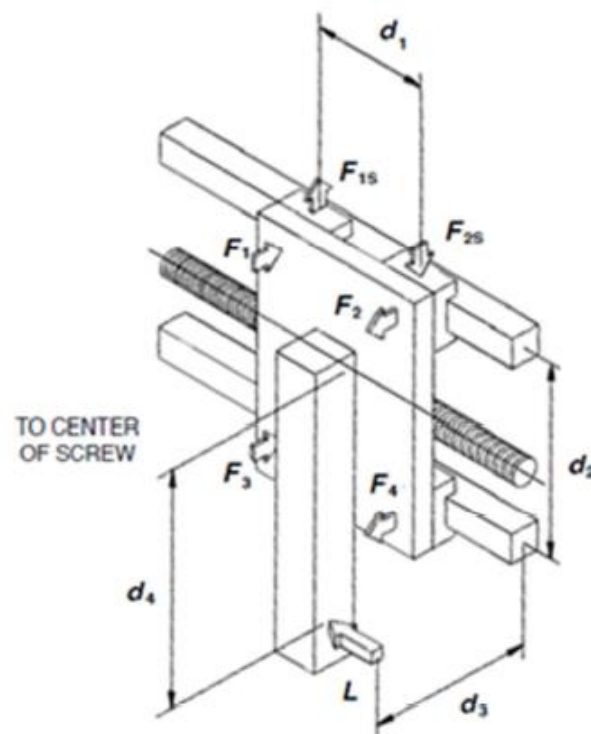
$$F_4 = \frac{L}{4} + \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} + \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.93)$$

Las ecuaciones para el cálculo son las siguientes:

$$F_{xn12} = - \left[ \frac{F_{cx}}{4} - \frac{F_{cx}}{2} \left( \frac{d_{x42}}{d_{x2}} \right) \right] \quad (3.94)$$

$$F_{xn34} = - \left[ \frac{F_{cx}}{4} + \frac{F_{cx}}{2} \left( \frac{d_{x42}}{d_{x2}} \right) \right] \quad (3.95)$$

Fuerza Lateral



**Figura 47** Fuerza lateral eje X  
Fuente: (Techno, 2014)



**Tabla 45***Carga lateral en el fresado Eje X*

<b>FRESADO</b>		
Parámetro	Valor	Unidad
$d_1=d_{x1}$	130	mm
$d_2=d_{x2}$	88	mm
$d_3=d_{x33}$	0	mm
$d_4=d_{42}$	111.95	mm

Las ecuaciones para la Figura 47 descritas en el catálogo se muestran a continuación:

$$F_1 = F_3 = \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right) \quad (3.96)$$

$$F_2 = F_4 = -\frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right) \quad (3.97)$$

$$F_{1s} = F_{3s} = \frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.98)$$

$$F_{2s} = F_{4s} = -\frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.99)$$

A continuación en las ecuaciones 3.100, 3.101, 3.102, 3.103 se muestran las fuerzas resultantes.

$$F_{xl13} = \frac{-F_{cx}}{2} \left( \frac{d_{x33}}{d_{x1}} \right) \quad (3.100)$$

$$F_{xl24} = \frac{F_{cx}}{2} \left( \frac{d_{x33}}{d_{x1}} \right) \quad (3.101)$$

$$F_{xls13} = \frac{F_{cx}}{2} \left( \frac{d_{x43}}{d_{x2}} \right) \quad (3.102)$$

$$F_{xls24} = -\frac{F_{cx}}{2} \left( \frac{d_{x43}}{d_{x2}} \right) \quad (3.103)$$

## Fuerzas Resultantes

Las fuerzas resultantes de fresado en los puntos 1,2,3,4 se muestran en las ecuaciones 3.104, 3.105, 3.106, 3.107, 3.108, 3.109, 3.110, 3.111.

- Punto 1

$$F_{xx1}(\alpha) = F_{xp12} + F_{xn12} + F_{xl13} \quad (3.104)$$

$$F_{xx1}(\alpha) = \frac{L_{zf}}{2} * \frac{d_{y41}}{d_{y2}} - f_c * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left( \frac{d_{y42}}{d_{y2}} \right) \right] - f_c * \sin(\alpha) * \frac{d_{y33}}{d_{y1}}$$

$$\mathbf{F_{xx1}(\alpha) = 38.99 + 7.89 * \cos(\alpha) - 8.47 * \sin(\alpha)}$$

$$F_{xx1s}(\alpha) = F_{xls} + F_{xls13} \quad (3.105)$$

$$F_{xx1s}(\alpha) = -\frac{L_{zf}}{4} + f_c * \sin(\alpha) * \frac{d_{x42}}{2d_{x2}}$$

$$\mathbf{F_{xx1s}(\alpha) = -15.32 + 10.35 * \sin(\alpha)}$$

- Punto 2

$$F_{xx2}(\alpha) = F_{xp12} + F_{xn12} + F_{xl24} \quad (3.106)$$

$$F_{xx2}(\alpha) = \frac{L_{zf}}{2} * \frac{d_{x41}}{d_{x2}} - f_c * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left( \frac{d_{x42}}{d_{x2}} \right) \right] + f_c * \sin(\alpha) * \frac{d_{x33}}{d_{x1}}$$

$$\mathbf{F_{xx2}(\alpha) = 38.99 + 7.89 * \cos(\alpha) + 8.47 * \sin(\alpha)}$$

$$F_{xx2s}(\alpha) = F_{xls} + F_{xls13} \quad (3.107)$$

$$F_{xx2s}(\alpha) = -\frac{L_{zf}}{4} - f_c * \sin(\alpha) * \frac{d_{x42}}{2d_{x2}}$$

$$\mathbf{F_{xx2s}(\alpha) = -15.32 - 10.35 * \sin(\alpha)}$$

- Punto 3

$$F_{xx3}(\alpha) = F_{xp34} + F_{xn34} + F_{xl13} \quad (3.108)$$

$$F_{xx3}(\alpha) = -\frac{L_{zf}}{2} * \frac{d_{x41}}{d_{x2}} - f_c * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left( \frac{d_{x42}}{d_{x2}} \right) \right] - f_c * \sin(\alpha) * \frac{d_{x33}}{d_{x1}}$$

$$F_{xx1}(\alpha) = -38.99 - 12.80 * \cos(\alpha) - 8.47 * \sin(\alpha)$$

$$F_{xx3s}(\alpha) = F_{xps} + F_{xls}13 \quad (3.109)$$

$$F_{xx3s}(\alpha) = F_{xx1s}(\alpha) = -15.32 + 10.35 * \sin(\alpha)$$

- Punto 4

$$F_{xx4}(\alpha) = F_{xp}34 + F_{xn}34 + F_{xl}24 \quad (3.110)$$

$$F_{xx4}(\alpha) = -\frac{L_{zf}}{2} * \frac{d_{x41}}{d_{x2}} - f_c * \cos(\alpha) * \left[ \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left( \frac{d_{x42}}{d_{x2}} \right) \right] + f_c * \sin(\alpha) * \frac{d_{x33}}{d_{x1}}$$

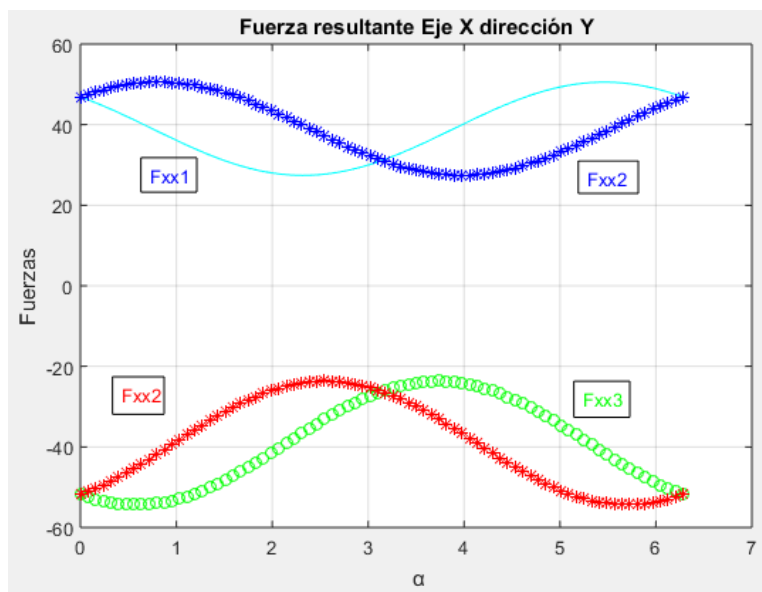
$$F_{xx4}(\alpha) = -38.99 - 12.80 * \cos(\alpha) + 8.47 * \sin(\alpha)$$

$$F_{xx4s}(\alpha) = F_{xps} + F_{xls}24 \quad (3.111)$$

$$F_{xx4s}(\alpha) = -\frac{L_{zf}}{4} + f_c * \sin(\alpha) * \frac{d_{x42}}{2d_{x2}}$$

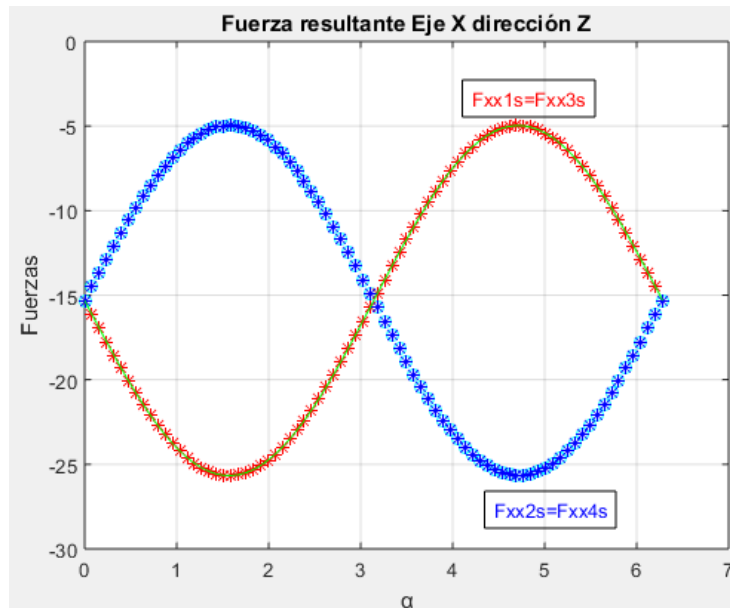
$$F_{xx4s}(\alpha) = F_{xx2s}(\alpha) = -15.32 - 10.35 * \sin(\alpha)$$

La Figura 48 muestra la fuerza resultante en las guías lineales del eje X en dirección Y.



**Figura 48** Fuerza resultante guías lineales eje X dirección Y

La Figura 49 muestra la fuerza resultante en las guías lineales del eje X en dirección Z.



**Figura 49** Fuerza resultante guías lineales eje X dirección Z

### 3.2.3.2.2 Cálculo del momento flector máximo

Se presenta el diagrama de Fuerzas de las Figuras 50 y 51, para el cálculo de las Fuerzas resultantes  $F_b$ ,  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_g$ , que permitirán determinar el momento flector máximo.

- Cálculo momento flector máximo plano XZ



**Figura 50** Esquema fuerzas plano XZ eje X

- Cálculo momento flector máximo YZ

En la Figura 51 se muestra el esquema de fuerzas presentes en el eje z del plano YZ.



**Figura 51** Esquema fuerzas plano YZ eje X

Para el eje X se realiza el mismo análisis realizado en el eje Z, teniendo como resultado que existen tres casos para calcular el momento flector máximo de estos se escoge el más crítico. Los mismos se muestran en la Tabla 46 a continuación.

Con los valores de  $m_d$ ,  $d_{z1}$ ,  $n_d$ , y  $L_o$  se realiza el cálculo de las reacciones, fuerzas cortantes y momentos flectores, cuyos resultados se muestra en la Tabla 46.

**Tabla 46**

Reacciones, fuerzas cortantes y momentos flectores Eje X

REACCIONES	FUERZA CORTANTE	MOMENTO FLECTOR
$R_a$	-63.44 N	$V_a$ -63.44 N
$F_b$	63.44 N	$M_a$ 0 N mm
$F_c$	63.44 N	$V_b$ 0 N
$R_d$	63.44 N	$M_b$ -10277.95 N mm
		$V_c$ 63.44 N
		$M_c$ -10277.95 N mm
		$V_d$ 0
		$M_d$ 0 N mm

Se procede a realizar el cálculo del momento flector máximo para los tres casos que se detallan a continuación, a fin de escoger el más crítico.

**Tabla 47**

Casos para el cálculo del momento flector Eje X

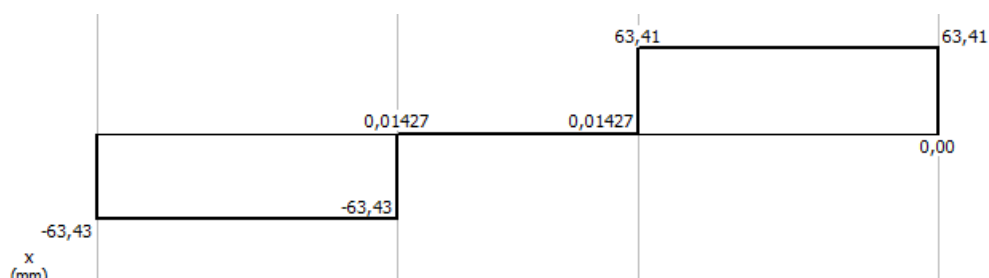
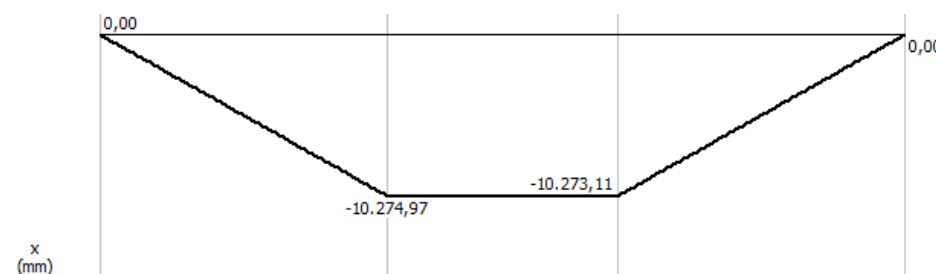
CASO 1: Taladrado	CASO 2: Fresado Guía 1	CASO 3: Fresado Guía 2
$F_b = F_{xt12} \text{ o } F_{xt34}$	$F_b = F_{xx1}$	$F_b = F_{xx3}$
$F_c = F_{xt12} \text{ o } F_{xt34}$	$F_c = F_{xx2}$	$F_c = F_{xx4}$
$F_f = F_{xts}$	$F_f = F_{xx1s}$	$F_f = F_{xx3s}$
$F_g = F_{xts}$	$F_g = F_{xx2s}$	$F_g = F_{xx4s}$
$M = 11043.3$	$M = 8603.26$	$M = 8603.26$

Como se observa en la Tabla 47 el momento flector máximo del eje X es de 11043.3 Nmm, valor que se utilizará para el cálculo del diámetro.

**Tabla 48***Momentos flectores máximos Eje X*

MOMENTO FLECTOR MÁXIMO	
$M_{z1}$	11043.3 N mm
$M_{z2}$	11043.3 N mm

A continuación en las Figuras 52 y 53 se muestra el diagrama de las fuerzas cortantes y momentos flectores del eje X.

**Figura 52** Diagrama fuerzas cortantes eje X**Figura 53** Diagrama de momentos flectores eje X

### 3.2.3.2.3 Cálculo del diámetro

Basados en el momento flector máximo calculado, se realiza el dimensionamiento del diámetro del eje aplicando las ecuaciones de diseño de elementos de máquinas 3.75, 3.76 y 3.77 considerando un factor de seguridad de 2.5. En la tabla 49 se muestran los parámetros de entrada para el cálculo para obtener los resultados de la Tabla 50.

**Tabla 49***Datos entrada cálculo de diámetro eje X*

DATOS ENTRADA		
$S_y$	210	$N/mm^2$
$M$	15523.17	$Nmm$
$F_s$	2.5	

(Budynas &amp; Keith, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 2008)

$$\sigma_{max} = \frac{S_y}{F_s}$$

$$S_m = \frac{M}{\sigma_{max}}$$

$$d_z = \sqrt[3]{\frac{32 * S_m}{\pi}}$$

**Tabla 50***Diámetro eje X*

DATOS SALIDA		
$\sigma_{max}$	84	$N/mm^2$
$S_m$	131.47	$Nmm$
$d_z$	11.02	mm

A partir de los resultados obtenidos se realiza la selección del diámetro del eje que debe ser mayor a 11.02 mm, para el eje X se seleccionará un eje de 16 mm por cumplir con el diseño, por ser un diámetro estándar y cumplir con la selección del rodamiento lineal.

#### 3.2.3.2.4 Cálculo de deflexión

Para calcular la deflexión máxima en el eje X se utiliza el diagrama de la Figura 41 con el que se realizó el cálculo de deflexión para el eje Z.

A continuación, en la Tabla 51 se realiza el cálculo de la deflexión a fin de determinar la deformación que sufrirá el eje cuando se someta a las cargas aplicadas.

**Tabla 51***Datos deflexión eje X*

DATOS ENTRADA		
<b>m</b>	855.55	g
<b>d<sub>y</sub></b>	16	mm
<b>L</b>	454	mm
<b>F</b>	63.44	N
<b>a</b>	162	mm
<b>E</b>	190x10 <sup>9</sup>	Pa

A partir de las ecuaciones 3.78 y 3.79 se calcula el momento de inercia y la deflexión máxima del eje respectivamente.

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi * 16^4}{64} = 3.217 \times 10^{-9} \text{mm}^4$$

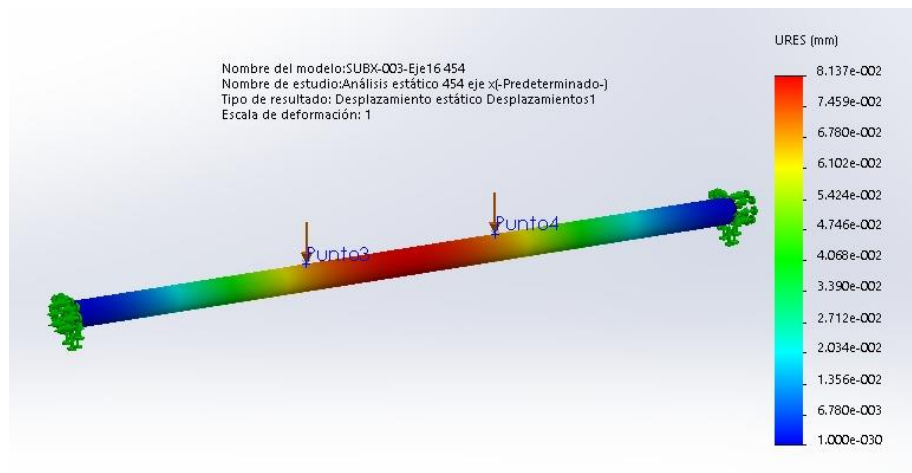
$$\delta = \frac{Fa(3x^2 + a^2 - 3lx)}{6EI}$$

$$\delta = \frac{63.44 \text{N} * 162 \text{mm} (3 * 454 \text{mm}^2 + 162 \text{mm}^2 - 3 * 162 \text{mm} * 454 \text{mm})}{6 * 190 * 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 3.217 \times 10^{-9} \text{mm}^4}$$

$$\delta = 0.0837 \text{ mm}$$

En la Figura 54 se realiza la simulación del eje X en un software CAD en el que se obtiene como resultado una deflexión de 0.0813 mm.

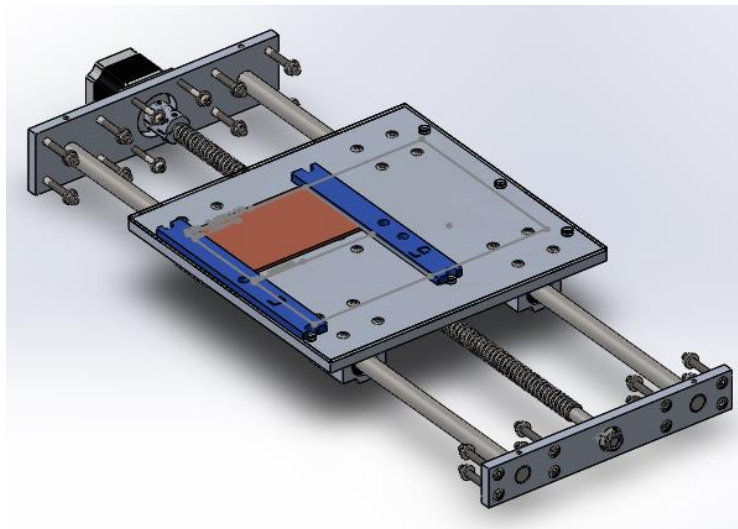




**Figura 54** Deflexión eje X

### 3.2.3.3 Dimensionamiento del diámetro del eje Y

A continuación en la Figura 55 se muestra el esquema del subsistema del eje Y.



**Figura 55** Esquema del eje Y

#### 3.2.3.3.1 Cálculo de las fuerzas resultantes

Se requiere calcular el momento flector máximo al que está expuesto el eje para ello se realiza el análisis de las fuerzas resultantes desplegado a continuación:

- Cálculo de las fuerzas resultantes

Se realiza el cálculo de las fuerzas resultantes sobre los ejes a partir del valor de las fuerzas que actúan sobre la herramienta que son las siguientes:

$L_{yt}$ : Carga total vertical en el taladrado

$L_{yf}$ : Carga total vertical en el fresado

$F_{cx}$ : Fuerza de corte paralela al eje x

$F_{cy}$ : Fuerza de corte paralela al eje y

Para el cálculo de las fuerzas resultantes se parte de los datos de la Tabla 52.

**Tabla 52**

*Parámetros fuerzas resultantes eje Y*

Parámetro	Parámetro	Valor	Unidad
Longitud de las guías	$L_o$	554	mm
Masa de los rodamientos lineales	$W_m$	0.15	kg
Masa de la estructura móvil	$W_e$	3.258	kg
Fuerza axial o de empuje	$F_a$	38.43	N

A partir de la ecuación 3.20 y 3.21 se calculan las cargas totales para el taladrado y el fresado.

$$L_{yt} = F_a + W_m + W_e$$

$$L_{yt} = 38.43 + 0.15 * 9.8 + 3.258 * 9.8 = 71.82 \text{ N}$$

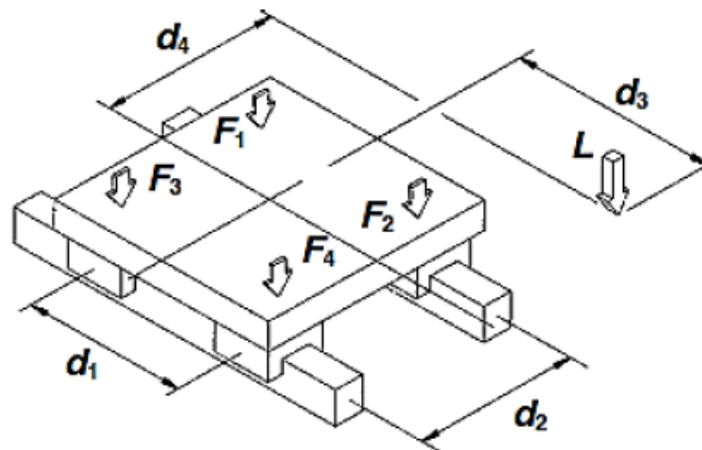
$$L_{yf} = W_m + W_e$$

$$L_{yf} = 0.15 * 9.8 + 3.258 * 9.8 = 33.39 \text{ N}$$

- **Taladrado**

Las fuerzas se calculan a partir del diagrama de cuerpo libre de la Figura 56 y las fórmulas catálogo H835 de la empresa Techno inc. (Techno, 2014).

