



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

**Diseño y construcción de una mesa de control numérico computarizado (CNC)  
para el corte por arco de plasma de planchas de acero al carbono para la empresa Metal  
Imperial**

Mediavilla Guerra, Edwin Paúl y Pinos Guartamber, Jorge Adrián

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Lenin Rómulo Abatta Jácome MSc.

12 de diciembre de 2022



## TESIS PLASMA CNC MEDIAVILLA - PINOS.pdf

Scanned on: 18:7 December 12, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	508
Words with Minor Changes	383
Paraphrased Words	579
Omitted Words	0



Formado automáticamente por:  
**LENIN ROMULO  
ABATTA JACOME**

Ing. Lenin Rómulo Abatta Jácome MSc.

Director



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

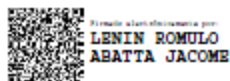
CARRERA INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: "Diseño y construcción de una mesa de control numérico computarizado (CNC) para el corte por arco de plasma de planchas de acero al carbono para la empresa Metal Imperial" fue realizado por los señores **Mediavilla Guerra, Edwin Paúl y Pinos Guartamber, Jorge Adrián**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 12 de diciembre 2022

Firma:



Ing. Lenin Rómulo Abatta Jácome MSc.

C. C. 1723180707



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**Responsabilidad de Autoría**

Nosotros, **Mediavilla Guerra, Edwin Paúl y Pinos Guartamber, Jorge Adrián**, con cédulas de ciudadanía n° 1003754304 y n° 0302623434, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de una mesa de control numérico computarizado (CNC) para el corte por arco de plasma de planchas de acero al carbono para la empresa Metal Imperial”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 12 de diciembre del 2022**

.....  
**Mediavilla Guerra, Edwin Paúl**

C.C.: 1003754304

.....  
**Pinos Guartamber, Jorge Adrián**

C.C.: 0302623434





DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**Autorización de Publicación**

Nosotros **Mediavilla Guerra, Edwin Paúl** y **Pinos Guartamber, Jorge Adrián**, con cédulas de ciudadanía n° 1003754304 y n° 0302623434, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "Diseño y construcción de una mesa de control numérico computarizado (CNC) para el corte por arco de plasma de planchas de acero al carbono para la empresa Metal Imperial" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 12 de diciembre del 2022

.....  
**Mediavilla Guerra, Edwin Paúl**

C.C.: 1003754304

.....  
**Pinos Guartamber, Jorge Adrián**

C.C.: 0302623434

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a Dios y la virgen Dolorosa por haberme brindado constancia, fortaleza y dedicación para terminar la carrera universitaria.

Por todo el esfuerzo y sacrificio que mis padres supieron sobrellevar para que yo pueda lograr mis metas les dedico este trabajo y logro a ellos, a mi madre Lauri por darme el cariño, amor, apoyo y confianza para poder lograr mis metas, que sin importar lo duro de la situación siempre creyó en mí. A mi padre Fernando que siempre fue su ilusión ver a su hijo como ingeniero, que me dio fortaleza y acompañó durante este camino desde el cielo.

A mis hermanos y hermanas Juan, Diego, Verónica y Yolanda por la ayuda, preocupación y cuidados que me brindaron desde que era un niño, y sobre todo el apoyo y la ilusión que me han brindado a lo largo de este trayecto, porque cada uno ha sido un ejemplo.

A mis sobrinos y sobrinas, que siempre fueron una motivación, por ser siempre una forma de alivio y poder sacarme una sonrisa sin importar los problemas. En especial a Steven y Fernando que con alegrías y peleas crecimos juntos y se han vuelto hermanos.

A su vez dedico este trabajo a todos mis familiares, amigos y compañeros de la universidad, con los cuales compartí muchos buenos y malos momentos.

Mediavilla Guerra, Edwin Paúl

Con profundo amor y cariño, dedico mi proyecto de titulación a Dios, porque todo se lo debo a Él. A mis padres, por haberme dado la vida y el sustento; a mis hermanos, cuñados y sobrinos, por su apoyo incondicional.

Dedico, sobremanera, a los clientes de Metal Imperial, que son la razón de ser de la empresa, a ellos se debe el trabajo y esmero en cada obra y proyecto, sin los clientes no habría empresa, sin clientes no habría sueños ni esperanzas. La satisfacción del cliente es el motor que mueve día a día a la empresa.

Y finalmente, quiero dedicar y obsequiar la Imperial Enterprise X, nombre comercial de la máquina de este proyecto, a mi persona, Adrián Pinos, que día a día he trabajado incesantemente por mi proyecto de vida llamado Imperial, esta máquina es la primera recompensa a largas jornadas de trabajo bajo el sol y bajo la lluvia, noches sin descanso de planificaciones, diseños y análisis de proyectos constructivos, de feriados y días festivos a los que no he asistido por cumplir con los proyectos, de sacrificios que solo yo puedo contarlos.

Que esto solo sea el comienzo de una carrera de éxito.