Para la Figura 56 se utilizan las ecuaciones 3.112 ,3.113, 3.114 y 3.115 descritas en el catálogo.



**Figura 56** Fuerzas eje Y para carga vertical taladrado  
Fuente: (Techno, 2014)

**Tabla 53**

*Carga total vertical en el taladrado eje Y*

TALADRADO		
Parámetro	Valor	Unidad
$d_1=d_{y1}$	130	mm
$d_2=d_{y2}$	88	mm
$d_3=d_{y31}$	0	mm
$d_4=d_{y41}$	44	mm
$d_4=d_{y42}$	111.95	mm

$$F_1 = \frac{L}{4} - \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} + \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.112)$$

$$F_2 = \frac{L}{4} + \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} - \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.113)$$

$$F_3 = \frac{L}{4} - \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} - \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.114)$$

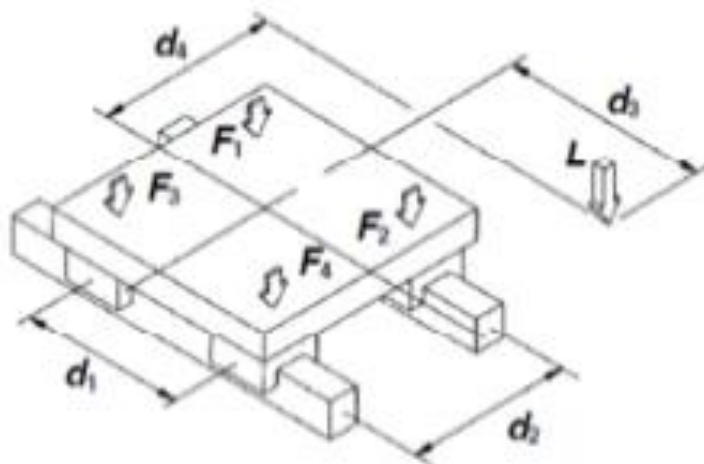
$$F_4 = \frac{L}{4} + \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} + \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.115)$$

- **Fresado**

A fin de considerar las componentes de la fuerza de corte en el cálculo para el caso de fresado de pistas de circuito impreso se realizó una modificación de los nombres de las fórmulas

del catálogo y se utilizó como referencia las Figuras 56, 57 y 58 donde se muestran las fuerzas que actúan sobre las guías del eje Y.

Fuerza Vertical



**Figura 57** Fuerzas eje Z para carga vertical fresado  
Fuente: (Techno, 2014)

Carga total vertical en el fresado:

**Tabla 54**

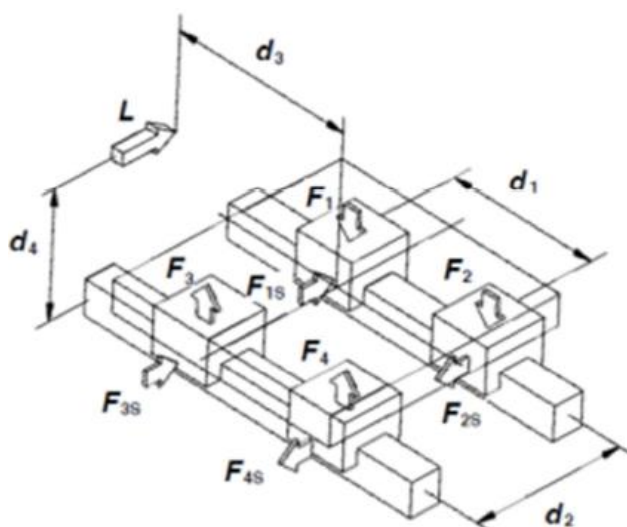
*Datos entrada cálculo diámetro eje Y*

FRESADO		
Parámetro	Valor	Unidad
$d_1=d_{y1}$	130	mm
$d_2=d_{y2}$	88	mm
$d_3=d_{y31}$	0	mm
$d_4=d_{y41}$	44	mm
$d_{y42}$	111.95	mm

$$F_{xp12} = - \left[ \frac{L_{zf}}{4} + \frac{L_{zf}}{2} \left( \frac{d_{y41}}{d_{y2}} \right) \right] = 95.23 \text{ N} \quad (3.116)$$

Se utilizan para la Figura 57 las mismas ecuaciones descritas en el catálogo para la Figura 56. En este caso la fuerza  $L_{yf}$  se aplica en el sentido que está dibujado L porque no es una reacción.

Componente de la Fuerza en el eje X ( $F_{cx}$ )



**Figura 58** Esquema fuerza Fcx  
Fuente: (Techno, 2014)

**Tabla 55**

*Datos entrada cálculo diámetro eje Y*

<b>FRESADO</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$d_1=d_{y1}$	130	mm
$d_2=d_{y2}$	88	mm
$d_3=d_{y32}$	0	mm
$d_{y42}$	111.95	mm

Para la Figura 57 se utilizan las ecuaciones 3.117 ,3.118, 3.119 y 3.120 descritas en el catálogo.

$$F_1 = F_3 = \frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.117)$$

$$F_2 = F_4 = -\frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.118)$$

$$F_{1s} = F_{3s} = \frac{L}{4} - \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right) \quad (3.119)$$

$$F_{2s} = F_{4s} = \frac{L}{4} + \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right) \quad (3.120)$$

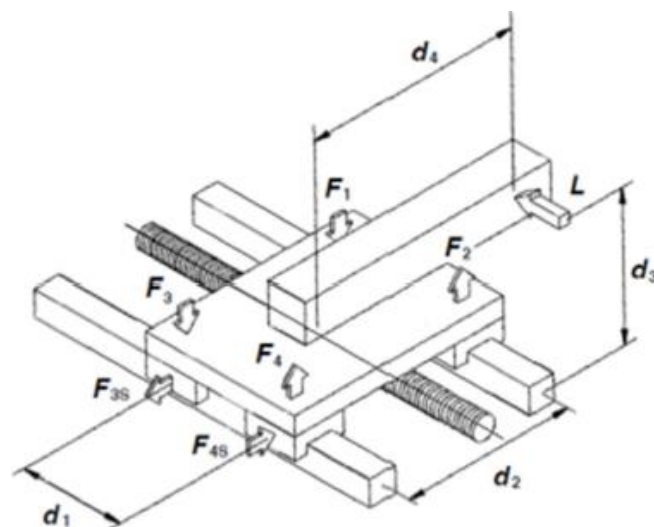
Las ecuaciones para el cálculo actual son las siguientes:

$$F_{xy12} = \frac{-F_{cx}}{2} \left( \frac{d_{x42}}{d_{x2}} \right) \quad (3.121)$$

$$F_{xy34} = -F_{xy12} \quad (3.122)$$

$$F_{xys} = \frac{F_{cx}}{4} \quad (3.123)$$

Componente de la Fuerza en el eje Y (Fcy)



**Figura 59** Esquema fuerza Fcy  
Fuente: (Techno, 2014)

**Tabla 56**

Datos entrada cálculo diámetro eje Y

<b>FRESADO</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$d_1=d_{y1}$	130	mm
$d_2=d_{y2}$	88	mm
$d_3=d_{y32}$	0	mm
$d_{y42}$	111.95	mm

Las ecuaciones descritas en el catálogo para la Figura 59 se listan a continuación:

$$F_1 = F_3 = -\frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right) \quad (3.124)$$

$$F_2 = F_4 = \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right) \quad (3.125)$$

$$F_{1s} = F_{3s} = \frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.126)$$

$$F_{2s} = F_{4s} = -\frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right) \quad (3.127)$$

$$F_{yl13} = -\frac{F_{cy}}{2} \left( \frac{d_{y33}}{d_{y1}} \right) \quad (3.128)$$

Las ecuaciones para el cálculo actual son:

$$F_{yl24} = \frac{F_{cy}}{2} \left( \frac{d_{y33}}{d_{y1}} \right) \quad (3.129)$$

$$F_{yls13} = -\frac{F_{cy}}{2} \left( \frac{d_{y43}}{d_{y2}} \right) \quad (3.130)$$

$$F_{yls24} = \frac{F_{cy}}{2} \left( \frac{d_{y43}}{d_{y2}} \right) \quad (3.131)$$

### Fuerzas Resultantes

Con los cálculos realizados, se realiza la sumatoria de fuerzas en los ejes X e Y para hallar las fuerzas resultantes de fresado en los puntos 1, 2,3 y 4 en función del ángulo.

- Punto 1

$$F_{yy1}(\alpha) = F_{yp12} + F_{xy12} + F_{yl13} \quad (3.132)$$

$$F_{yy1}(\alpha) = -\frac{L_{yf}}{4} - \frac{L_{yf}}{2} * \frac{d_{y31}}{d_{y2}} + \frac{f_c}{2} * \sin(\alpha) * \frac{d_{y42}}{d_{y2}} - \frac{f_c}{2} * \cos(\alpha) * \frac{d_{y33}}{d_{y1}}$$

$$F_{yy1}(\alpha) = -8.35 + 6.25 * \sin(\alpha) - 1.66 * \cos(\alpha)$$

$$F_{yy1s}(\alpha) = F_{yls} + F_{yls13} \quad (3.133)$$

$$F_{yy1s}(\alpha) = \frac{f_c}{4} * \sin(\alpha) - \frac{f_c}{2} * \cos(\alpha) * \frac{d_{y43}}{d_{y2}}$$

$$F_{yy1s}(\alpha) = 2.46 * \sin(\alpha) - 6.25 * \cos(\alpha)$$

- Punto 2

$$F_{yy2}(\alpha) = F_{yp12} + F_{xy12} + F_{yl24} \quad (3.134)$$

$$F_{yy2}(\alpha) = -\frac{L_{yf}}{4} - \frac{L_{yf}}{2} * \frac{d_{y31}}{d_{y2}} + \frac{f_c}{2} * \sin(\alpha) * \frac{d_{y42}}{d_{y2}} + \frac{f_c}{2} * \cos(\alpha) * \frac{d_{y33}}{d_{y1}}$$

$$F_{yy2}(\alpha) = -8.35 + 6.25 * \sin(\alpha) + 1.66 * \cos(\alpha)$$

$$F_{yy2s}(\alpha) = F_{xys} + F_{yls24} \quad (3.135)$$

$$F_{yy2s}(\alpha) = \frac{f_c}{4} * \sin(\alpha) + \frac{f_c}{2} * \cos(\alpha) * \frac{d_{y43}}{d_{y2}}$$

$$F_{yy2s}(\alpha) = 2.46 * \sin(\alpha) + 6.25 * \cos(\alpha)$$

- Punto 3

$$F_{yy3}(\alpha) = F_{xy34} + F_{yl13} \quad (3.136)$$

$$F_{yy3}(\alpha) = -\frac{f_c}{2} * \sin(\alpha) * \frac{d_{y42}}{d_{y2}} - \frac{f_c}{2} * \cos(\alpha) * \frac{d_{y33}}{d_{y1}}$$

$$F_{yy3}(\alpha) = -6.25 * \sin(\alpha) - 1.66 * \cos(\alpha)$$

$$F_{yy3s}(\alpha) = F_{yy1s}(\alpha) = 2.46 * \sin(\alpha) - 6.25 * \cos(\alpha) \quad (3.137)$$

- Punto 4

$$F_{yy4}(\alpha) = F_{xy34} + F_{yl24} \quad (3.138)$$

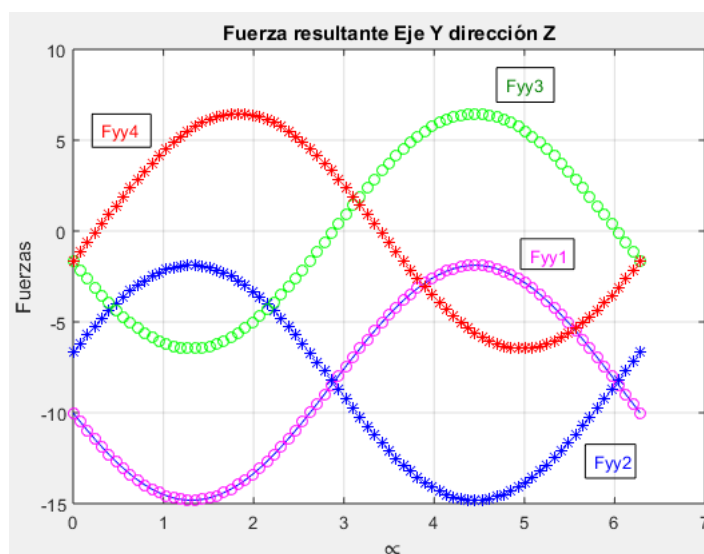
$$F_{yy4}(\alpha) = -\frac{f_c}{2} * \sin(\alpha) * \frac{d_{y42}}{d_{y2}} + \frac{f_c}{2} * \cos(\alpha) * \frac{d_{y33}}{d_{y1}}$$



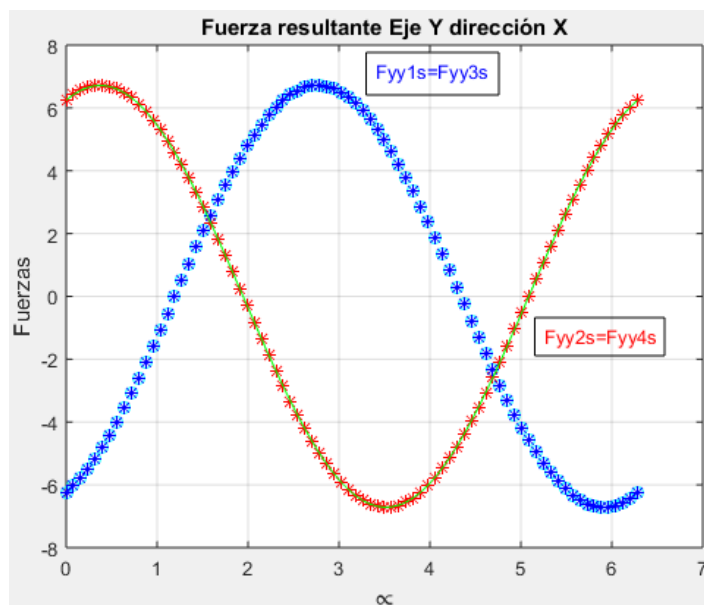
$$F_{yy4}(\alpha) = -6.25 * \sin(\alpha) + 1.66 * \cos(\alpha)$$

$$F_{yy4s}(\alpha) = F_{yy2s}(\alpha) = 2.46 * \sin(\alpha) + 6.25 * \cos(\alpha) \quad (3.139)$$

La Figuras 60 y 61 muestran las fuerzas resultantes en las guías lineales del eje Y en las diferentes direcciones.



**Figura 60** Fuerza resultante guías lineales eje Y dirección Z

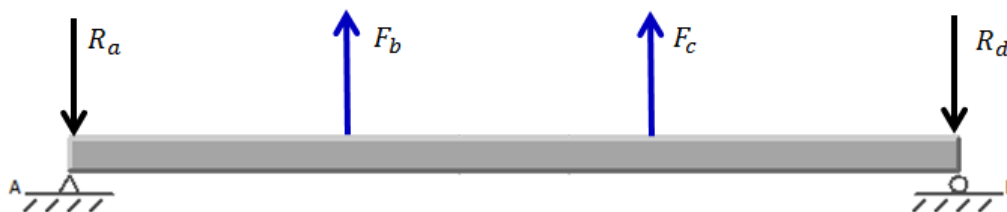


**Figura 61** Fuerza resultante guías lineales eje Y dirección X

### 3.2.3.3.2 Cálculo del momento flector máximo

Se utiliza el diagrama de Fuerzas de las Figuras 62 y 63, para el cálculo de las Fuerzas resultantes  $F_b, F_c, F_f, F_g$ , que permitirán determinar el momento flector máximo.

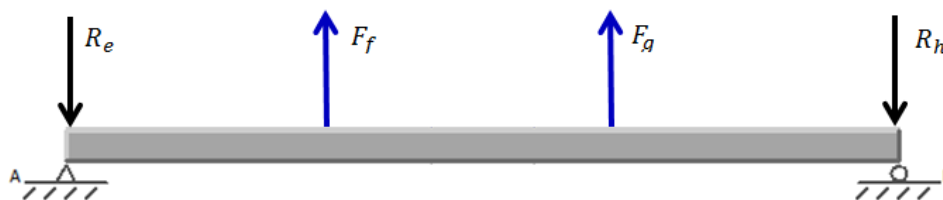
- Cálculo momento flector máximo plano XY eje X



*Figura 62* Esquema fuerzas plano XY eje X

- Cálculo momento flector máximo YZ

En la Figura 62 se muestra el esquema de fuerzas presentes en el eje z del plano YZ.



*Figura 63* Esquema fuerzas plano YZ eje Y

Para el eje Y se realiza el mismo análisis realizado en el eje Z, teniendo como resultado que existen tres casos para calcular el momento flector máximo de estos se escoge el más crítico. Los mismos se muestran en la Tabla 58 a continuación con los datos de entrada de la Tabla 57.

**Tabla 57**

*Datos entrada cálculo del momento flector*

DATOS ENTRADA	
$m_d$	184.45 mm
$d_{z1}$	185.1 mm
$n_d$	184.45 mm
$L_o$	554 mm

Con los valores de  $m_d$ ,  $d_{z1}$ ,  $n_d$ , y  $L_o$  se realiza el cálculo de las reacciones, fuerzas cortantes y momentos flectores, cuyos resultados se muestra en la Tabla 58.

**Tabla 58***Datos entrada cálculo diámetro eje Y*

REACCIONES		FUERZA CORTANTE		MOMENTO FLECTOR	
$R_a$	35.91 N	$V_a$	-35.91 N	$M_a$	0 N mm
$F_b$	35.91 N	$V_b$	0 N	$M_b$	-6624.37 N mm
$F_c$	35.91 N	$V_c$	35.91 N	$M_c$	-6624.37 N mm
$R_d$	35.91 N	$V_d$	0	$M_d$	0 N mm

Se procede a realizar el cálculo del momento flector máximo para los 3 casos que se detallan a continuación en la Tabla 59, a fin de escoger el más crítico.

**Tabla 59***Datos entrada cálculo diámetro eje Y*

CASO 1: Taladrado	CASO 2: Fresado Guía 1	CASO 3: Fresado Guía 2
$F_b = F_{yt12}$	$F_b = F_{yy1}$	$F_b = F_{yy3}$
$F_c = F_{yt12}$	$F_c = F_{yy2}$	$F_c = F_{yy4}$
$F_f = F_{yts}$	$F_f = F_{yy1s}$	$F_f = F_{yy3s}$
$F_g = F_{yts}$	$F_g = F_{yy2s}$	$F_g = F_{yy4s}$
$M = 6624.37$	$M = 2948.24$	$M = 2948.24$

Como se observa en la Tabla 59 es momento flector máximo del eje Y es de 6624.37 Nmm, valor que se utilizará para el cálculo del diámetro.

A continuación en las Figuras 64 y 65 se muestra el diagrama de las fuerzas cortantes y momentos flectores del eje Z.

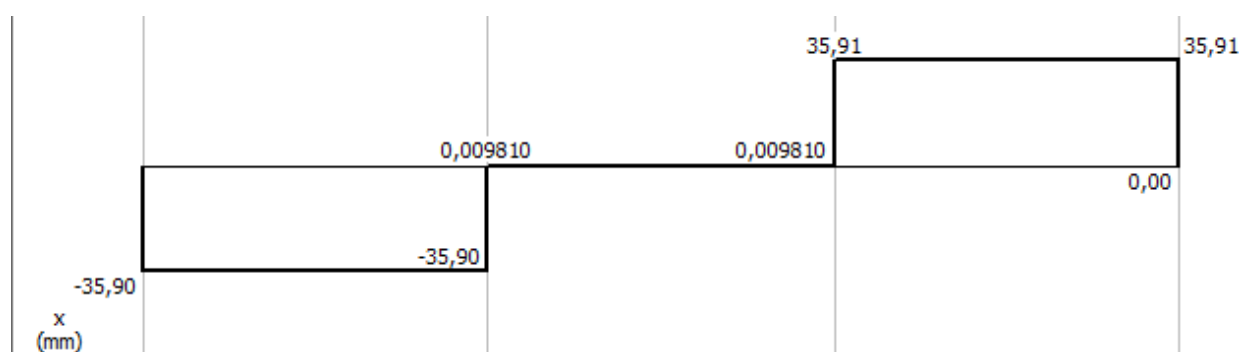
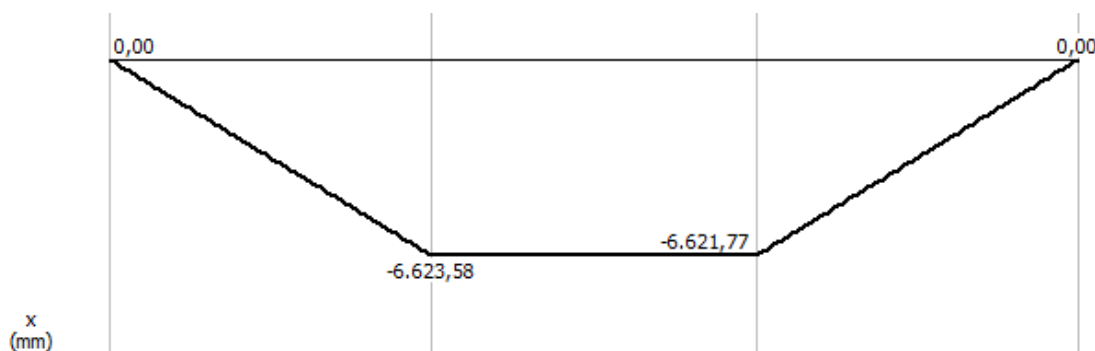
A continuación se detallan los momentos resultantes, puesto que el punto B y F se encuentran en la misma posición, al igual que los C y G, se obtiene dos momentos resultantes que se listan en la Tabla 60.

**Tabla 60***Datos entrada cálculo diámetro eje Y*

MOMENTO FLECTOR MÁXIMO	
$M_{z1}$	6624.37 N mm
$M_{z2}$	6624.37 N mm

Como se observa en la Tabla 60 el momento flector máximo del eje Y es de 6624.37 Nmm, valor que se utilizará para el cálculo del diámetro.

A continuación, en las Figura 64 y 65 se muestra el diagrama de las fuerzas cortantes y momentos flectores del eje Y.

**Figura 64** Diagrama de fuerza cortante eje Y**Figura 65** Diagrama momento flector eje Y

### 3.2.3.3.3 Cálculo del diámetro

Basados en el momento flector máximo calculado, se realiza el dimensionamiento del diámetro del eje aplicando las ecuaciones de diseño de elementos de máquinas considerando un factor de seguridad de 2.5, los parámetros de entrada para el diseño se muestran en la Tabla 61.

**Tabla 61**

*Datos entrada cálculo diámetro eje Y*

DATOS ENTRADA		
$S_y$	210	$N/mm^2$
$M$	6624.37	$Nmm$
$F_s$	2.5	

(Budynas & Keith, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 2008)

$$\sigma_{max} = \frac{S_y}{F_s}$$

$$S_m = \frac{M}{\sigma_{max}}$$

$$d_z = \sqrt[3]{\frac{32 * S_m}{\pi}}$$

Con las ecuaciones anteriores empleadas en el diseño del eje Z, se obtienen los resultados de la Tabla 62 para el eje Y.

**Tabla 62**

*Datos entrada cálculo diámetro eje Y*

DATOS SALIDA		
$\sigma_{max}$	84	$N/mm^2$
$S_m$	78.86	$Nmm$
$d_z$	9.29	mm

A partir de los resultados obtenidos se realiza la selección del diámetro del eje que debe ser mayor a 9.29 mm, para el eje Y se seleccionará un eje de 16 mm por cumplir con el diseño, por ser un diámetro estándar y cumplir con la selección del rodamiento lineal.

### 3.2.3.3.4 Cálculo de deflexión

Para calcular la deflexión máxima en el eje Y se utiliza el diagrama de la Figura 41 con el que se realizó el cálculo de deflexión para el eje Z.

A continuación, en la Tabla 63 se realiza el cálculo de la deflexión a fin de determinar la deformación que sufrirá el eje cuando se someta a las cargas aplicadas.

**Tabla 63**

*Datos deflexión eje Y*

DATOS ENTRADA		
<i>m</i>	730.26	g
<i>d<sub>y</sub></i>	16	mm
<i>L</i>	554	mm
<i>F</i>	35.91	N
<i>a</i>	184.5	mm
<i>E</i>	190x10 <sup>9</sup>	Pa

A partir de las ecuaciones 3.78 y 3.79 usadas en el cálculo de deflexión para el eje Z se calcula el momento de inercia y la deflexión máxima del eje Y respectivamente.

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

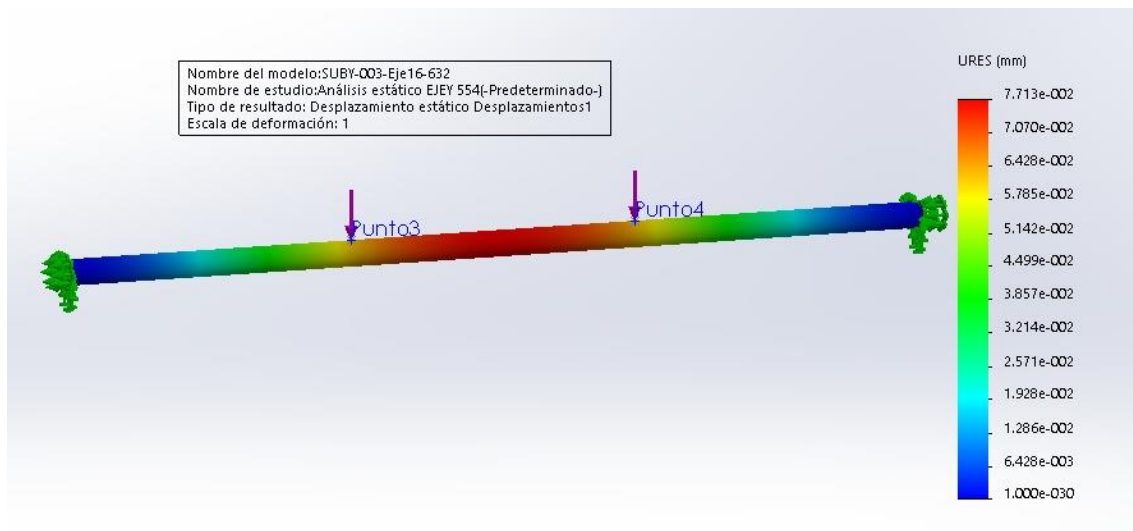
$$I = \frac{\pi * 16^4}{64} = 3.217 * 10^{-9} mm^4$$

$$\delta = \frac{Fa(3x^2 + a^2 - 3lx)}{6EI}$$

$$\delta = \frac{35.91N * 184.5mm(3 * 554 mm^2 + 184.5 mm^2 - 3 * 184.5 mm * 554 mm)}{6 * 190 * 10^9 \frac{N}{m^2} * 3.217 * 10^{-9} mm^4}$$

$$\delta = 0.0707 mm$$

En la Figura 66 se realiza la simulación del eje Y en un software CAD en el que se obtiene como resultado una deflexión de 0.0771 mm.



**Figura 66** Deflexión simulada eje Y

### 3.2.3.4 Selección del Husillo de bolas

En esta sección se seleccionará el husillo de bolas y su correspondiente tornillo idóneo para nuestra máquina a partir de los parámetros de diseño del catálogo H835 de Techno Inc, se analizará cada eje teniendo en consideración nuestra velocidad objetivo del equipo y velocidad de avance para el fresado calculada en la sección 3.2.2.2.

Para una adecuada selección del husillo es importante considerar los siguientes aspectos:

- RPM necesarios
- Velocidad crítica
- Fuerza de compresión máxima

A continuación se presentan las ecuaciones que se emplearán para determinar la velocidad crítica de cada sistema y la carga máxima a la que podrá ser sometido.

#### Velocidad Máxima

$$C_s = F * (4.76 * 10^6) * \frac{d}{L^2} \quad (3.140)$$

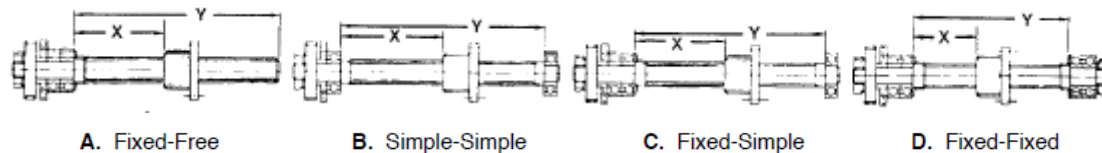
- $C_s$ : Velocidad crítica
- $d$ : Diámetro interno (in)
- $L$ : Distancia entre soportes (in) ( $Y$ )
- $F$ : Factor de soporte  $B=1$

### Carga Máxima

$$P = F * (14.03 * 10^6) * \frac{d^4}{L^2} \quad (3.141)$$

- $P$ : Carga máxima (lb)
- $d$ : Diámetro interno del husillo (in)
- $L$ : Distancia máxima entre la tuerca móvil y el rodamiento ( $X$ )
- $F$ : Factor de soporte

El factor de soporte empleado para todos los cálculos será el correspondiente a 1 por ser todos del tipo de apoyo simple-simple como se muestra en la Figura 67.

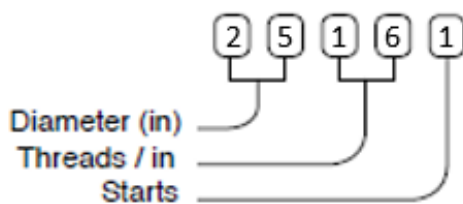


**Figura 67** Tipos de arreglos para el soporte de los husillos

Fuente: (Techno, 2014)

Es importante conocer la nomenclatura usada para determinar el diámetro y el paso de un tornillo. En la Figura 68 se puede observar como para tornillo 25161; 0.25 in de diámetro, 0.16 in de paso de rosca y 1 el número de hilos por vuelta.





**Figura 68** Nomenclatura para la selección de tornillos.  
Fuente: (Techno, 2014)

### 3.2.3.4.1 Eje Z

En la Tabla 64 se resumen los parámetros para la selección del tornillo, estos valores permitirán seleccionar de la Figura 69, al realizar el cruce entre los dos valores se considera idóneo para la aplicación a cualquiera de los diámetros de tornillo a la derecha y arriba del punto de intersección.

**Tabla 64**

*Parámetros para selección del husillo del eje Z.*

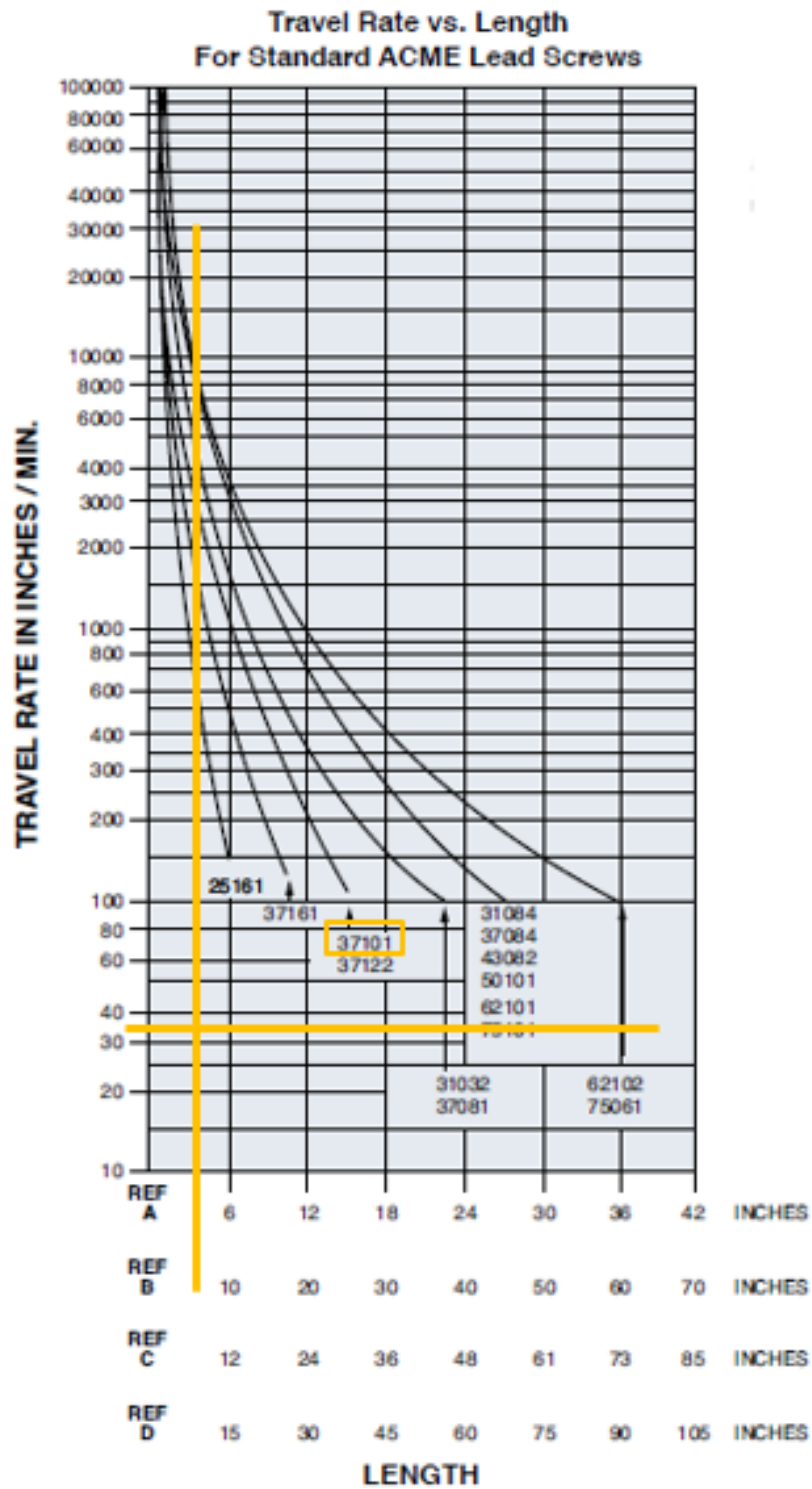
Velocidad avance	900 mm/min	35.43 in/min
Longitud Y	120 mm	4.72 in
Longitud X	80 mm	3.15 in

De la Figura 69 se seleccionó un tornillo 37101. El cuál nos indica un diámetro como mínimo de 9.4 mm (0.37 in) con un paso de 2.54 mm (0.10 in). A continuación se procede a calcular la velocidad máxima permitida para este husillo y la carga máxima permitida para el tornillo con las ecuaciones 3.140 y 3.141 estos valores se deben considerar para la selección del motor y el dimensionamiento final del eje Z los resultados se muestran en la Tabla 65.

**Tabla 65**

*Velocidad máxima y carga máxima husillo Eje Z*

Cs	78923.444	RPM
P	26529.049	lb



**Figura 69** Selección del tornillo para el eje Z  
Fuente: (Techno, 2014)

### 3.2.3.4.2 Eje X

En la Tabla 66 se resumen los parámetros de entrada para la selección del tornillo para este eje, estos valores permitirán seleccionar de la Figura 70 de igual manera que con el eje Z.

**Tabla 66**

*Parámetros para selección del husillo del eje X.*

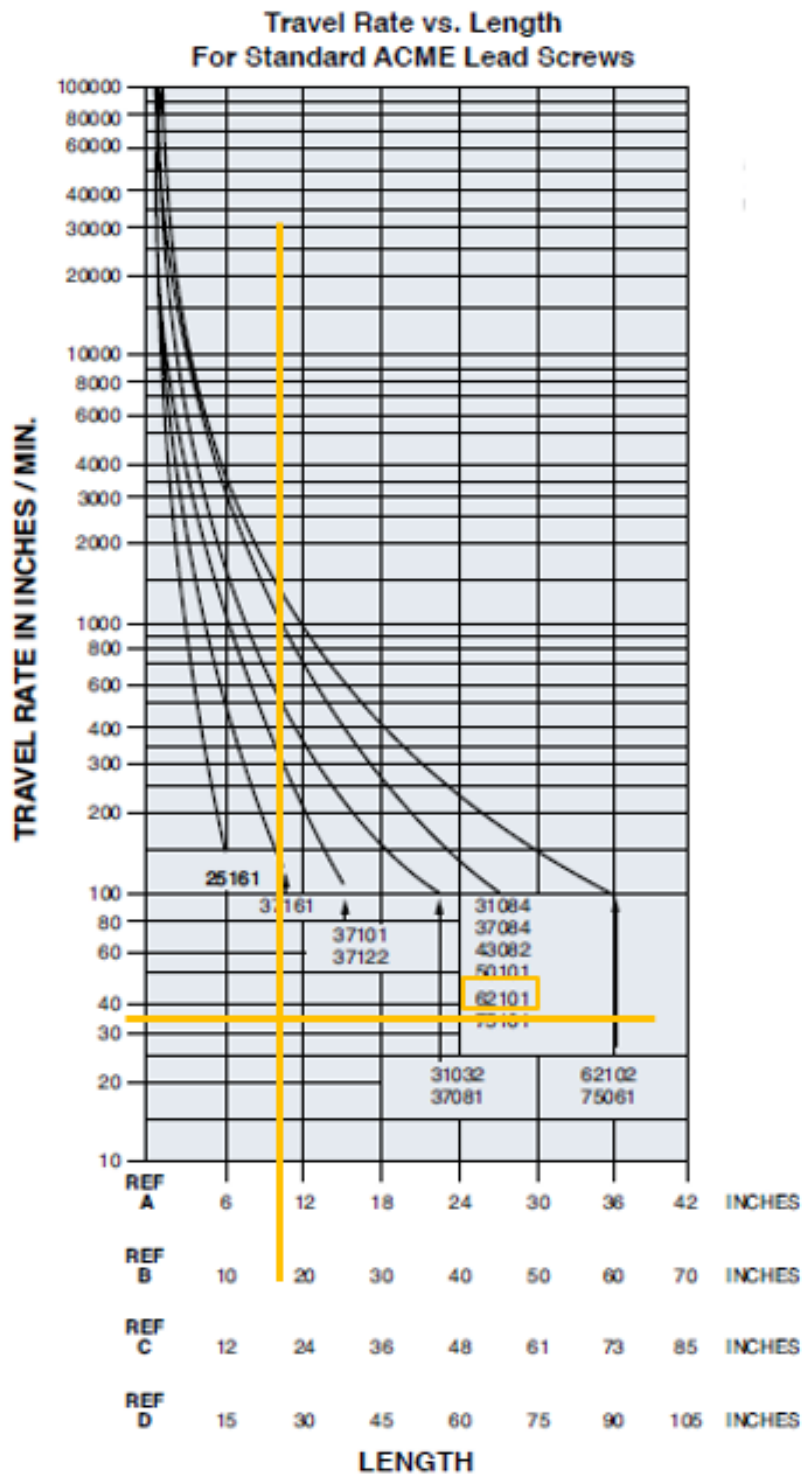
Velocidad avance	900 mm/min	35.43 in/min
Longitud Y	454 mm	17.87 in
Longitud X	400 mm	15.75 in

De la Figura 70 se seleccionó un tornillo 62101. El cuál nos indica un diámetro como mínimo de 15.75 mm (0.62 in) con un paso de 2.54 mm (0.10 in). A continuación se procederá a calcular la velocidad máxima permitida para este tornillo y la carga máxima permitida con las ecuaciones 3.140 y 3.141 estos valores se deben considerar para la selección del motor y el dimensionamiento final del eje X los resultados se muestran en la Tabla 67.

**Tabla 67**

*Velocidad máxima y carga máxima husillo eje X*

Cs	9238.67	RPM
P	8363.56	lb



*Figura 70* Selección del tornillo para el eje X  
Fuente: (Techno, 2014)

### 3.2.3.4.3 Eje Y

En la Tabla 68 se resumen los parámetros de entrada para la selección del tornillo para este eje, estos valores permitirán seleccionar de la Figura 71 aplicando el mismo criterio del eje Z.

**Tabla 68**

*Parámetros para selección del husillo del eje Y.*

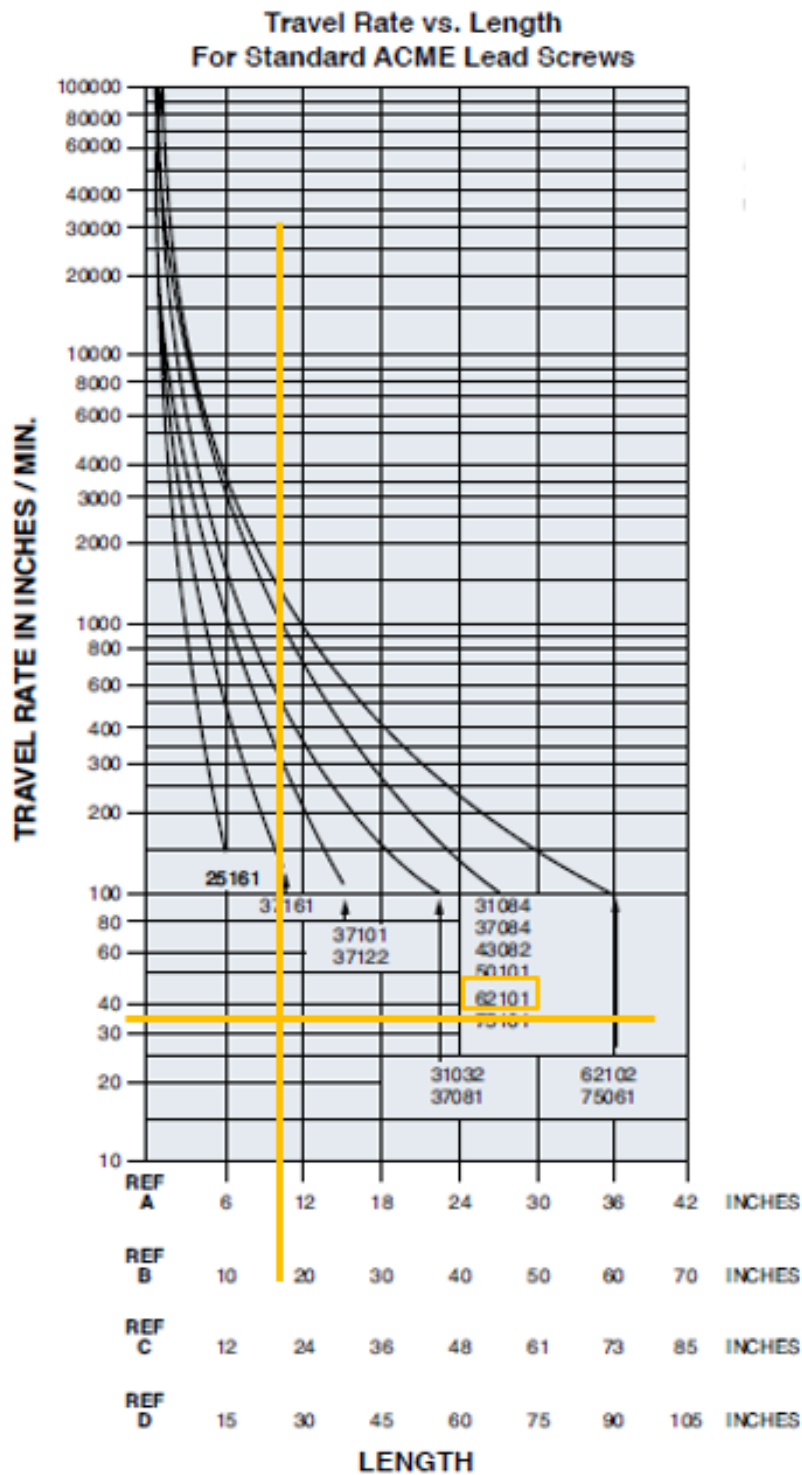
Velocidad avance	900 mm/min	35.43 in/min
Longitud Y	545 mm	21.46 in
Longitud X	500 mm	19.69 in

De la Figura 71 se seleccionó un tornillo 62101. El cuál nos indica un diámetro como mínimo de 15.75 mm (0.62 in) con un paso de 2.54 mm (0.10 in), se procede a calcular la velocidad máxima permitida para este tornillo y la carga máxima permitida con las ecuaciones 3.140 y 3.141 estos valores se deben considerar para la selección del motor y el dimensionamiento final del eje X los resultados se muestran en la Tabla 67.