Pinos Guartamber, Jorge Adrián

## Agradecimientos

Agradezco a Dios y la Virgen Dolorosa por darme toda la fortaleza posible para poder culminar mis estudios por qué no fue un camino fácil. De todo corazón agradezco a cada uno de los miembros de mi familia que siempre estuvieron pendientes de mí y me apoyaron.

Mi gratificación a nuestro tutor de tesis Ing. Lenin Abatta que nos brindó su tiempo, conocimientos y paciencia para el desarrollo de este proyecto, donde resalta que una gran persona y el mejor docente que un estudiante puede pedir.

Mi agradecimiento a mi compañero Adrián por brindarme la oportunidad y confianza de desarrollar el proyecto para su empresa, gracias por el tiempo dedicado a este proyecto y muchas gracias por tu amistad a lo largo de la carrera.

Mi agradecimiento al Ingeniero Oscar por soportar las dudas de ingeniera que surgieron a lo largo del desarrollo y por la presteza con la que nos ayudaba para que podamos terminar los más rápido posible nuestro trabajo.

Quiero agradecer por todo el tiempo y apoyo de mis amigos Carlos, Cesar y Danny gracias por estar en los momentos buenos y malos, gracias por ayudarme a olvidar todos los problemas de la universidad y personales en las noches que pasábamos hablando o jugando.

Agradezco a Marco, Javier, Steven, Fernando y Jesús que fueron grandes compañeros y amigos durante este trayecto, a si también a todos los amigos y compañeros con los que hice grupo desde nivelación hasta el último semestre, que sin su ayuda y confianza no hubiera llegado tan lejos. Dar las gracias a todos los familiares, amigos, amigas y demás personas que fueron parte de este trayecto y dejaron un granito de arena para poder conseguir esta meta.

Mediavilla Guerra, Edwin Paúl

Siguiendo el llamado discurso de agradecimiento de Gregorio el Taumaturgo: “No está bien evitar el elogio por miedo a que nuestra gratitud no corresponda a los beneficios recibidos. Por el contrario, debemos intentarlo con audacia, aunque no estemos a la altura. Quizás nuestro discurso no alcance la perfección, pero al menos escaparemos a la ingratitud, porque es una ingratitud el silencio absoluto bajo el pretexto de incapacidad para mostrar la gratitud en verdad debida”.

Lo he dicho siempre, que el último valor que el ser humano debe perder, es la gratitud, y es por eso que quiero exteriorizar mi eterna gratitud a nuestro Infinito Creador, por permitirme que se cumplan mis aspiraciones y metas. A la Virgencita de El Cisne, por sus bendiciones diarias y amor maternal.

Mi agradecimiento a mis amados padres, por su amor incondicional. Mi agradecimiento a mi madre, María Guartamber, porque nunca me faltó nada con ella. Mi agradecimiento a mi papá, Jorge Pinos, por estar siempre cuando más lo he necesitado.

Mi agradecimiento muy especial a mis ejemplares hermanos y hermanas: Blanca Nube, Ángel Patricio, Gladys del Rocío, María Marlene, Pablo Geovanny y Susana de Jesús; por haberme guiado con sus experiencias y haber confiado plenamente en mí, por todo el apoyo que he recibido durante mi vida estudiantil. A mis cuñados Marcelo, Cristina y Rosita, que se han convertido en mis hermanos que siempre me han sabido aconsejar y apoyar. A mis sobrinas Esthefany, Emely, Beylee, Samantha, Milena y a mi sobrino Pablito, por alegrar cada día con sus locuras y ocurrencias.

Mi gratitud eterna al Ingeniero Lenin Abatta, por haber sido un magnífico tutor y el mejor profesor de quien he tenido el honor de ser alumno en mi transcurso por la universidad y por haber enseñado con excelencia.

Mi agradecimiento al Ingeniero Oscar Gómez por ser un profesional que nunca negó su conocimiento en algún aspecto de la ingeniería y por la amabilidad con la que siempre me recibía cuando solicitaba su ayuda profesional.

Mi agradecimiento a mi amigo Paúl Mediavilla, coautor de ese proyecto, por todo su apoyo profesional e incondicional durante toda la carrera, por haber sido un compañero leal y un gran equipo de trabajo. Sobremanera, mi gratitud a Paúl por toda su dedicación y esmero en la cristalización de este proyecto de titulación.

Mi agradecimiento a mis amigos Marco Chaucala, Fernando Enríquez, Jesús Mendoza, Steven Ñaguazo y Javier Chiliquina, por haber sido el mejor grupo de amigos con quienes he compartido gratos e inolvidables momentos que hicieron más ameno el duro caminar universitario.

Finalmente, mi gratitud a todas las personas y clientes que confiaron desde el primer día en Metal Imperial para hacer de sus proyectos y sueños una realidad tangible.