**Tabla 69**

*Velocidad máxima y carga máxima husillo eje Y*

Cs	6411.04	RPM
P	5352.70	lb



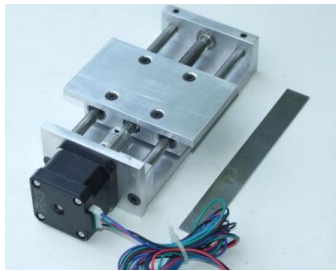


*Figura 71* Selección del tornillo para el eje Y  
Fuente: (Techno, 2014)

### 3.2.3.4.4 Tornillos y husillos comerciales seleccionados

En la Tabla 70 se muestran los tornillos y husillos seleccionados que cumplen con las caracterizas de diseño de los pasos anteriores.

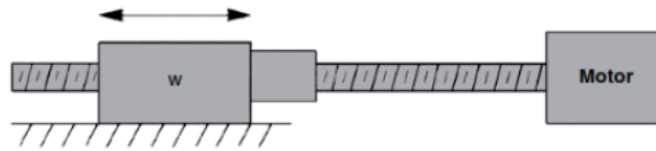
**Tabla 70**  
*Datos deflexión eje Y*

Eje CNC	Gráfica	Especificaciones
Eje X		SFU1605 C7 Longitud:500 mm Diámetro:16 mm Paso: 5 mm
Eje Y		SFU1605 C7 Longitud:600 mm Diámetro:16 mm Paso: 5 mm
Eje Z		SFU1002 C7 Longitud:140 mm Diámetro:10 mm Paso: 2 mm

(AliExpress, 2018)

### 3.2.3.5 Cálculo Torque motores

A continuación en la Figura 72, se muestra el cálculo del torque requerido por el motor para acelerar la masa que se mueve horizontalmente.



**Figura 72** Esquema torque motor  
Fuente: (Techno, 2014)

El torque necesario para acelerar el sistema está dado por la ecuación:

$$T = 2 * I_o * \frac{\omega'}{t} * \frac{\pi\theta}{180} \quad (3.142)$$

- $T$ : Torque requerido (oz.in)
- $I_o$ : Carga Inercial (lb\*in<sup>2</sup>)
- $\theta$ : Ángulo de paso (grados)
- $\omega'$ : Velocidad (pasos/segundos)
- $t$ : Tiempo para alcanzar la velocidad (segundos)

La Inercia total se calcula a partir de la ecuación 3.143.

$$I_o = I_{eq} + I_{tornillo} + I_{rotor} \quad (3.143)$$

- $I_{eq}$ : Inercia equivalente (lb\*in<sup>2</sup>)
- $I_{tornillo}$ : Inercia del tornillo (lb\*in<sup>2</sup>)
- $I_{rotor}$ : Inercia del rotor (lb\*in<sup>2</sup>)

La Inercia equivalente se calcula a partir de la ecuación 3.144.

$$I_{eq} = w * \frac{1}{p^2} * 0.025 \quad (3.144)$$

- $w$ : Peso (lb)



- $p$ : Paso (hilos/in)

La Inercia del tornillo se calcula a partir de la ecuación 3.145.

$$I_{\text{tornillo}} = D^4 * Longitud * 0.028 \quad (3.145)$$

- $D$ : Diámetro del tornillo (in)

### 3.2.3.5.1 Cálculo Torque del motor Eje Z

A continuación, en la Tabla 71 se muestran los datos utilizados para el cálculo del torque del motor del eje Z.

**Tabla 71**

*Inercia Equivalente motor Eje Z*

<b>Inercia equivalente</b>		
W	4.60	lb
P	5	hilos/in
Ieq	0,025	lb*in <sup>2</sup>
<b>Inercia del tornillo</b>		
D	0.31	in
L	5.51	in
I tornillo	0.001	lb*in <sup>2</sup>
<b>Torque del motor</b>		
I <sub>o</sub>	0.129	lb*in <sup>2</sup>
W	1600	pasos/s
teta	1.8	grados
t	0.15	s
I rotor	0.1023	lb*in <sup>2</sup>
Carga Inercial	0.129	lb*in <sup>2</sup>
Torque	7.20	oz*in

Como se observa en la Tabla 71 el torque necesario para mover el eje Z es de 7.20 oz\*in con una carga inercial de 0.129 lb\*in<sup>2</sup>

### 3.2.3.5.2 Cálculo Torque del motor Eje X

A continuación, en la Tabla 72 se muestran los datos utilizados para el cálculo del torque del motor del eje X.

**Tabla 72**

*Inercia Equivalente motor Eje X*

<b>Inercia equivalente</b>		
w	10.44	lb
p	5	hilos/in
Ieq	0.057	lb*in <sup>2</sup>
<b>Inercia del tornillo</b>		
D	0.63	in
L	19.68	in
Itornillo	0.086	lb*in <sup>2</sup>
<b>Torque del motor</b>		
Io	0.245	lb*in <sup>2</sup>
W	1600	pasos/s
teta	1.8	grados
t	0.15	s
I rotor	0.1023	lb*in <sup>2</sup>
Carga Inercial	0.245	lb*in <sup>2</sup>
Torque	13.70	on*in

Como se observa en la Tabla 72 el torque necesario para mover el eje X es de 13.70 oz\*in con una carga inercial de 0.245 lb\*in<sup>2</sup>

### 3.2.3.5.3 Cálculo Torque del motor Eje Y

A continuación, en la Tabla 73 se muestran los datos utilizados para el cálculo del torque del motor del eje Y.

**Tabla 73***Inercia Equivalente motor Eje Y*

<b>Inercia equivalente</b>		
w	14.98	lb
p	5	hilos/in
Ieq	0.082	lb*in <sup>2</sup>
<b>Inercia del tornillo</b>		
D	0.63	in
L	23.62	in
I tornillo	0.103	lb*in <sup>2</sup>
<b>Torque del motor</b>		
I <sub>o</sub>	0.287	lb*in <sup>2</sup>
W	1600	pasos/s
teta	1.8	grados
t	0.15	s
I rotor	0.1023	lb*in <sup>2</sup>
Carga Inercial	0.287	lb*in <sup>2</sup>
Torque	16.04	oz*in

Como se observa en la Tabla 72 el torque necesario para mover el eje Y es de 16.04 oz\*in con una carga inercial de 0.287 lb\*in<sup>2</sup>

### 3.2.3.5.4 Selección motores ejes

En la Tabla 74 se resumen los parámetros de diseño para la selección de los motores ideales para cada eje.

**Tabla 74***Selección de motores para cada eje criterios de diseño*

	Torque Requerido [oz*in]	Carga Inercial [lb*in <sup>2</sup> ]	Carga Inercial [g*cm <sup>2</sup> ]
<b>EJE Z</b>	7.200	0.129	9.070
<b>EJE X</b>	13.697	0.245	17.225
<b>EJE Y</b>	16.04	0.287	20.178

A partir del cálculo del torque requerido y la carga inercial para cada uno de los ejes se realiza la selección de los motores que se muestran en la Tabla 75.

**Tabla 75**  
*Selección de motores a pasos por eje.*

Eje CNC	Gráfica	Especificaciones
Eje X, Y		Nema 23: Modelo: 23HR16-1564S Torque: 56.6 oz*in Inercia: 57 g*cm <sup>2</sup> Corriente: 1.56 A
Eje Z		Nema 17: Modelo: 17HS13-1334S Torque: 18.4 oz*in Inercia: 15 g*cm <sup>2</sup> Corriente: 1.33 A

(OSM Technology Co, 2018)

### 3.2.3.6 Selección elementos

A partir del dimensionamiento realizado para los actuadores, ejes y tornillo con su respectivo husillo de bolas se procede a realizar la selección de los elementos de acoples y los que formaran el bastidor del equipo como son: estructura (tubo rectangular), acople flexible, rodamientos lineales.

#### 3.2.3.6.1 Estructura

Para el montaje de la estructura se consideran dos elementos importantes:

- Placas de aluminio de 10 mm de espesor
- Bastidor soporte formado por tubo rectangular de 70 x 30 x 1.5 mm

A continuación en la Figura se muestran los elementos mencionados anteriormente.

Para el montaje de la estructura se consideran dos elementos importantes:

- Placas de aluminio de 10 mm de espesor (Figura 73)
- Bastidor soporte formado por tubo rectangular de 70 x 30 x 1.5 mm (Figura 74)



**Figura 73** Placa de aluminio  
(Amerimet, 2018)



**Figura 74** Perfil rectangular  
(Leroy Merlin, 2018)

### 3.2.3.6.2 Acople Flexible

Se utilizan acoples flexibles para cada eje que permiten la unión entre el tornillo del husillo de bolas y el eje de los motores paso a paso.



**Figura 75** Acople Flexible  
(Naylamp Mechatronics, 2018)

Para los ejes X e Y se selecciona un acople de 6.35 a 10 mm, y para el eje Z se selecciona un acople de 5 a 8 mm.

### 3.2.3.6.3 Rodamientos lineales

Los rodamientos lineales que se seleccionaran de la tabla del Anexo I, son de uso específico para aplicación en equipos CNCs. En la Figura 76 se puede observar uno de estos rodamientos SC16UU.



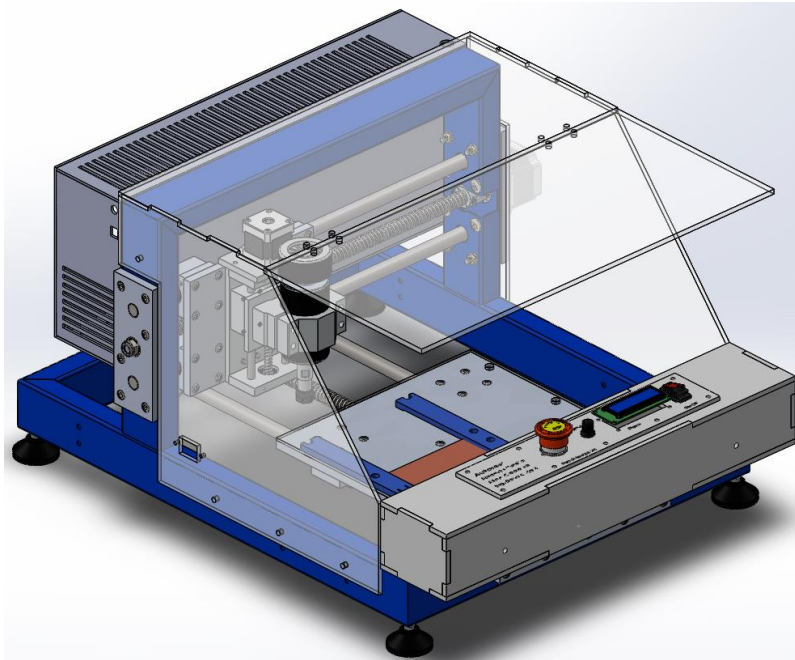
*Figura 76* Rodamientos lineales  
(AKK, 2018)

## 3.3 Diseño y Modelado CAD

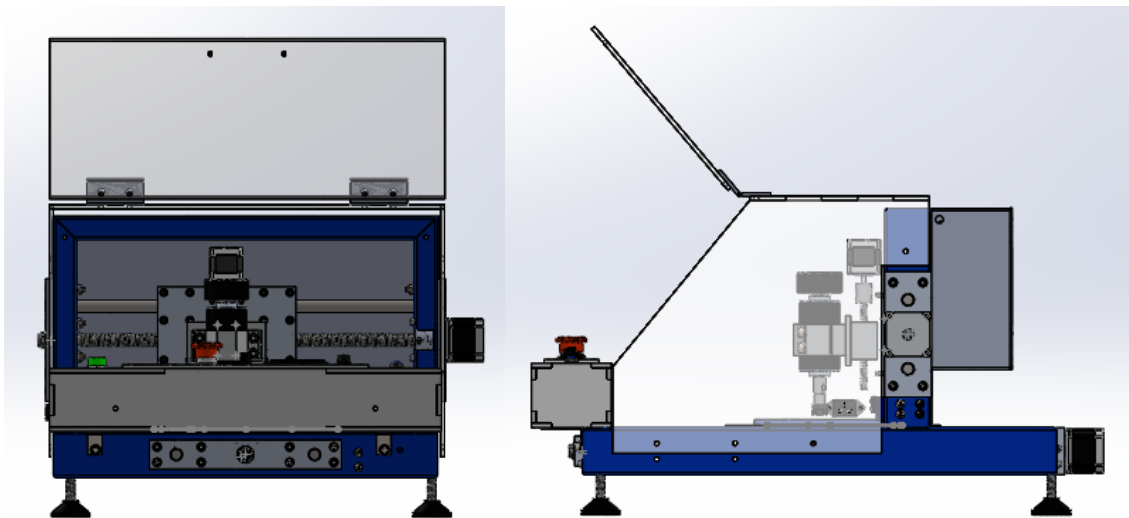
En esta sección se muestra el ensamble final del equipo a implementarse y sus principales sub-ensambles realizados en un software CAD. El diseño asistido por computadora permite identificar interferencias antes de la fase de fabricación. Una vez seleccionados los elementos base mecánicos de la sección 3.2, estos nos permiten dar un dimensionamiento más real a la máquina.

### 3.3.1 Modelado ensamble final

En la Figuras 77 se observa la vista isométrica final del equipo CNC y en la Figura 78 su vista frontal y su vista lateral izquierda.



*Figura 77* Ensamble máquina CNC

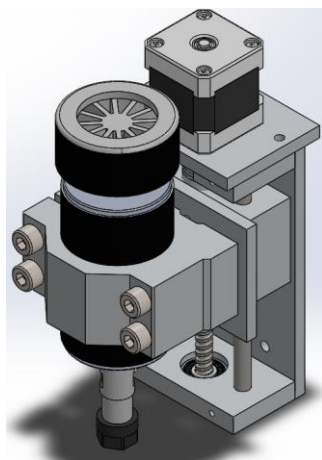


*Figura 78* Ensamble máquina CNC

A continuación se mostrarán los principales sub-ensambles que constituirán el equipo router CNC.

### 3.3.2 Diseño sub-ensamble Eje Z

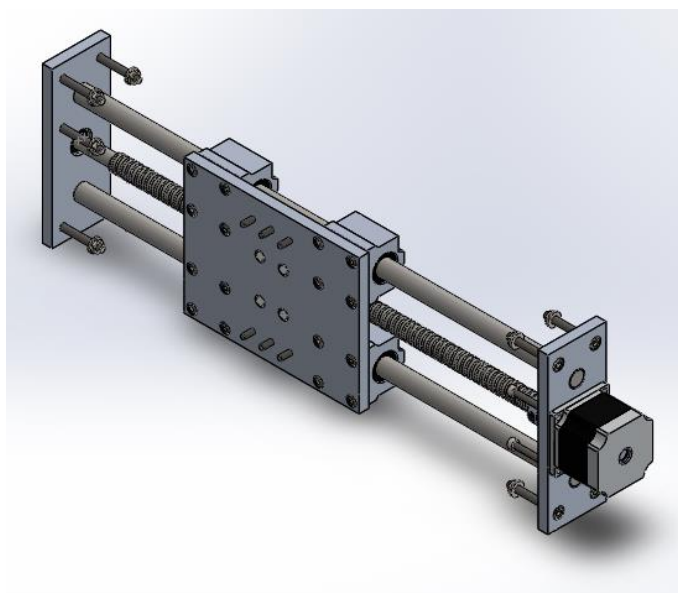
El mecanismo del Eje Z está compuesta por dos ejes y un tornillo sin fin, un motor spindle (110 V, 500 W, 12000 rpm) y un motor nema 17. Este sub-sistema (Figura 79) se acopla a la mesa de movimiento del eje X a través de un sistema de seis pernos M6 que unen las dos placas.



*Figura 79* Sub-ensamble eje Z

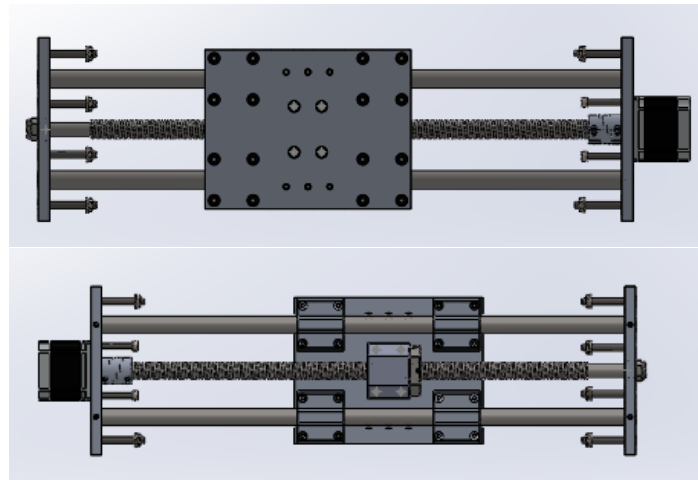
### 3.3.3 Diseño sub-ensamble Eje X

En la Figura 80 se puede observar el sub-sistema del eje X.



*Figura 80* Vista Isométrica sub-ensamble del eje X





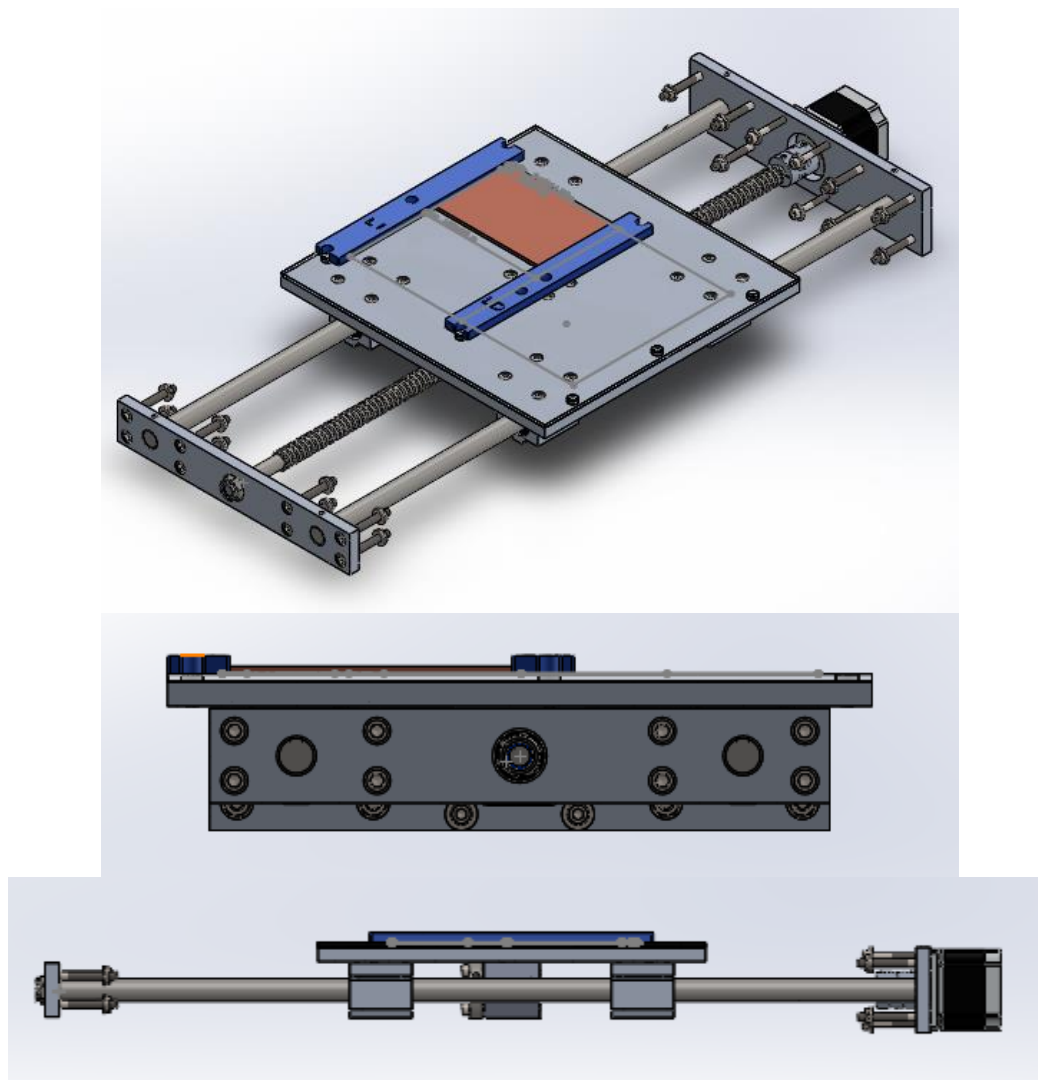
**Figura 81** Mecanismo Eje X. Vista Frontal y Vista Posterior

Para este modelado se emplearon los ejes, rodamientos, tornillo y husillo de bolas de la etapa de diseño para dimensionar al resto de elementos. De donde se obtuvo tres placas principales de aluminio con un espesor de 10 mm.

- **Placa Móvil:** Se utiliza una placa de 10mm de espesor cuyas dimensiones son: 139mm x180mm, esta placa se encargará de sujetar a los rodamientos lineales, la estructura del eje Z, los ejes y el tornillo central.
- **Ejes y Tornillo sin fin:** Se utilizan ejes de acero inoxidable de 16 mm y 500 mm de longitud.
- **Placas sujeción:** Se utilizan placas de aluminio de 10 mm de espesor para la sujeción de los ejes a la estructura del Eje X.

### 3.3.4 Diseño sub-ensamble Eje Y

En la Figura 82 se puede observar el sub-ensamble del eje Y.



**Figura 82** Sub ensamble Eje Y. Vista Isométrica, Frontal y Lateral Izq. respectivamente

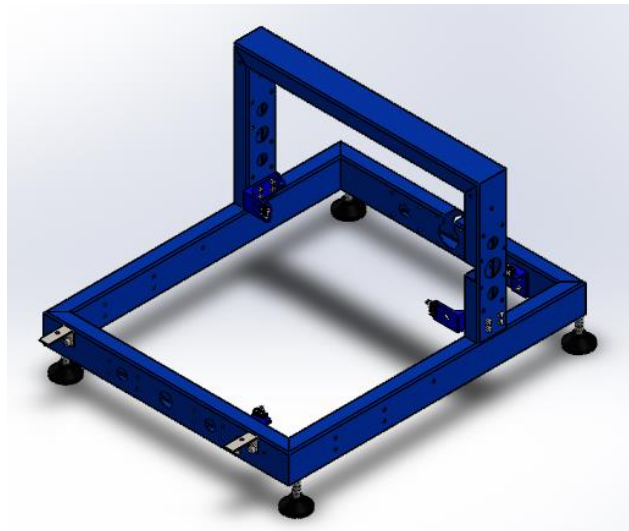
Para este modelado se dimensionaron el resto de elementos a partir de los elementos seleccionados en la sección de diseño mecánico.

- Placas de sujeción: Se utilizan placas de sujeción para los ejes y la estructura del Eje Y.

- Placa móvil: Se utilizan placas 10 mm de espesor para la sujeción de la placa de circuito impreso.
- Ejes y Tornillo sin fin: Se utilizan ejes de acero inoxidable de 16 mm y 500 mm de longitud.
- Placas de acrílico: Su propósito es posicionar las baquelitas y evitar el contacto de la herramienta con la base de aluminio.
- Placas de PLA: Se utilizan placas impresas en PLA para sujetar las baquelitas de diferentes tamaños.

### 3.3.5 Bastidor estructural del equipo

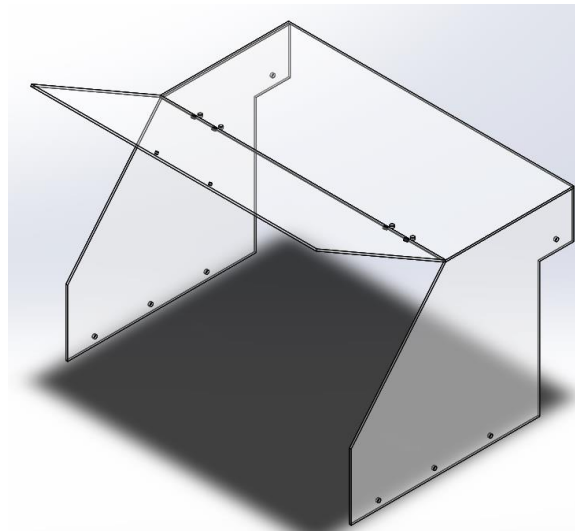
Con el principio de garantizar el paralelismo y calibración de los ejes de trabajo los soportes de aluminio de cada sub-sistema para cada eje se separan de la estructura macro o bastidor que soporta al equipo CNC, la misma se muestra a continuación.



*Figura 83* Carcaza de protección

### 3.3.6 Modelado carcaza de protección

La carcaza de protección fue uno de los factores importantes en la etapa de diseño mecatrónico, la misma se diseñó en material de acrílico de 5 mm de espesor utilizando la tecnología de corte láser para la fabricación de cada cara. En la Figura 84 se muestra la misma.



*Figura 84* Carcasa de protección

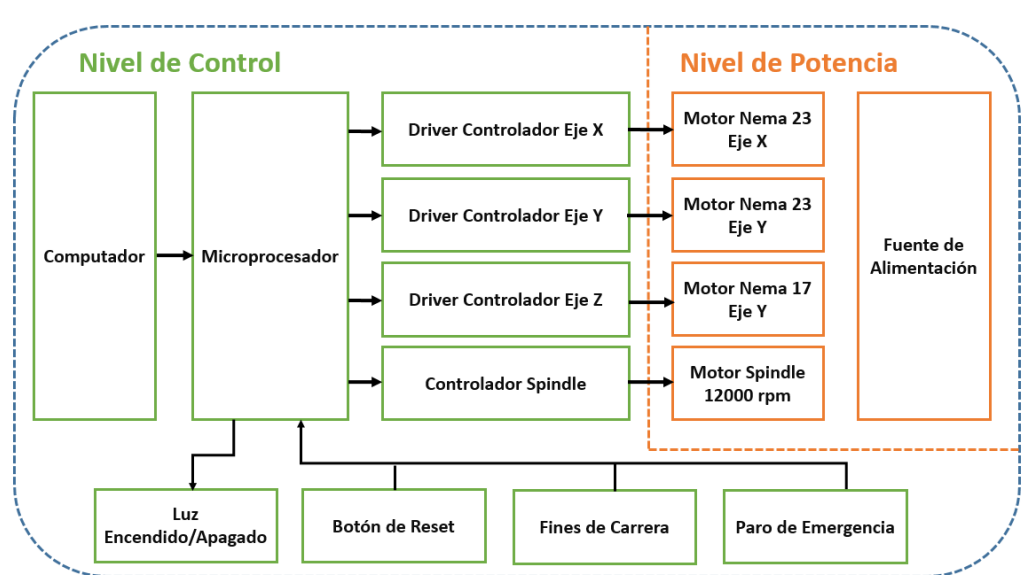
## 3.4 Diseño eléctrico y electrónico

Esta sección trata sobre el diseño del sistema de control para regular el movimiento del equipo CNC, esta sección está dividida en el nivel de control y en el nivel de potencia, se seleccionarán los elementos eléctricos y electrónicos de tal manera que cumplan los aspectos de diseño considerados en secciones anteriores.

### 3.4.1 Diagrama de bloques del sistema

El sistema consta de varios componentes como: motores a pasos, drivers A4988, sensores fines de carrera, botón de reset, fuente, paro de emergencia, motor spindle y luces indicadoras. Algunos de estos elementos ya fueron seleccionados en los capítulos de diseño mecánico. En la

Figura 85 se muestra un diagrama de bloques general de los elementos que conforman el equipo CNC.



*Figura 85* Esquema del sistema electrónico

### 3.4.2 Nivel de Control

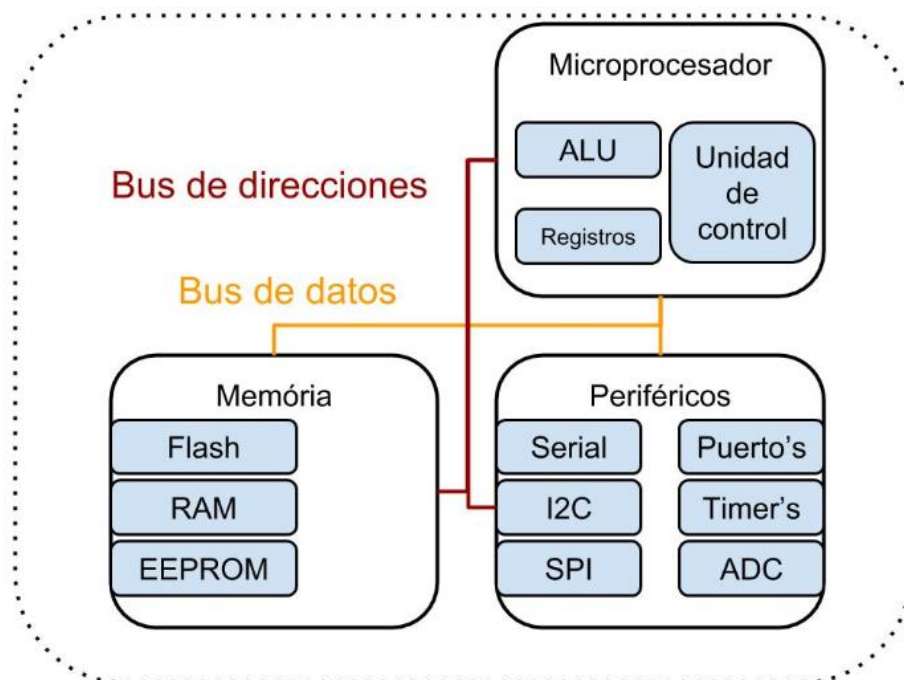
El nivel de control se divide en dos secciones el de hardware y el de software. El sistema funcionará a manera de un controlador en lazo abierto ya que no se tendrá una retroalimentación de velocidad o posición, este sistema puede usarse de esta manera por la precisión del sistema mecánico de husillo de bolas, el uso de motores a pasos y el uso del firmware GRBL que garantizarán un buen desempeño del equipo. Los fines de carrera realizarán el trabajo de alarmas para evitar choques mecánicos del equipo.

#### 3.4.2.1 Hardware de control

En esta sección están todos los elementos físicos que permitirán gobernar el equipo CNC.

### 3.4.2.1.1 Microcontrolador

El microcontrolador es un circuito integrado programable que para el desempeño del equipo CNC será el responsable de albergar el firmware para controlar las señales de entrada y salida que controlaran al router CNC. En la Figura 86 se muestra un esquema general de un microcontrolador.



**Figura 86** Esquema de un microcontrolador.  
(E-Marmolejo., s.f.)

La selección del microcontrolador está dividida entre las familia PIC y la familia AVR, ambas marcas tienen una arquitectura de 8 bits, cuentan con una CPU RISC y su memoria de programa viene implementada en Flash, de igual manera ambas familias presentan periféricos de entradas y salidas digitales, analógicos y PWM, basado en estas aseveraciones se podría considerar que ambas familias son iguales sin embargo en la Tabla 76 a continuación se presentarán las diferencias más marcadas, calificando de 1 a 10 cada característica siendo 1 el menos beneficioso y 10 el más beneficioso. (Erika, 2018)

**Tabla 76***Diferencias entre Microcontroladores AVR y PIC*

<b>Característica</b>	<b>AVR</b>	<b>PIC</b>
Lenguaje de Programación	8	7
Potencia y consumo de energía	9	6
Bajo costo del software de programación	8	6
Bajo costo hardware	9	7
Total	34	26



(Erika, 2018)

Del análisis realizado se encontraron ventajas significativas en la selección de un microcontrolador AVR, para el nivel de control del equipo router CNC se ha seleccionado un ATMEGA 2560. Este microcontrolador presenta las ventajas de ser robusto y potente de 8 bits es el que más pines tiene de la familia, tiene una memoria de programación elevada para recibir al firmware GRBL tiene las siguientes características:

- 256KB de memoria flash para programación
- Tamaño de datos RAM: 8KB
- Interfaz: 2-wire, SPI, USART
- Velocidad: 16MHz
- Puertos de entrada/salida programables: 86
- Temporizadores: 6
- Canales de ADC: 16 canales de 10 bits
- Empaquetado: TQFP-100 (ID ELECTRÓNICA, 2018)

El microcontrolador seleccionado presenta la ventaja de trabajar en tarjetas de control CNC que se analizan en la Tabla 77, seleccionando como la tarjeta controladora para el equipo una CNC Shield que trabajará en conjunto con el microcontrolador.

**Tabla 77**  
*Tarjetas de control*

	<b>GT2560</b>	<b>CNC Shield</b>
<b>Tarjeta de Control CNC</b>		
Microcontrolador	ATMEGA2560	ATMEGA2560
Dimensiones	109x78x22	110x60x40
Termistores	3	3
Fines de Carrera	6	6
Ventilador Controlable	1	1
Motores a paso	5	5
Soporta LCD	Sí	Sí
Costo	\$165	\$30

( Geeetech Documentation, 2018)

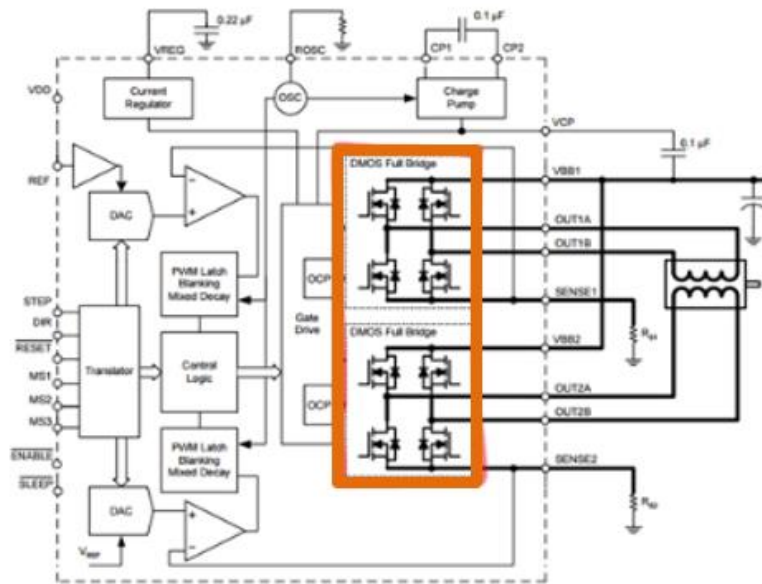
### 3.4.2.1.2 Driver Motor a Pasos

El driver de un motor a pasos es un circuito integrado que funciona como una interfaz entre el microcontrolador y el motor a pasos, el microcontrolador funciona con 5V y no es capaz de energizar a un motor a pasos de 12 V, aquí radica la importancia del mismo. El driver realiza la función de una válvula de paso para energizar o no los motores.

En la Tabla 19 se realizó el análisis de porque seleccionar motores a pasos para la aplicación mientras que en la Tabla 57 se seleccionaron motores Nema 23 para los ejes X e Y respectivamente y un motor Nema 17 para el eje Z. Es importante conocer que los motores

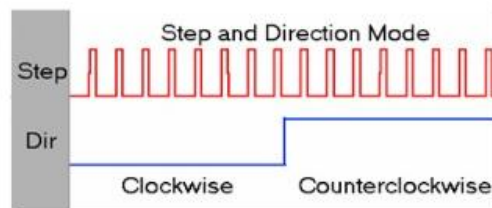


seleccionados en esta fase de diseño son del tipo bipolar, razón por la cual el driver debe permitir invertir la dirección de la corriente, para lo cual los driver utilizan el principio de un puente H ampliamente usado en electrónica. La Figura 87 muestra el concepto de un puente H.



**Figura 87** Esquema interno del driver A4988, circuitos puente H marcados.  
(Loureiro, 2018)

El microcontrolador controla al driver que a su vez controla al motor a pasos mediante dos pines principales. El pin (STEP) que es un pulso que mueve al motor un micropaso y el pin (DIR) que indica el sentido de giro del motor. En la Figura 88 se muestra un cambio de giro en secuencia de pulsos.



**Figura 88** Pines de control de un driver de motor a pasos.  
(Loureiro, 2018)

La selección del driver se realiza a partir de la corriente propia para cada motor, en la Tabla

78 muestran los driver seleccionados y sus características principales.

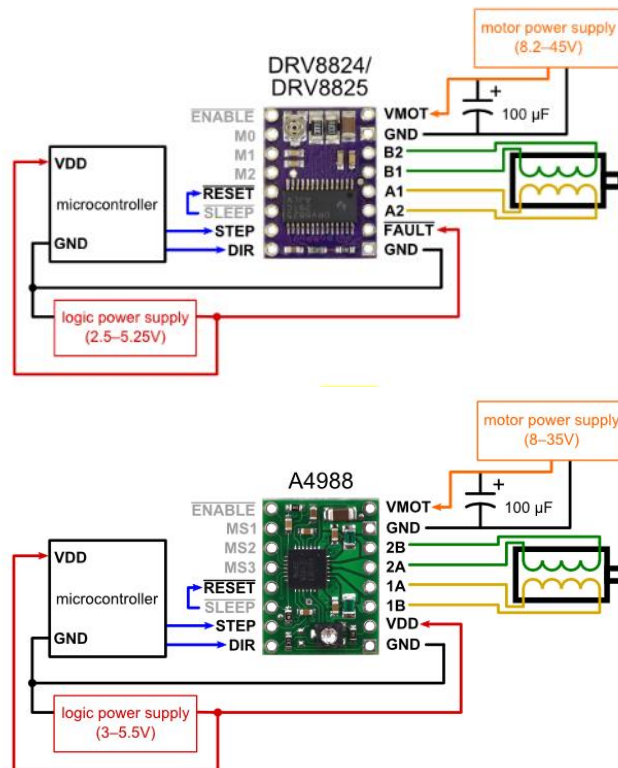
**Tabla 78**

*Selección de driver para cada motor. .*

Eje CNC	Motor	Driver
Eje X, Y	Nema 23 Corriente: 1.56 A	<b>DRV8825</b> Corriente Máx.: 2.5 A V. Operación: 8 a 45V
Eje Z	Nema 17 Corriente: 1.33 A	<b>A4988</b> Corriente Máx.: 2A V. Operación: 8 a 35V

(OSM Technology Co, 2018)

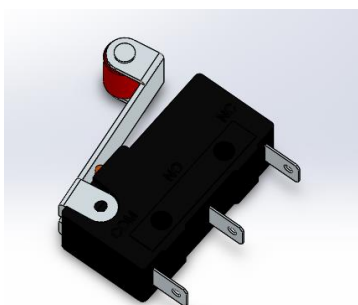
En las Figuras 89 a continuación se observan los esquemas de conexiones para los dos drivers seleccionados.



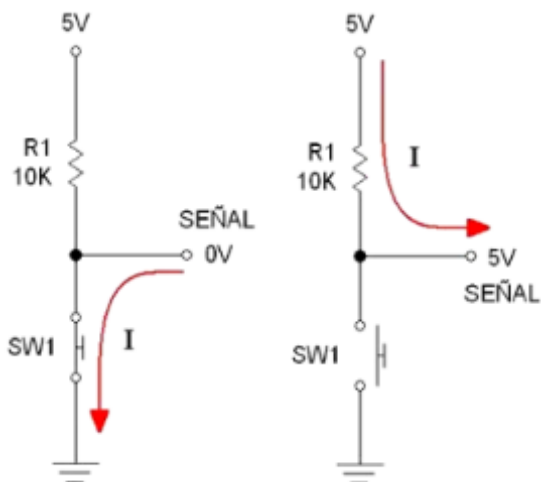
**Figura 89** Esquemas de conexión para los drivers.  
(Loureiro, 2018)

### 3.4.2.1.3 Fines de Carrera

Los sensores fines de carrera como su nombre lo indica ayudan a identificar los límites de movimiento de cada eje del equipo CNC, son sensores del tipo digital es decir únicamente tienen 2 estados lógicos. En el equipo permitirán evitar choques entre las placas móviles y el bastidor. La Figura 90 muestra uno, es necesario recalcar que la CNC Shield cuenta con acondicionamientos tipo Pull-up (Figura 91) para acondicionar la señal proveniente de un fin de carrera.



**Figura 90** Sensor fin de carrera



**Figura 91** Configuración Pull-up  
(HERNÁNDEZ, 2018)

### 3.4.2.1.4 Esquema eléctrico y electrónico

En la Figura 92 se muestra un esquema eléctrico de las conexiones a nivel de control del equipo router CNC.

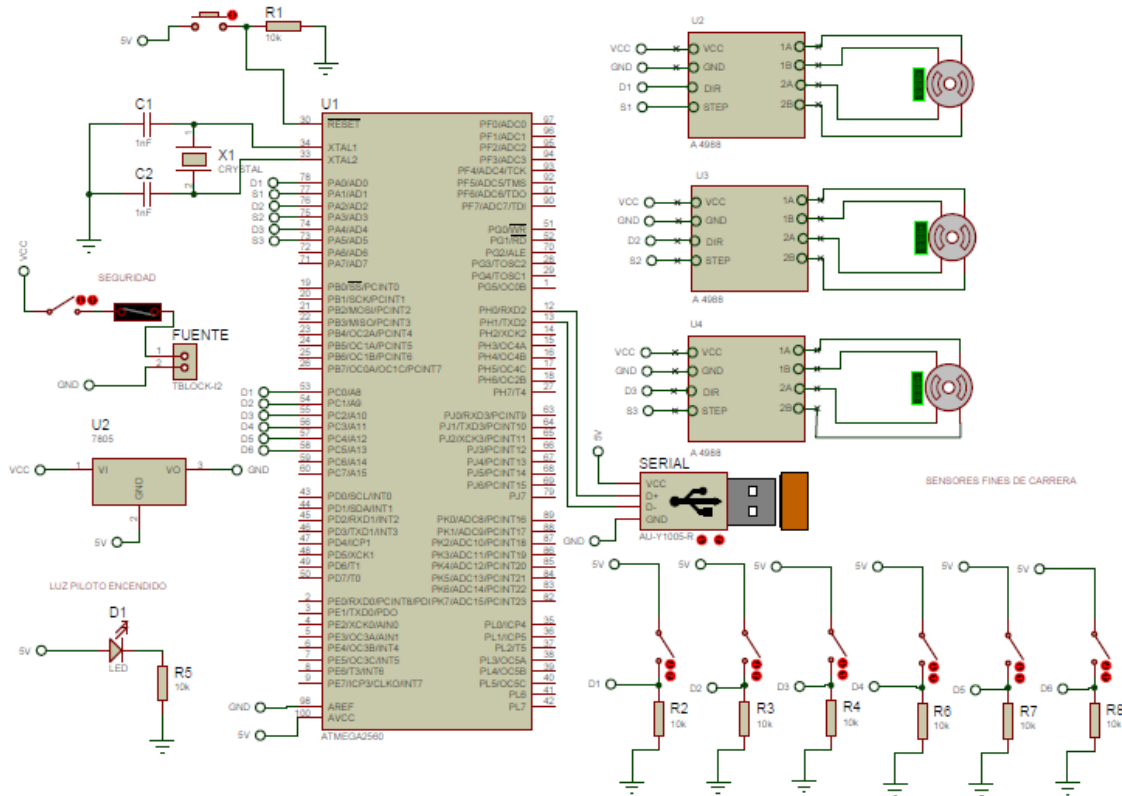


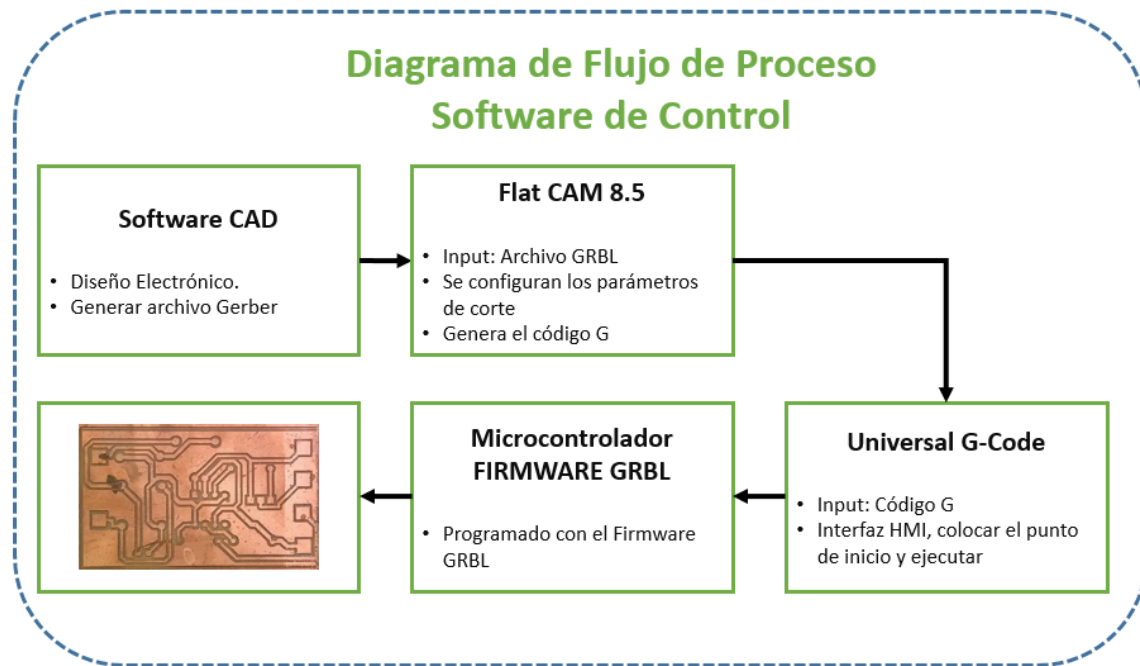
Figura 92 Esquema de un microcontrolador

### 3.4.2.2 Software de Control

#### 3.4.2.2.1 Flujo de Proceso del Equipo CNC

El proceso de control del equipo comienza con la fase de diseño electrónico de un circuito en cualquier software CAD, se genera el archivo Gerber luego de revisar que el circuito cumpla con las normas IPC citadas en la etapa de estado del arte. A continuación se emplea el archivo Gerber para convertirlo en Código G que es el lenguaje de programación de todos los equipos que usan como principio el control numérico esta transformación se realiza con el uso del software Flat Cam en el que adicionalmente se ingresan los parámetros de manufactura para el proceso. A continuación el archivo código G se carga al software Universal G-Code, que es la interfaz entre

la máquina y el usuario, este código G es interpretado mediante el firmware cargado en el microcontrolador denominado GRBL. Todo este proceso se resume en la Figura 93.



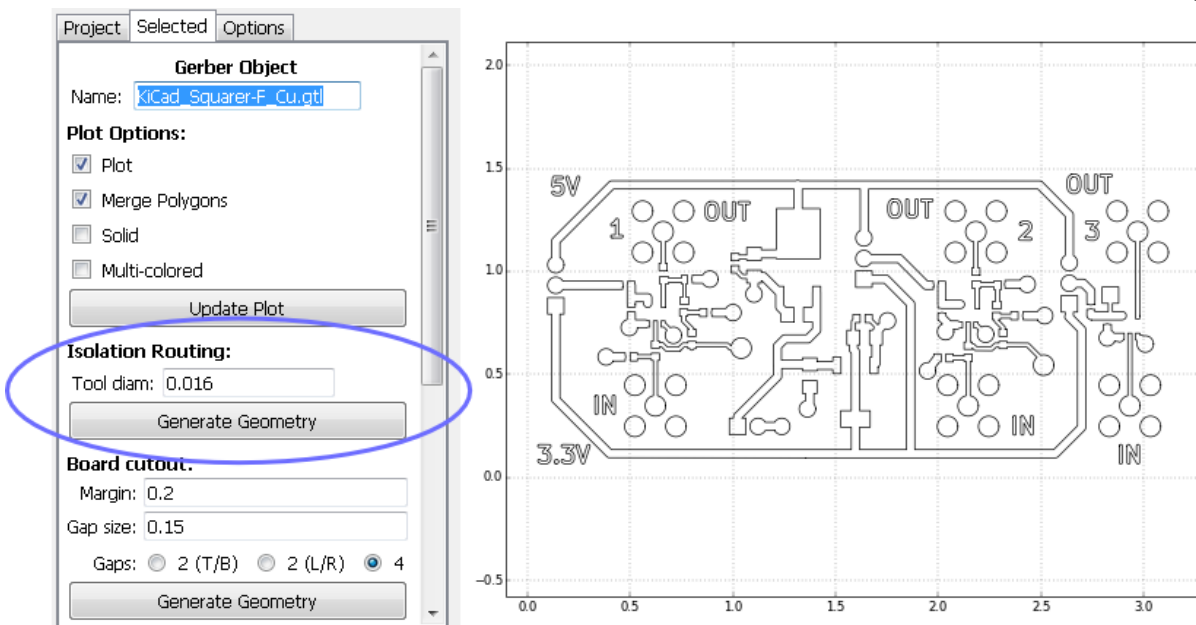
*Figura 93* Esquema de un microcontrolador

A continuación se detalla las principales ventajas de cada software seleccionado para esta aplicación.

#### 3.4.2.2.2 Flat Cam

Software gratuito y de código abierto CAM escrito en Python, específicamente diseñado para el fresado de circuitos PCBs.

Flat Cam puede reconocer archivos tipo Gerber, Excellon o código G, visualizarlos y generar un enrutamiento de asilamiento creando trayectorias para cortar tus rastros de señal. En la Figura 94 se puede observar una imagen de la interfaz de este software. (FlatCAM, 2018)



**Figura 94** HMI del software Flat Cam  
(FlatCAM, 2018)

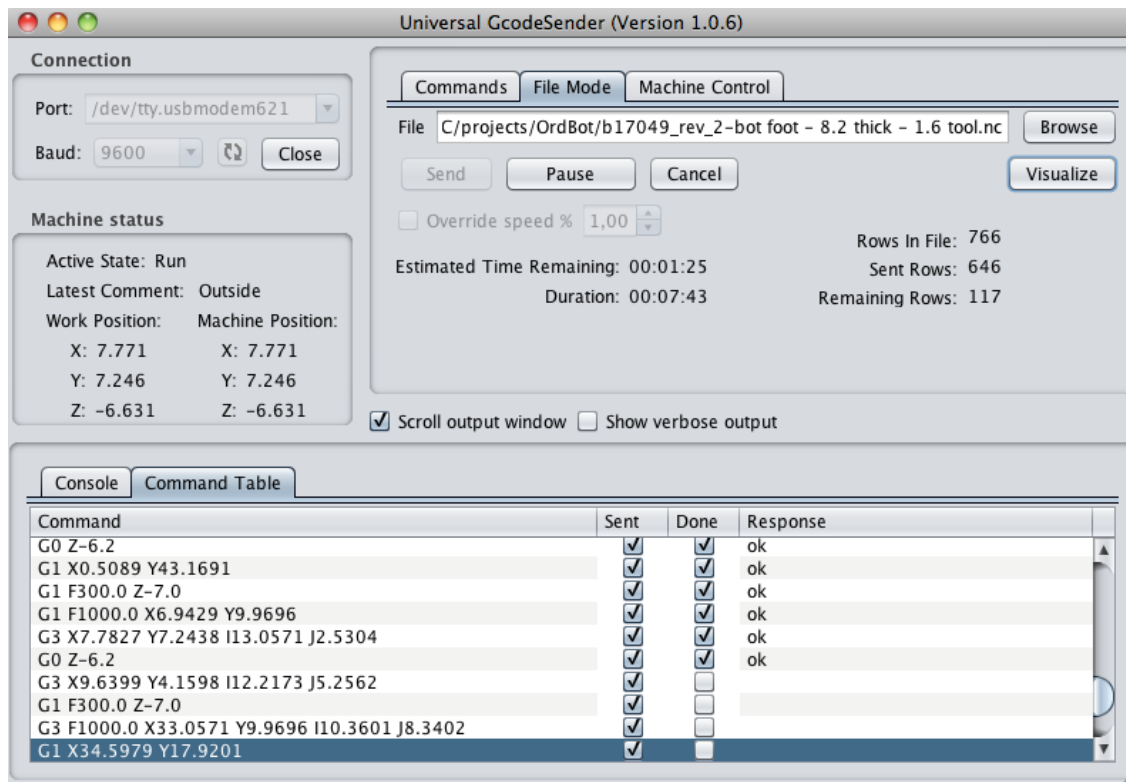
### 3.4.2.2.3 Universal G-Code

Es una plataforma de G-Code basada en Java que tiene una excelente comunicación con controladores CNC avanzados como GRBL y TinyG. A continuación se listan algunas características del software.

- Plataformas de soporte Windows, Linux y equipo.
- Archivo JAR ejecutable todo en uno: si tiene Java, no hay nada que instalar.
- 3D Gcode Visualizer permite la retroalimentación de la posición de la herramienta en tiempo real.
- Permite estimar tiempos de operación.
- Más de 3000 líneas de código de prueba de unidad y otras 1000 líneas de comentarios que documentan las pruebas.

(UGS, 2018)

En la Figura 95 se muestra la interfaz de este software. Esta fue una de las opciones que se manejó desde la etapa de perfil de la máquina. Es un software libre, multiplataforma de fácil uso su principal adversario es el software Mach3 cuya licencia de uso está en \$180 dólares. Durante la etapa de pruebas el software tuvo un desempeño óptimo.



**Figura 95** HMI del software Universal G-Code Sender  
(Universal Gcode Sender, 20118)

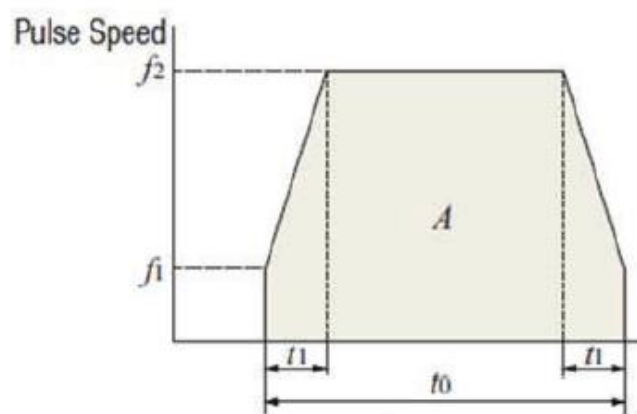
#### 3.4.2.2.4 Firmware GRBL Controller

La forma más fácil de comunicarse con un robot del tipo CNC, es usando G-Code.

El firmware es un software que establece la lógica de más bajo nivel, encargado de controlar los circuitos electrónicos, es decir es el encargado de manejar el hardware, para esto se utiliza el firmware GRBL Controller que es un sistema de control computarizado encargado de enviar el

código G a la tarjeta de control para movimiento de los motores paso a paso y la activación de los actuadores.

Permite una aceleración suave ya que para lograr girar el motor cuando el mismo está parado la inercia es mayor, por ese motivo se debe acelerar progresivamente, está es la base del Firmware para generar un movimiento más suave del equipo. En la figura 96 se puede observar una un pulso del equipo.



**Figura 96** Seccionar los pulsos al driver para suavizar movimientos  
(Loureiro, 2018)

### Configuración del Firmware

Se puede establecer comunicación con GRBL, utilizando el programa Universal-G-Code-Sender mediante los comandos especiales que se muestran a continuación:

- **\$\$** Muestra todos los parámetros que se pueden configurar del equipo.
- **\$101=V** Ajusta los pasos por milímetro en relación al tornillo se calcula con la ecuación.

$$V = n/p \quad (3.146)$$

- $n$ : número de pasos del motor
- $p$ : paso del tornillo y husillo de bolas



- *V: Valor de la relacion que se carga al software*
- **\$I** (mostrar la información del firmware, budil, etc.)
- **\$N** (mostrar los bloques de inicio)
- **\$x** value (almacenar un valor en la EEPROM)
- **\$X** (desactivar el bloqueo de alarma)
- **!** (pausar el avance)
- **~** (reiniciar un ciclo o el continuar después de la pausa)
- **?** (mostrar el estado actual, posición, etc.)
- **ctrl-x** (reiniciar GRBL)

### 3.4.3 Nivel de Potencia

#### 3.4.3.1 Motores a pasos

En el nivel de potencia se utilizará un actuador para cada eje como se muestra a continuación: Los mismos ya fueron justificados su selección en la sección de tipo de motor y en el cálculo del torque requerido por eje.

Motores Nema 23 para el eje X e Y.

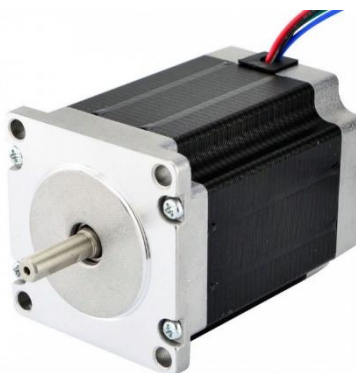
Motor Nema 17 para el eje Z.

- **Motor Nema 17:** El motor nema 17 es un motor bipolar es decir dispone de 2 bobinas sin tap central que consume 1,33 Amperios, tiene un torque de: 18.4 oz\*in, teniendo un ángulo de paso de 1,8 grados (200 pasos por vuelta), necesita una fuente de alimentación de 12 VDC. En la Figura 97 se muestra una ilustración del mismo. La Ficha técnica se adjunta en el Anexo 2.



**Figura 97** Motor Nema 17  
(STEPPER ONLINE, 2018)

- **Motor Nema 23:** Es un motor unipolar paso a paso, tiene un consumo de 1.56A, al igual que el nema17 tiene 200 pasos por vuelta y tiene un torque de 56.6 oz\*in, necesita una fuente de alimentación de 12 VDC, con un diámetro en el eje de 6,35 mm. En la Figura 98 se muestra el motor Nema 23. La Ficha técnica se adjunta en el Anexo 3.

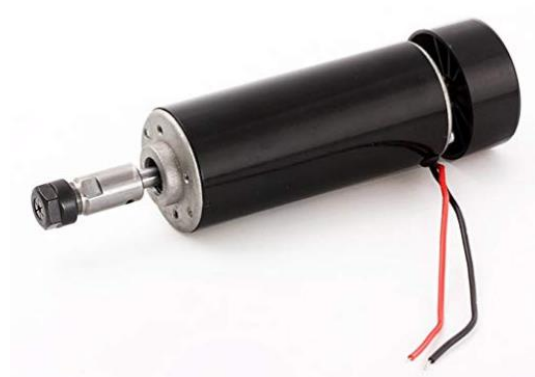


**Figura 98** Motores Nema 23  
(J KONG MOTOR, 2018)

### 3.4.3.2 Motor Spindle

**Motor DC:** Se utiliza un motor DC de 500w que proporciona 12000 rpm el cual fue seleccionado en la sección de parámetros de corte, viene adaptado su propia fuente con un torque

máximo de 0,59 Nm, la velocidad del motor se puede controlar mediante potenciómetro o directamente del firmware de la máquina (Ver Figura 99).



**Figura 99** Motor Spindle 12000 rpm  
(AliExpress, 2018)

### 3.4.3.3 Dimensionamiento de la fuente

Para el dimensionamiento de la fuente es necesario calcular la potencia que necesita el router CNC considerando el voltaje DC con el que va a operar la máquina y la corriente que va a utilizar cada actuador, sensor, driver y tarjeta controladora. A continuación en la Tabla 79 se detallan los elementos con la corriente que utilizan para el cálculo de la potencia total. Es importante notar que los mayores consumidores de energía después del motor spindle son los motores a pasos, sin embargo los mismo nunca se activan en simultáneo por lo que vamos a tomar de referencia el mayor de ellos.

Para el cálculo de potencia se emplea la siguiente ecuación:

$$P = V * I \quad (3.147)$$

- $P =$  potencia en vatios [W]
- $V =$  voltaje DC que va a ser igual a 12 [V]
- $I =$  corriente en Amperios [A]  $p:$  paso del tornillo y husillo de bolas

**Tabla 79***Dimensionamiento fuente*

Cantidad	Elemento	Corriente [A]
2	Motor Nema 17	1,33 [A]
1	Motor Nema 23	1.56 [A]
3	Sensores fines de carrera	0,025 [A]
1	Tarjeta controladora CNC Shield	0,2 [A]
1	Motor dc	4 [A]
3	Driver a4988	0,150 [A]
	Total de corriente necesaria	7.74 [A]
	Potencia de la fuente	92.82 [W]

La fuente seleccionada (Figura 100) tiene las siguientes especificaciones:

- Input 110V
- Potencia de 100 W
- Corriente de 8.5 A
- Protector metálico
- Dimensiones 199x98x42



**Figura 100** Fuente 12 VDC  
(Valley LED, 2018)

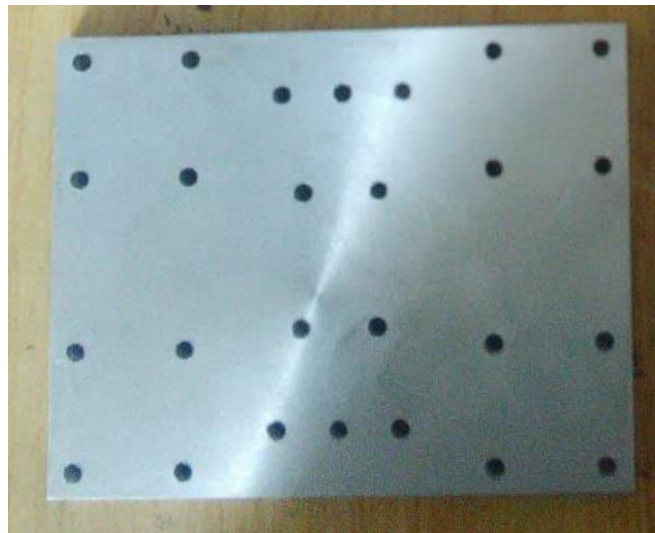
## CAPITULO IV

### IMPLEMENTACIÓN

El presente capítulo abordará el proceso de fabricación del equipo router CNC, detallará imágenes de las partes fabricadas localmente y el proceso de ensamblaje con las partes estándares adquiridas para facilitar el diseño y disminuir costos.

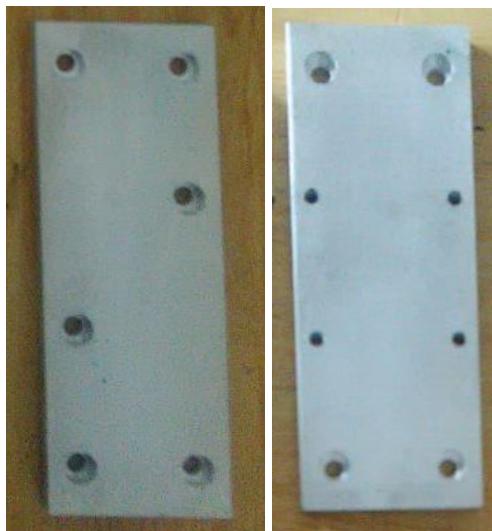
#### 4.1 Subsistema eje X

Para el sistema del eje X se fabricaron tres placas de 10 mm de espesor en aluminio, todas las placas se fabricaron con la ayuda de una máquina CNC, la primera es la cama central móvil a la que se adapta el eje Z para su posterior traslado. En la Figura 101 se puede observar esta la placa.



*Figura 101* Placa móvil eje X, 180x139x10

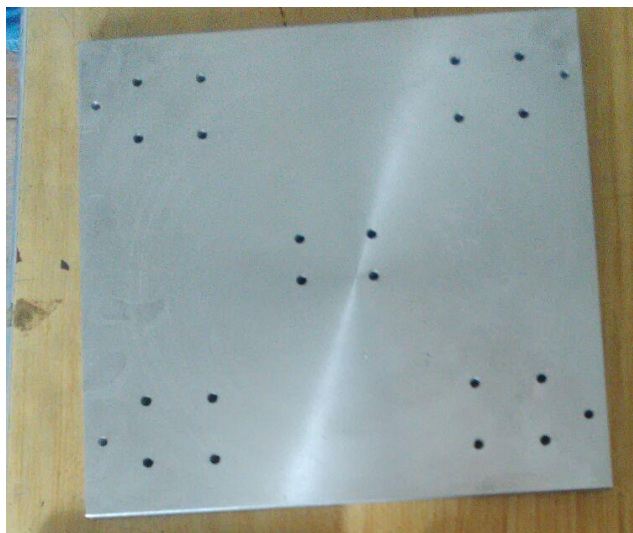
Las otras dos placas constituyen los soportes para anclar el sistema X y Z al bastidor. En la Figura 102 se muestran estas placas, no son idénticas ya que la usada en lado izquierdo de la máquina tiene perforaciones para adaptar el motor nema 23.



**Figura 102** Placas laterales soporte eje X, dimensiones 160x60x10

#### **4.2 Subsistema eje Y**

De similar manera a la sección anterior, para el eje Y se fabricaron tres placas en aluminio de 10 mm de espesor. La Figura 103 muestra la placa centra móvil construida para el eje Y que será la cama o la mesa de trabajo para las baquelitas.



**Figura 103** Placas móvil eje Y, dimensiones 284x274x10

Por otra parte en la Figura 104 se muestran las placas de soporte al bastidor frontal y posterior.



**Figura 104** Placas laterales soporte eje Y  
Frontal: 250x38x10  
Posterior: 250x60x10

### 4.3 Bastidor

Para el soporte de la estructura se construyó un bastidor de tubo rectangular de 60x30x1.5.

En la Figura 105 se muestra la estructura para el eje X y para el eje Y.



**Figura 105** Bastidor equipo CNC. Tubo rectangular 60x30x1.5

### 4.4 Ensamble

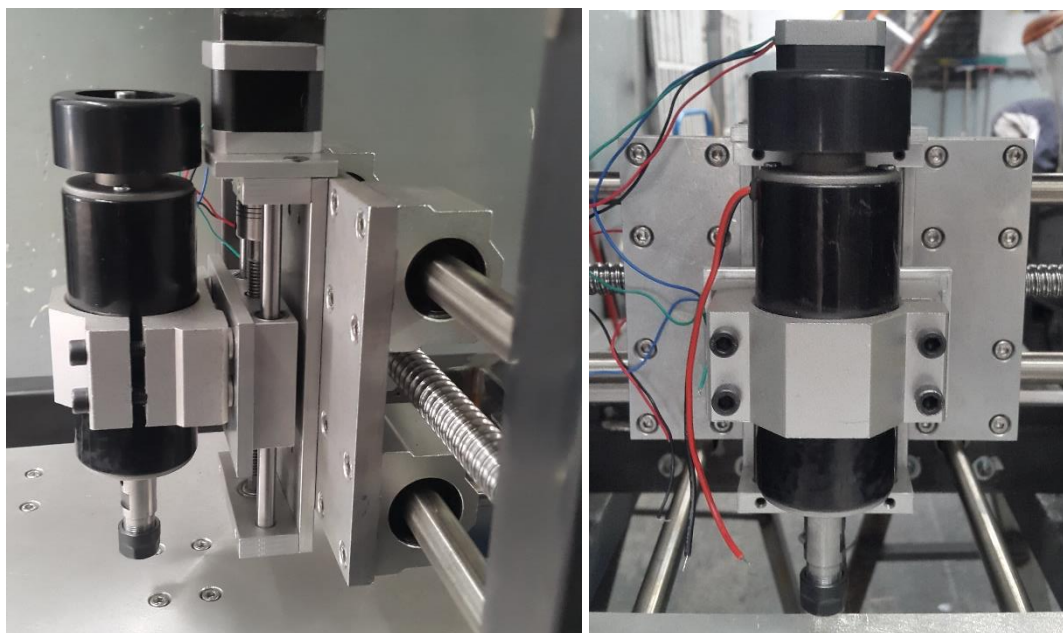
Una vez construidos los elementos anteriores se procede a realizar las adaptaciones para el proceso de ensamblaje.

Las placas laterales de aluminio se posicionan y se perforan en las zonas laterales de los bastidores tal como se muestra en la Figura 106.



**Figura 106** Perforación en el bastidor según las placas de aluminio.

El eje Z se emperna a la placa móvil del eje X mediante seis pernos M6 machuelados en el aluminio tal como se muestra en la Figura 107.



**Figura 107** Sujeción del eje X y su spindle a la placa móvil del eje X.



Las placas laterales de los bastidores permiten la calibración para garantizar un paralelismo en los ejes y se sujetan mediante pernos M6 como se muestra en las Figuras 108 correspondiente a la placa lateral eje X y la Figura 116 correspondiente a la placa frontal del eje Y.



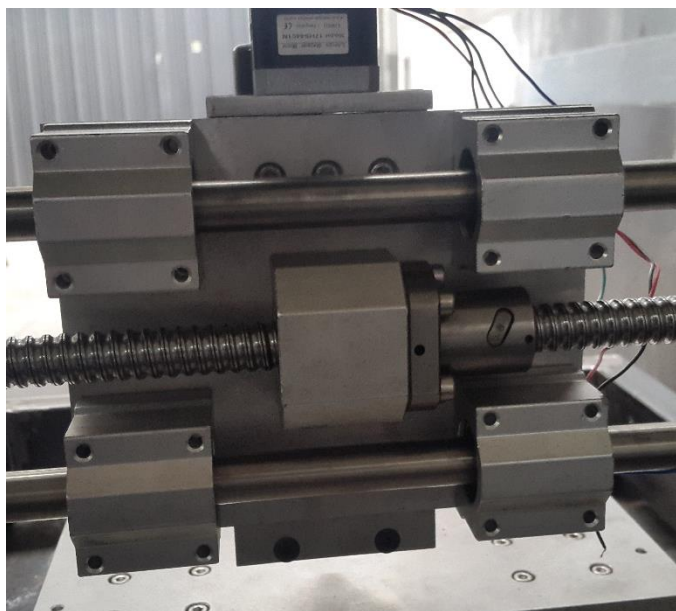
**Figura 108** Sujeción placa lateral bastidor eje X

Las placas laterales como se puede observar cuentan con un tornillo prisionero para garantiza que no existan deslizamientos en el sentido de los ejes de los mismo o del tornillo motriz.



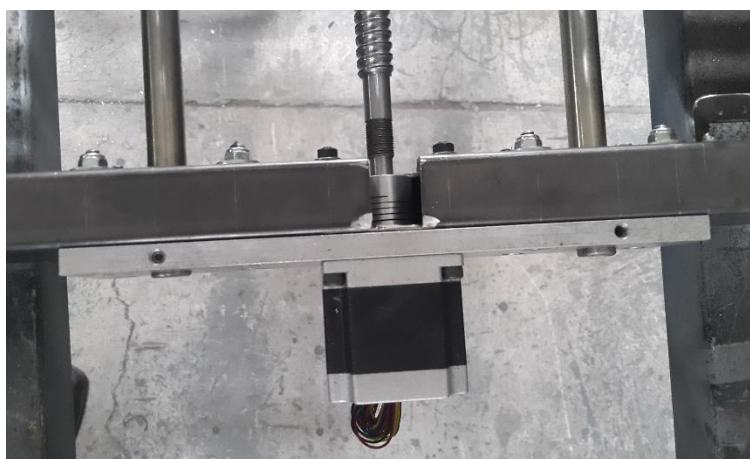
**Figura 109** Sujeción placa frontal bastidor eje Y

Las placas móviles funcionan con cuatro rodamientos lineales y el sistema husillo de bolas – ball screw que permite un movimiento fluido y con menor rozamiento alargando la vida útil del equipo, en la Figura 110 se puede apreciar el montaje de la parte posterior de la cama móvil para el eje X.



**Figura 110** Sujeción placa frontal bastidor eje Y

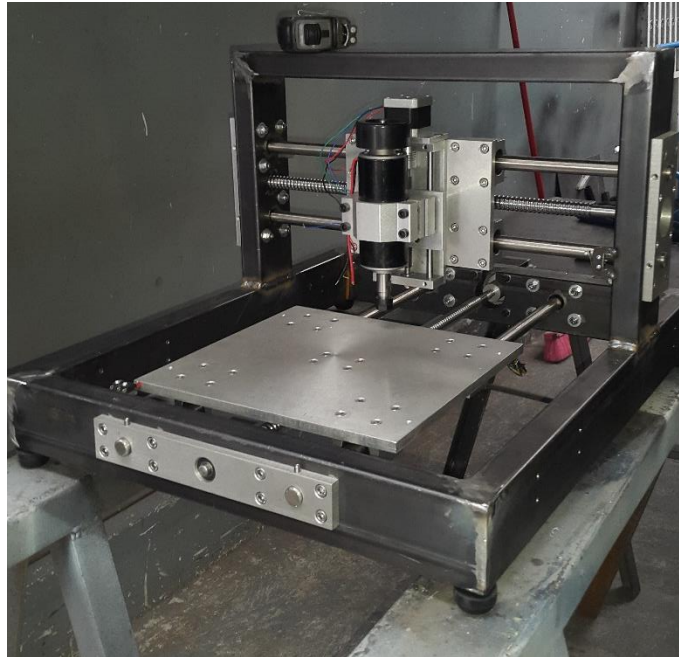
Los tornillos se adaptan al motor a pasos por medio de los acoples flexibles tal como se muestra en la Figura 111.



**Figura 111** Acople flexible entre el motor y el tornillo SFU1605. (Eje Y)

Una vez validados los recorridos y movimientos de los ejes se procede a unir el bastidor X y Y soldándolos según indica los planos garantizando que el punto central de la herramienta de

fresado en el spindle quede posicionado de manera céntrica. En la Figura 112 se puede observar una fotografía del sistema mecánico ya ensamblado.



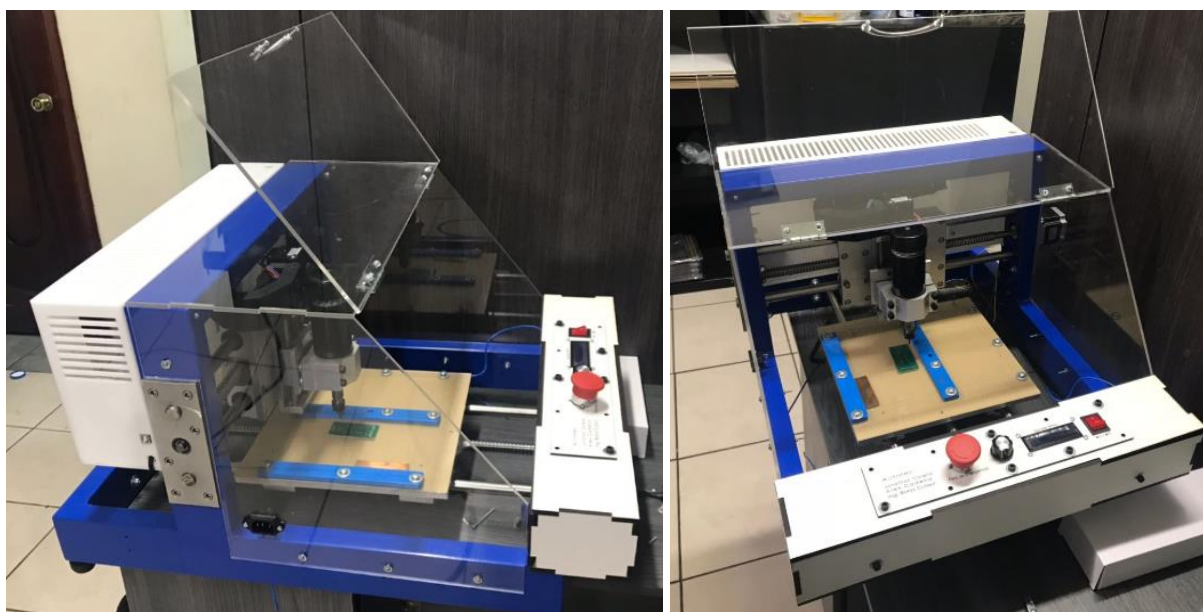
**Figura 112** Fotografía del sistema mecánico CNC

Con el objetivo de darle una protección anticorrosiva al bastidor y de mejorar el aspecto estético del equipo CNC se le aplicó pintura electrostática color azul, luego se instaló un tablero de control en el que están empernadas las fuentes del equipo y la tarjeta de control con su microcontrolador, estos detalles se pueden apreciar en la Figura 113 donde se muestra una fotografía frontal del equipo y la fotografía posterior con la caja de control abierta para visualizar el cableado y la disposición de los equipos mencionados.



**Figura 113** Cableado electrónico del equipo CNC

A continuación se cablea y se ensambla la caja de control, que contiene el switch de encendido y apagado, el paro de emergencia, el regulador de rpm del husillo, luz indicadora de estado, el lcd 16x2 indicador de velocidad del husillo y el botón de reset. Adicionalmente se ensambla la carcasa de protección que para el equipo CNC consiste en una cubierta de acrílico con una puerta que se eleva como se puede observar en la Figura 114.



**Figura 114** Equipo CNC ensamble final

## CAPITULO V

## PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se someterá el equipo a diferentes pruebas con el objetivo de garantizar que la máquina cumple las especificaciones de diseño planteadas.

### 5.1 Especificaciones alcanzadas del equipo CNC

En esta sección se definirá los valores reales obtenidos de trabajo para el desempeño del equipo CNC. Entre los principales tenemos la velocidad de avance por eje y la precisión por eje.

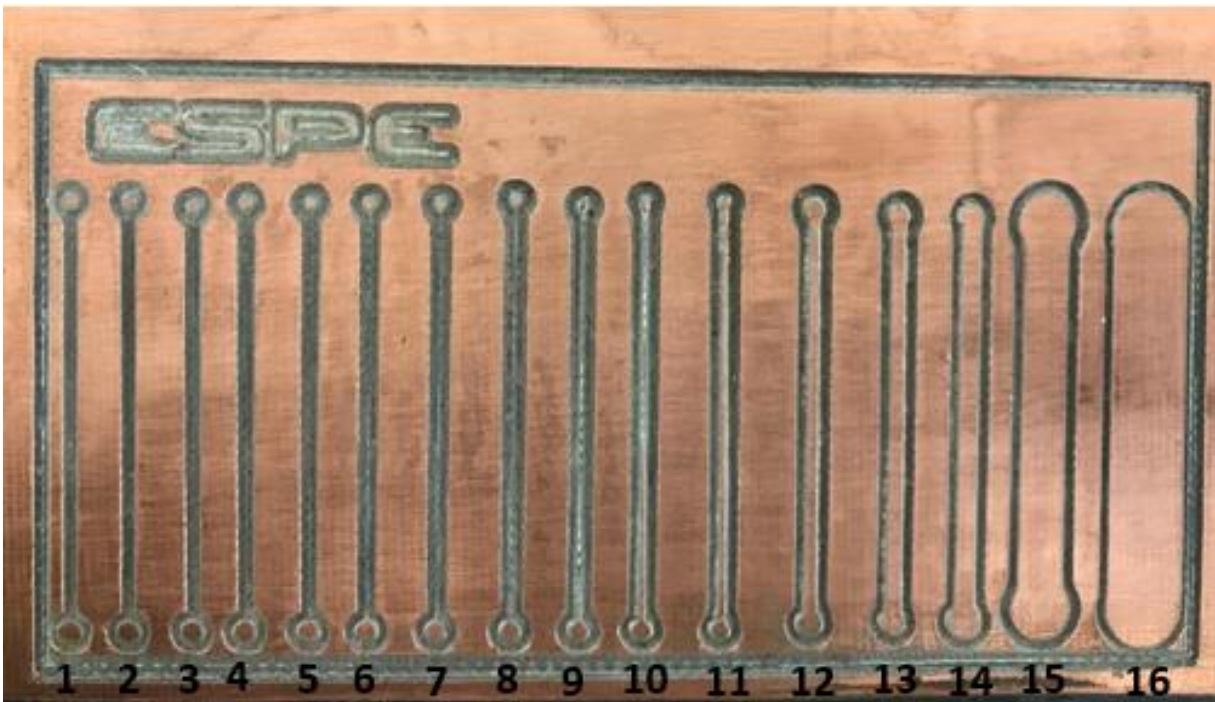
**Tabla 80**

*Especificaciones reales del equipo.*

Especificaciones técnicas	Descripción
Zona de trabajo (X Y Z)	240 mm x 170 mm x 30 mm
Tamaños de placas permitidos:	D2 (240 x 170), B2 (170 x 120), B1 (120 x 80)
PCBs	Una capa (baquelita y fibra)
Precisión de posicionamiento	$\pm 0.052$ [mm]
Velocidad de rotación máx. (husillo)	12000 rpm
Velocidad X, Y (avance)	2 – 13.34 mm/s
Elementos de control	Tarjeta de control, drivers, panel de control/interfaz de usuario.
Actuadores	Motores a pasos (NEMA 17 & NEMA 23)
Elementos mecánicos	Estructura de soporte (mesa), estructura robot cartesiano (X, Y y Z), husillo.
Herramientas	Brocas punta de lanza para fresado y brocas para taladrado.

### 5.2 Pruebas con diferentes anchos de pista

Mediante la prueba mencionada se realiza una placa PCB con varios anchos de pista, con el objetivo de analizar cuál es el ancho de pista mínimo que el equipo podrá fabricar. Es importante mencionar que al utilizar puntas en V o puntas de lanza, el diámetro efectivo de trabajo varía de acuerdo a la profundidad que se le asigne a la herramienta. Para las herramientas de  $60^\circ$  la profundidad recomendada es de 0.015 mm. En la Figura 115 se observa el circuito realizado, la tolerancia o error en el movimiento lineal de nuestro equipo está dada por el mecanismo husillo de bolas que tiene una tolerancia de  $\pm 0.052$  mm la misma viene dada por ser del tipo C7 para los tres ejes. En el Anexo 4 se tiene información de cómo se obtuvo este valor de tolerancia lineal. En los casos en los que se detecte que no existe continuidad en la pista de cobre se asignará en la correspondiente casilla el símbolo (-). (THK, 2018)



*Figura 115* Baquelita con diferentes anchos de pista

**Tabla 81***Diferentes tamaños de pista*

ítem	Ancho de Pista			
	Requerido		Medido	Tolerancia C7
	[mils]	[mm]	[mm]	±0.052 mm
<b>1</b>	1	0.025	-	-
<b>2</b>	4	0.102	-	-
<b>3</b>	5	0.127	-	-
<b>4</b>	6	0.254	-	-
<b>5</b>	7	0.3048	-	-
<b>6</b>	7	0.381	-	-
<b>7</b>	9	0.229	-	-
<b>8</b>	10	0.254	-	-
<b>9</b>	15	0.381	0.34	OK
<b>10</b>	20	0.500	0.48	OK
<b>11</b>	25	0.625	0.59	OK
<b>12</b>	30	0.750	0.73	OK
<b>13</b>	40	1.000	0.97	OK
<b>1.</b>	50	1.250	1.22	OK
<b>15</b>	100	2.500	2.45	OK
<b>16</b>	300	7.500	7.47	OK

De la Tabla 81 se puede concluir que el ancho de pista mínimo que está dentro de las tolerancias de desempeño del equipo es de 15 mils o 0.381 mm, pudiendo cumplir sin problema las pistas de la Tabla 7 que hace referencia al ancho de pista mínimo para un valor nominal de corriente según la NORMA IPC 2221A.

### 5.3 Prueba de velocidad

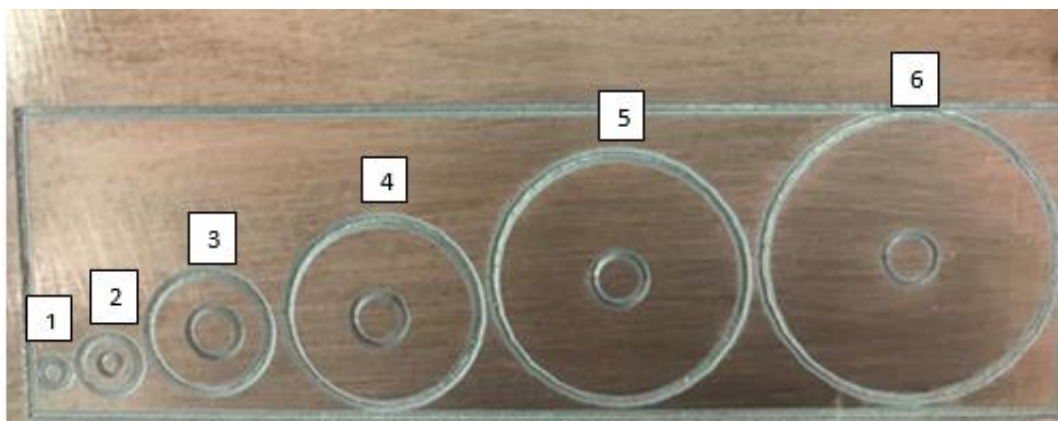
Para la prueba de velocidad se realizaron diferentes evaluaciones enviando al equipo a trasladarse una determinada distancia y verificando el tiempo invertido en el proceso, por tres ocasiones; para poder definir si la velocidad de avance especificada mediante el software equivale a la real de proceso. En la Tabla 82 se puede observar los resultados de la evaluación realizada.

**Tabla 82***Pruebas de velocidad por eje.*

Eje	Distancia [mm]	Tiempo [s]	Velocidad Medida [mm/s]	Velocidad Teórica [mm/s]
<b>X</b>	60	5.99	10.02	10
	60	5.96	10.07	10
	60	5.98	10.03	10
<b>Y</b>	90	4.91	18.33	12
	90	4.93	18.26	12
	90	4.87	18.48	12
<b>Z</b>	10	1.24	8.06	8
	10	1.26	7.94	8
	10	1.23	8.13	8

#### 5.4 Pruebas de precisión

Para las pruebas de precisión se realizaron círculos de diferentes diámetros específicos para luego proceder a medirlos, estos valores se verifican si cumplen la tolerancia de especificación del equipo CNC de  $\pm 0.052$  mm. En la Figura 116 se muestran los círculos realizados mientras que en la Tabla 83 se muestran los resultados de la evaluación.



**Figura 116** Diferentes tamaños de circunferencia



**Tabla 83***Pruebas de velocidad*

Circunferencia	Diámetro teórico [mm]	Diámetro medido [mm]	Tolerancia C7 $\pm 0.052$ mm
1	1.5	1.47	OK
2	2	1.96	OK
3	18.8	18.79	OK
4	11.8	11.75	OK
5	20	19.98	OK
6	28	27.99	OK

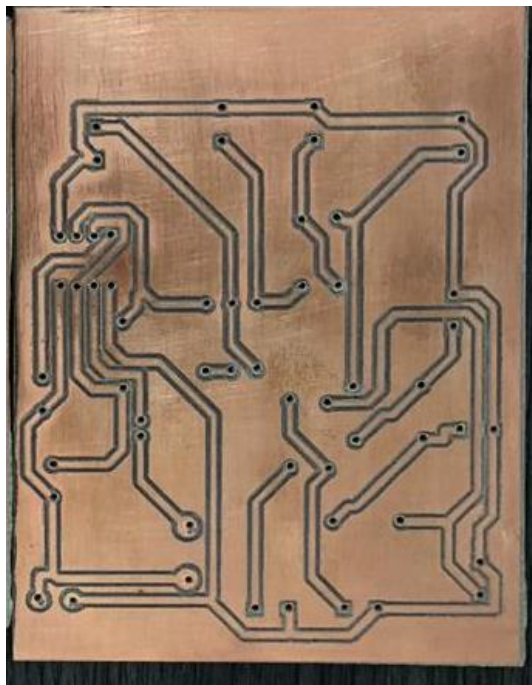
Todos los valores medidos están dentro de especificación, por la cual se concluye que el equipo tiene la precisión de trabajo determinada.

### 5.5 Prueba de fabricación de PCBs diferente tamaño

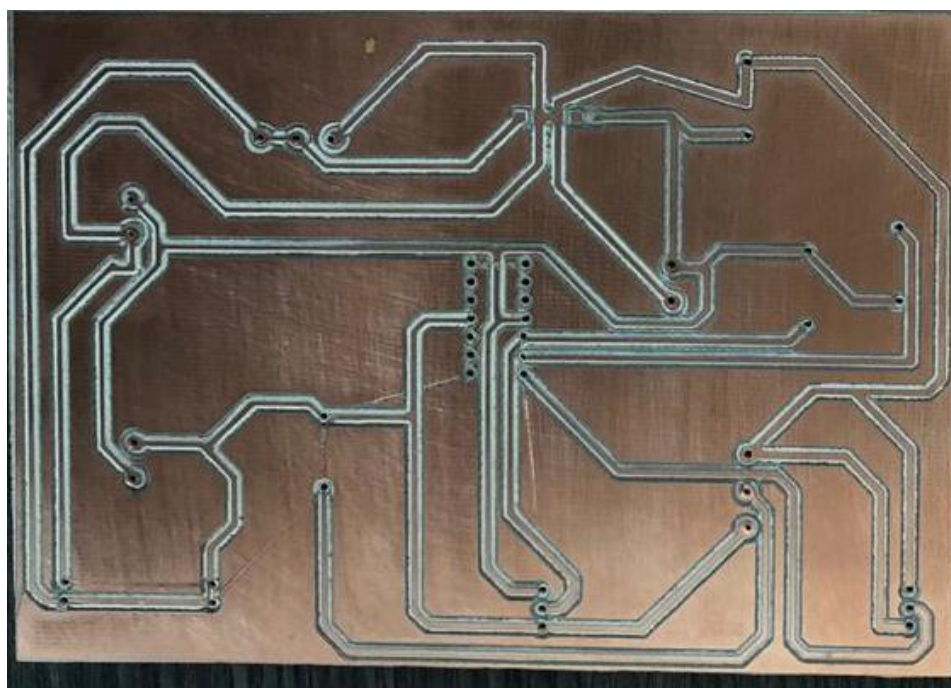
El equipo PCB implementado permite fabricar circuitos con las tres medidas listadas a continuación:

- B1: 120x80 mm
- B2: 120X170 mm
- D2: 240X170 mm

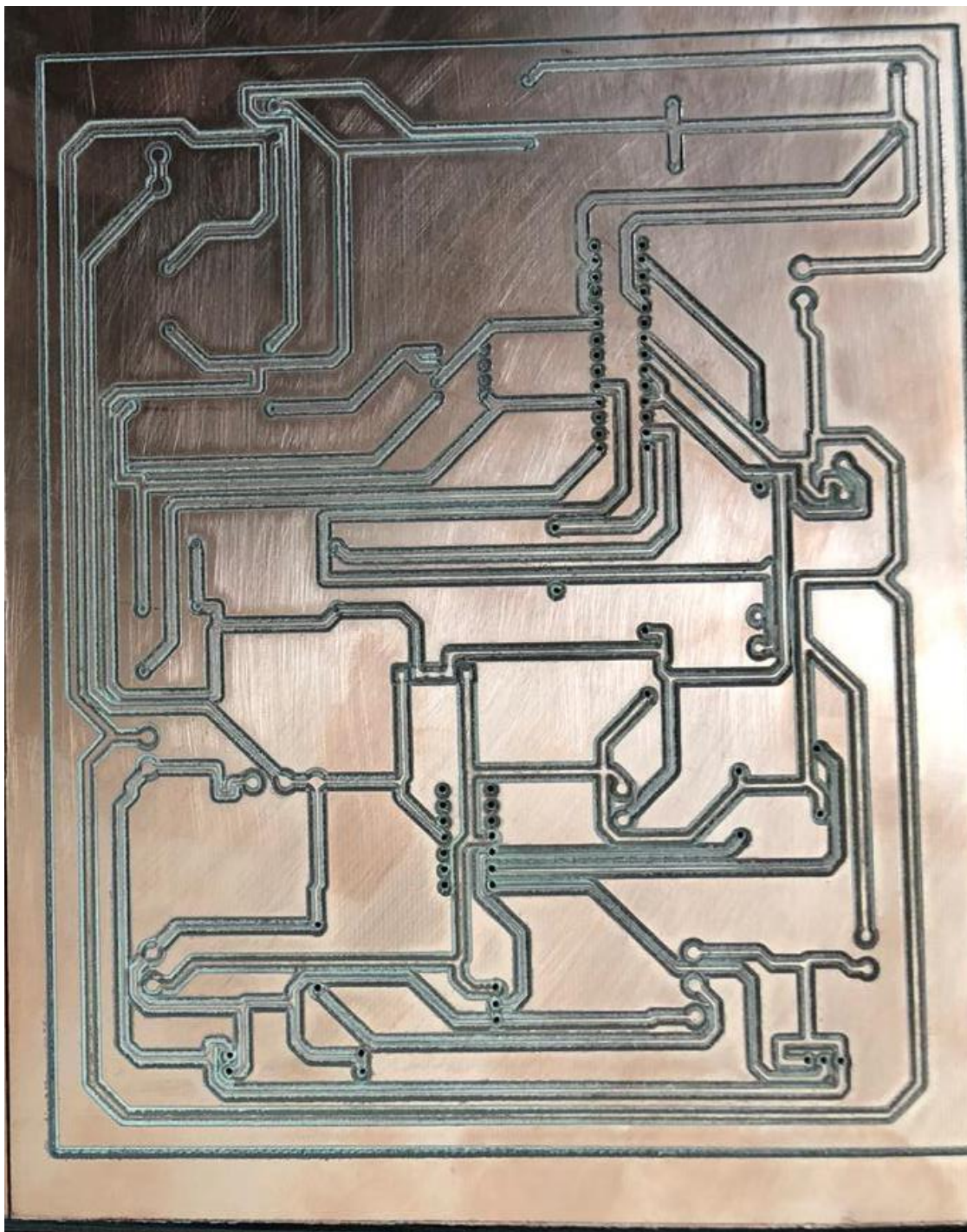
Se realizaron pruebas de fabricación para cada uno de los tamaños listados anteriormente, los circuitos fueron sometidos al proceso de fresado empleando una broca punta de lanza y al proceso de taladrado utilizando una broca, luego de terminar el proceso con el equipo se le aplico a cada circuito un pequeño lijado para mejorar su aspecto final y eliminar el polvo generado. En la Figura 117, 118 y 119 se muestran las placas realizadas B1, B2 y D2 terminadas.



**Figura 117** Placa fabricada: B1 120x80 mm



**Figura 118** Placa fabricada: B2 170x120 mm



*Figura 119* Placa fabricada: D2 240x170 mm

## CAPITULO VI

## ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se detallarán los costos relacionados con el diseño y la implementación del equipo tales como: costos de materiales y costos de los servicios empleados que permitieron que el proyecto sea realizado.

A continuación se presentarán los costos por materiales los cuales están divididos en dos secciones: La primera sección correspondiente a los materiales importados los cuales no existían en el país, la segunda sección hace referencia a los materiales adquiridos localmente.

### 6.1 Costos de materiales importados

En la Tabla 84 se muestran los costos para los materiales importados, algunos de los cuales no existían en el país y otros que presentaban ventaja económica al importarlos.

**Tabla 84**

*Costos de materiales importados*

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unitario	V. Total
1	Motor nema 23	2	\$ 17.99	\$ 35.98
2	Rodamiento lineal	8	\$ 5.00	\$ 40.00
3	Bracket Husillo	2	\$ 8.99	\$ 17.98
4	Mecanismo Eje Z	1	\$ 130.00	\$ 130.00
5	Motor 110V 500W 12000 RPM	1	\$ 136.00	\$ 136.00
6	Cable Carrier 1 m	1	\$ 11.00	\$ 11.00
7	Juego de brocas x6	1	\$ 8.99	\$ 8.99
8	Fresa $\Phi$ 1.4 mm	1	\$ 11.00	\$ 11.00
9	Broca punta de lanza	2	\$ 11.55	\$ 23.10
10	Tornillo SFU1605 500 mm	1	\$ 50.00	\$ 50.00
11	Tornillo SFU1605 600 mm	1	\$ 50.65	\$ 50.65
12	Acoples flexibles	2	\$ 3.90	\$ 7.80
<b>Total</b>				\$ 522.50

Dentro la Tabla 85 se muestra un mecanismo eje Z, el mismo que fue adquirido con el firme objetivo de reducir costos, el cual en las etapas de diseño y pruebas anteriores fue comprobado que reunía todas las características técnicas requeridas

## 6.2 Costos de materiales locales

A continuación en la Tabla 85 se muestran los costos para los materiales que se adquirieron localmente, la mayoría tienen relación directa con la carcasa de protección, cubiertas de la parte eléctrica-electrónica y la misma parte de control.

**Tabla 85**

*Costos de materiales locales*

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unitario	V. Total
1	Plancha de MDF 5 mm	2	\$ 8.00	\$ 16.00
2	Plancha de acrílico blanco 5 mm	4	\$ 18.00	\$ 72.00
3	Plancha de acrílico transparente 5 mm	3	\$ 18.00	\$ 54.00
4	CNC Shield	1	\$ 30.00	\$ 30.00
5	Microcontrolador Atmega2560	1	\$ 12.00	\$ 12.00
6	Driver DRV8825	2	\$ 12.00	\$ 24.00
7	Driver A49885	1	\$ 8.00	\$ 8.00
8	Sensor fin de carrera	4	\$ 1.20	\$ 4.80
9	Paro de emergencia	1	\$ 6.00	\$ 6.00
10	LCD 16x2	1	\$ 6.00	\$ 6.00
11	Luz indicadora	1	\$ 0.85	\$ 0.85
12	Botón de reset	1	\$ 0.90	\$ 0.90
13	Fuente	1	\$ 45.00	\$ 45.00
14	Cable Impresora	1	\$ 9.00	\$ 9.00
15	Cable 110V	1	\$ 6.00	\$ 6.00
<b>Total</b>				\$ 328.55

### 6.3 Costos de servicios

En la Tabla 86 se listan los costos para los diversos servicios empleados para la implementación de la máquina CNC.

**Tabla 86**

*Costos de materiales locales*

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unitario	V. Total
1	Servicio de corte láser	1	\$ 20.00	\$ 20.00
2	Servicio de impresión 3D	1	\$ 30.00	\$ 30.00
3	Servicios aduaneros e importación	1	\$ 130.00	\$ 130.00
4	Servicio de montaje y construcción del equipo de acuerdo a planos. Incluye materiales: (Tubo rectangular, planchas de aluminio, etc.)	1	\$ 500.00	\$ 500.00
5	Servicio de pintura electrostática	1	\$ 20.00	\$ 20.00
<b>Total</b>				\$ 700.00

Sumando todos los costos totales listados en las tablas anteriores se concluye que el costo de implementación total del equipo fue de \$ 1,517.05 USD un equipo comercial económico está costando en el mercado ecuatoriano alrededor de \$ 1,800.00 USD. Con el proyecto se obtiene un ahorro del 15.8%.

## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 Conclusiones

- Se logró diseñar y construir un equipo CNC integrando sistemas mecánicos y sistemas electrónicos que cumple las siguientes características: Zona de trabajo (X Y Z) respectivamente de 240 mm x 170 mm x 30 mm, tamaños de placas permitidos de acuerdo a la norma IPC2221A D2 (240 x 170), B2 (170 x 120), B1 (120 x 80), precisión de posicionamiento  $\pm 0.052$  [mm], velocidad de rotación máx. (husillo) 12000 rpm, velocidad de avance entre los: 2 – 13.34 mm/s.
- La estructura cartesiana de tres grados de libertad del equipo fue dimensionada empleando software CAD y se construyó usando el sistema de husillo de bolas por presentar mayores ventajas como precisión y menor mantenimiento, para los actuadores de cada eje se emplearon motores a pasos por su facilidad de control, costo de inversión y precisión.
- El equipo implementado se controla de manera automática mediante un interacción entre el firmware GRBL en la tarjeta de control, la interfaz de usuario en el computador que es el Universal G-Code que interpreta el código G generado desde el software FlatCam todos son software libres.
- El costo total invertido en el proyecto fue de equipo fue de \$ 1,517.05 USD en comparación con un equipo comercial en el mercado ecuatoriano con un precio de \$ 1,800.00 USD se obtiene un ahorro del 15.8% aproximadamente sin embargo se debe considerar que el equipo con el que se está comparando no presenta una carcasa

de protección. Solamente la carcasa representa una inversión de \$ 146.00 USD para satisfacer una necesidad específica de los usuarios para quienes fue diseñada la máquina CNC Router.

- Se validó el funcionamiento del equipo mediante diversas pruebas que permitieron determinar el ancho pista mínimo que podrá realizarse 15 mils (0.381 mm), se validó que la velocidad requerida mediante el software y la real sean de igual valor, se realizaron pruebas de precisión verificando que las medidas requeridas estuviesen dentro de la especificación nominal de precisión para los tornillos del tipo C7 empleados y finalmente se elaboraron circuitos completos con fresado y perforación en los tres tamaños que permite la máquina sin reportarse defectos.

## **7.2 Recomendaciones**

- Se debe verificar que los usuarios conozcan la forma de uso del equipo implementado y adicionalmente tengan el manual de usuario entregado al jefe de laboratorio de mecatrónica y sistemas dinámicos.
- No soplar el polvo generado producto del desbaste de las placas de cobre, el mismo se debe aspirar o usar una brocha para llevarlo hasta el recipiente inferior en la base para su posterior segregación.
- Para garantizar la vida útil del equipo y su correcto funcionamiento se lo debe usar exclusivamente para la fabricación y perforación de circuitos PCBs.



**BIBLIOGRAFÍA**

Geeetech Documentation. (2018). *GT2560*. Obtenido de <http://www.geeetech.com/wiki/index.php/GT2560>

Akk. (2018). *Rodamientos de Empuje CNC*. Obtenido de <https://sites.google.com/a/c.bestledlights.cf/a62/Rolamentos-cojinete-de-empuje-Rodamientos-Axk-4-unids-lote-Sc16uu-Scs16uu-16mm-rodamiento-lineal-de-bolas>

AliExpress. (24 de Febrero de 2018). *AliExpress*. Obtenido de <https://es.aliexpress.com/item/CNC-Spindle-Motor-500W-power-supply-mounting-bracket-1sets-ER11-1-13mm-13pcs-1sets-3mm-Milling/844265609.html>

Amerimet. (2018). *Diseño de maquinas cartesianas*. Obtenido de <http://www.amerimet.net/sp/index.php>

Arévalo, D., & Hermosa, D. (2014). *Diseño y Construcción de una Prototipadora CNC que realiza el ruteo de pistas y el taladrado de circuitos impresos utilizando procesamiento de imágenes en Labview*. Salgolquí.

BangGood. (2017). *Fresa CNC para PCB*. Obtenido de [https://www.banggood.com/es/3\\_175mm-Shank-30-Degree-0\\_2mm-Titanium-Coated-Carbide-PCB-Engraving-CNC-Bit-Router-Tool-p-1017047.html](https://www.banggood.com/es/3_175mm-Shank-30-Degree-0_2mm-Titanium-Coated-Carbide-PCB-Engraving-CNC-Bit-Router-Tool-p-1017047.html)

Budynas, R., & J. Keith, N. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mc Graw Hill.

Budynas, R., & Keith, N. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mc Graw Hill.

Bueno, A. /. (2005). Tutoriales orcad y lpkf de ayuda al diseño. En *Desarrollo y Construcción de Prototipos Electrónicos* (pág. Anexo 8.13.5). Marcombo.

Canga Perez, A., & Lamiña Chicaiza , B. (2016). *Diseño y construcción de una maquina cnc*. Riobamba.

China cnc Zone. (junio de 2017). *CNC 3040 Máquina PCB*. Obtenido de [http://www.china-cncrouter.com/es/products/CNC-3040-PCB-CNC-Router-Machine-for-Milling-and-Drilling.html#.WMW\\_eFWGOM8](http://www.china-cncrouter.com/es/products/CNC-3040-PCB-CNC-Router-Machine-for-Milling-and-Drilling.html#.WMW_eFWGOM8)

Cloombs, C. (2008). Printed Circuits Handbook. En C. Cloombs, *Physical Characteristics of PCB* (pág. 13.3). McGraw - Hill.

Coobs, C. (06 de 2008). *Earl-Hifi*. Obtenido de [http://www.pearl-hifi.com/06\\_Lit\\_Archive/14\\_Books\\_Tech\\_Papers/Coombs\\_Clyde/Printed%20Circuits%20Handbook,%206th%20Ed.pdf](http://www.pearl-hifi.com/06_Lit_Archive/14_Books_Tech_Papers/Coombs_Clyde/Printed%20Circuits%20Handbook,%206th%20Ed.pdf)

Corporación Química Omega. (06 de 2017). *Universidad Autónoma de Baja California*. Obtenido de Cloruro Férrico : <http://iio.ens.uabc.mx/hojas-seguridad/cloruro-ferrico.pdf>

Díaz, L. (27 de 02 de 2015). *Diwo*. Obtenido de <http://diwo.bq.com/parametros-de-fresado-para-cyclone-2/>

Electronics Project Design. (2017). *PCB Design Layout Rules Recommendation*. Obtenido de <http://www.electronics-project-design.com/PCB-Design.html>

E-Marmolejo., D. R. (s.f.). *Hetpro*. Obtenido de Profesor Universidad de Guadalajara: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/microcontrolador/>

Erika, C. (2018). *Scribd*. Obtenido de Diferencias Entre Pic y Atmel: <https://es.scribd.com/doc/126230967/Diferencias-Entre-Pic-y-Atmel>

FlatCAM. (2018). *Diseño eje Z cnc*. Obtenido de FlatCAM: Free and Open-source PCB CAM: <http://flatcam.org>

Gaibor, J., & Carrion, C. (2015). *Diseño y fabricación de maquina CNC para elaboración de placas PCB*. Riobamba.

García, M. R. (julio de 2017). *Diseño y fabricación de una fresadora CNC de 3 ejes para el mecanizado de PCB con plataformas abiertas*. Obtenido de Universidad Politécnica de Cartagena:

<http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4393/tfg491.pdf?sequence=7&isAllowed=y>

Hernandez, A. (2018). *Tallerelectronica.com / BLOG*. Obtenido de Resistencias en pull up y pull down en circuitos digitales: <https://tallerelectronica.com/2017/03/13/resistencias-pull-uppull-down-en-circuitos-digitales/>

Id Electronica. (2018). *Microcontrolador Atmel atmega2560*. Obtenido de <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/microcontroladores/microcontrolador-atmel-atmega2560-detail>

IPC. (2013). *IPC-2221A Generic Standard on Printed Board Design*.

J. Kong Motor. (2018). *Nema23 Hybrid Step Motor for CNC Machine*. Obtenido de <https://jkongmotor.en.made-in-china.com/product/bBOmKHtPEShg/China-NEMA23-Hybrid-Step-Motor-for-CNC-Machine.html>

Konmison. (20 de 12 de 2017). *Amazon*. Obtenido de Spindle 24000 RPM: [https://www.amazon.com/Konmison-Spindle-Milling-Collet-Inverter/dp/B015SR1QAW/ref=sr\\_1\\_4?s=hi&ie=UTF8&qid=1531709769&sr=1-4&keywords=spindle+pcb+24000](https://www.amazon.com/Konmison-Spindle-Milling-Collet-Inverter/dp/B015SR1QAW/ref=sr_1_4?s=hi&ie=UTF8&qid=1531709769&sr=1-4&keywords=spindle+pcb+24000)

Leroy Merlin. (2018). *Acero laminado frío*. Obtenido de <http://www.leroymerlin.es/fp/69125/tubo-rectangular-acero-frio-gris-grafito>

Loureiro, J. (2018). *Staticboards*. Obtenido de <https://www.staticboards.es/blog/drv8825-vs-a4988/>

Lpkf. (25 de junio de 2017). *ProtoMat S103*. Obtenido de <http://www.lpkf.com/products/rapid-pcb-prototyping/circuit-board-plotter/protomat-s103.htm>

Martín, Á. B. (2017). *Desarrollo y construcción de prototipos electrónicos*. Obtenido de <http://www.marcombo.com/Descargas/8426713637-DESARROLLO%20Y%20CONSTRUCCI%C3%93N%20DE%20PROTOTIPOS%20ELECTR%C3%93NICOS/presentacion.pdf>

Microensamble Sas. (2017). *Glosario electrónico*. Obtenido de <http://microensamble.com/glosario/pitch/>

Mits . (2017). *Mechanism of PCB milling*. Obtenido de <http://www.mitspcb.com/edoc/mechanism.htm>

Naylamp Mechatronics. (2018). Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/impresion-3d-cnc/129-acople-flexible-de-aluminio-de-5mm-a-8mm.html>

Osm Technology Co. (2018). *Especialistas en Motores a Pasos*. Obtenido de [http://www.osmtec.com/nema\\_17\\_step\\_motor\\_17\\_hs.htm](http://www.osmtec.com/nema_17_step_motor_17_hs.htm)

Ossur. (15 de Enero de 2017). *MedicalExpo*. Obtenido de <http://www.medicaexpo.es/prod/oessur/product-74948-467934.html>

Ottobock. (15 de Enero de 2017). *Circuitos electronicos* Obtenido de <http://www.ottobock.es/protetica/miembro-inferior/articulaciones-de-rodilla/genium-x3/>

Peter, P. (2018). *Simple silkscreen reference board*. Obtenido de <http://www.justgeek.de/simple-silkscreen-reference-board/>

Poirot. (junio de 2017). *Bungard cc2mtc*. Obtenido de <http://www.poirot.cl/producto-equipos-para-la-fabricacion-de-pcbs/perforacion-y-ruteo/taladro-y-ruteador-cnc-mod-ccd-2-mtc.php>

Protésica. (15 de Enero de 2017). *Maquinas cartesianas*. Obtenido de <http://protesica.com.co/portfolio-item/rodilla-c-leg/>

Rangel, H. (julio de 2017). *Prototipo de Maquinado para fabricación de circuitos impresos con fresadora*. Obtenido de Univesidad de Manisales: [http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/40622743/Prototipo\\_maquinado\\_circuitos\\_impresos.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1498698554&Signature=5uV3E5ihYHY1ij7L%2BzotbsDw%2FN0%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DCirc](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/40622743/Prototipo_maquinado_circuitos_impresos.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1498698554&Signature=5uV3E5ihYHY1ij7L%2BzotbsDw%2FN0%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DCirc)

RetroAmplis. (Junio de 2017). *Prototipado*. Obtenido de Fabricación PCB mediante CNC: <http://www.retroamplis.com/pcb-cnc-100x100>

Salas, R. (08 de 2017). *Tecnicas de diseño, desarrollo y montaje de circuitos*. Obtenido de Laboratorio de Instrumentación Científica, Facultad de Ciencias,: [https://f20b4575-a-62cb3a1a-sites.googlegroups.com/site/labcircuitoselectricos/assignments/practica2/tecnicas\\_diseno.pdf?attachauth=ANoY7crU0DWpstr99d0RNwz-wt4GYsX0YHORnylozyEONp4qNtJ4owXLGKgUaUN4WQAJ\\_gaHCRISkdE1ARv-sMP4pZF-SKaswaSjmEvPP5RSPIc7xOPYRc5Ez](https://f20b4575-a-62cb3a1a-sites.googlegroups.com/site/labcircuitoselectricos/assignments/practica2/tecnicas_diseno.pdf?attachauth=ANoY7crU0DWpstr99d0RNwz-wt4GYsX0YHORnylozyEONp4qNtJ4owXLGKgUaUN4WQAJ_gaHCRISkdE1ARv-sMP4pZF-SKaswaSjmEvPP5RSPIc7xOPYRc5Ez)

Schaftfräser. (2017). *Tipos de elementos electronicos*. Obtenido de <https://es.pinterest.com/explore/schaftfr%C3%A4ser/?lp=true>

Stepper online. (2018). *Nema 17 Bipolar 1.8deg 22Ncm (31oz.in) 1.33A 2.8V 42x42x34mm 4 Wires*. Obtenido de <https://www.omc-stepperonline.com/nema-17-bipolar-18deg-22ncm-31ozin-133a-28v-42x42x34mm-4-wires-17hs13-1334s.html>

Techno, I. (2014). *Linear Motion Products Catalog H835*. Recuperado el 24 de Agosto de 2017, de [www.technoautomation.com](http://www.technoautomation.com)

Tejeira, L. R. (julio de 2017). *Universidad Tecnológica de Panamá*. Obtenido de Control Numérico Computarizado: [http://files.udesprocesos.webnode.es/200000030-9f9ea9fe3d/EL\\_CONTROL\\_NUMERICO\\_COMPUTARIZADO\\_EN\\_EL\\_DESARROLLO INDUSTRIAL.pdf](http://files.udesprocesos.webnode.es/200000030-9f9ea9fe3d/EL_CONTROL_NUMERICO_COMPUTARIZADO_EN_EL_DESARROLLO INDUSTRIAL.pdf)

Think & Tinker. (2017). *Printed Circuit Boards*. Obtenido de <http://www.precisebits.com/default.htm>

Thk. (2018). *Precisión del husillo de bolas*. Obtenido de [https://tech.thk.com/es/products/pdf/es\\_a15\\_011.pdf](https://tech.thk.com/es/products/pdf/es_a15_011.pdf)

Tibanta, M. (24 de Febrero de 2018). *Metalmecánica Fácil*. Obtenido de <http://www.metalmecanica-facil.mahtg.com/velocidad-de-corte-maquinas-herramientas/>

Tituaña, J. A. (2015). *Construcción de una maquina impresora de circuitos impresos*. Obtenido de Universidad Técnica del norte: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/4616/1/04%20MEC%20094%20TESIS.pdf>

Tituaña, J. A. (2015). *Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte*. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/4616/1/04%20MEC%20094%20TESIS.pdf>

UGS. (2018). *Universal Gcode Sender*. Obtenido de [https://winder.github.io/ugs\\_website/](https://winder.github.io/ugs_website/)

Universal Gcode Sender. (2018). *Universal Gcode Sender*. Obtenido de [https://winder.github.io/ugs\\_website/](https://winder.github.io/ugs_website/)

Universidad Antonio de Nebrija. (julio de 2017). *Tecnología Electrónica II*. Obtenido de [http://www.geocities.ws/curso\\_tecnologia\\_electronica/TemasTE2/TE2-T02C.pdf](http://www.geocities.ws/curso_tecnologia_electronica/TemasTE2/TE2-T02C.pdf)

Valley led. (2018). *ebay*. Obtenido de <https://www.ebay.es/itm/12V-DC-100w-8-5A-230v-110v-Switching-Power-Supply-for-LED-Strip-Driver-CCTV-/252934362487>

Vásquez, L. (2017). *Técnicas de elaboración de PCI - PCB*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/mcmax911/tecnicas-de-elaboracion-de-pci-pcb>