Pinos Guartamber, Jorge Adrián

## Índice de Contenidos

Portada.....	1
Dedicatoria .....	6
Agradecimientos .....	8
Índice de Contenidos .....	11
Índice de tablas.....	17
Índice de figuras.....	20
Resumen.....	29
Abstract.....	30
Capítulo I Introducción.....	31
Antecedentes .....	31
Justificación e importancia.....	36
Alcance del Proyecto .....	37
Sistema mecánico .....	42
Diseño de la mesa con perfiles estructurales de acero .....	42
Diseño del sistema cartesiano de tres ejes para el movimiento.....	44
Sistema eléctrico, electrónico y de control.....	47
Diseño del sistema eléctrico.....	47
Diseño del sistema electrónico y de control.....	48

	12
Sistema informático.....	50
Objetivo General .....	51
Objetivos Específicos.....	51
Capítulo II Fundamentación teórica .....	52
Corte por arco de plasma .....	52
Ventajas del corte por arco de plasma .....	53
Desventajas del corte por arco de plasma.....	53
Parámetros de entrada.....	54
Espesor del material .....	54
Corriente .....	54
Distancia de separación entre la antorcha y la pieza de trabajo .....	55
Velocidad de avance .....	55
Parámetro de salida .....	55
Calidad de corte.....	55
Sistemas de inhibición de gases productos del corte .....	56
Cortadora de plasma.....	57
HYPERTHERM POWERMAX 85.....	58
VICTOR CUTMASTER 82 .....	59
EVERLAST POWERPLASMA 82i .....	61
Control numérico computarizado.....	62
Mesa CNC para corte de plasma .....	64



Partes o componentes de una mesa para corte de plasma.....	65
Sistemas de transmisión para mesas CNC.....	68
Sistema de correas.....	68
Sistema piñón - cremallera.....	69
Sistema de husillo .....	70
Controladores para sistemas CNC.....	70
CNC NVEM Ethernet de Novusun .....	71
MACH3 5 Axis CNC .....	72
MyPlasmCNC de Proma Interface .....	72
Control de Altura THC .....	74
Funcionamiento de un THC .....	75
Actuadores de un sistema CNC.....	75
Sensores para un sistema CNC .....	77
Sensores inductivos .....	77
Sensores capacitivos.....	78
Final de carrera.....	78
Tecnología IoT .....	79
Componentes para IoT.....	80
Plataformas de IoT .....	80
Capítulo III Diseño .....	82
Diseño del bastidor de la mesa.....	82

Carga de la plancha de acero .....	85
Carga de las platinas sobre los ángulos .....	89
Carga de la cama de agua .....	90
Carga del puente sobre el bastidor .....	93
Diseño del modelo 1 de 7 ángulos para soporte. ....	97
Diseño del modelo 2 de 5 ángulos para soporte. ....	106
Aplicación de cargas laterales al modelo seleccionado. ....	115
Aplicación de cargas en el eje X .....	116
Aplicación de cargas laterales en el eje Y .....	118
Diseño del puente para el eje X y soporte del eje Z .....	120
Diseño CAD y CAE de elementos para el sistema CNC .....	126
Diseño y simulación de la placa de soporte del puente.....	126
Diseño y simulación de la placa del soporte principal del eje Z .....	130
Diseño y simulación de la placa del soporte secundario del eje Z.....	135
Diseño y simulación zapatas para el bastidor .....	139
Diseño y simulación cabezal deslizante.....	143
Diseño del sistema de transmisión piñón-cremallera para los ejes X y Y .....	148
Diseño del sistema de transmisión piñón-cremallera para el eje Y .....	148
Diseño del sistema de transmisión piñón-cremallera para el eje X.....	163
Diseño y selección del tornillo sin fin para el eje Z.....	165
Selección del motor para el eje Z.....	170

Selección del motor para el eje Y .....	172
Selección del motor para el eje X .....	178
Selección de guías y rodamientos lineales.....	183
Capacidad de carga.....	183
Rigidez .....	184
Precisión .....	184
Velocidad .....	184
Montaje .....	184
Robustez de la guía lineal en entornos hostiles.....	185
Mantenimiento de guías lineales.....	185
Diseño de tornillos de potencia para nivelar la mesa CNC .....	191
Diseño y simulación de brazos para elevar y movilizar la mesa CNC.....	198
Diseño de tornillos de potencia para movilizar la mesa CNC.....	198
Diseño CAD y CAE de los miembros estructurales del brazo.....	202
Verificación y simulación por pandeo elástico del tornillo de potencia.....	205
Selección de las garruchas.....	209
Diseño de la estructura del gabinete .....	210
Selección de drivers para los motores.....	214
Selección del sistema de control .....	218
Esquema del circuito eléctrico .....	221
Elementos de protección.....	221

Dimensionamiento del calibre de los cables.....	225
Arquitectura del sistema IoT .....	230
Programación de la tarjea IoT ESP32 .....	231
Creación de la base de datos en Firebase .....	231
Desarrollo de la App en App Inventor .....	232
Esquema eléctrico para el circuito IoT .....	234
Capítulo IV Construcción, Implementación y Pruebas del sistema .....	236
Construcción e Implementación.....	236
Mesa CNC .....	236
Mecanismo de elevación.....	238
Construcción del gabinete.....	238
Construcción y montaje de los tableros eléctricos. ....	240
Corte de elementos para el sistema CNC .....	242
Construcción del puente y anclaje de guías lineales y cremalleras.....	243
Latonería de la máquina.....	245
Construcción de la placa del sistema IOT .....	247
Ensamble final .....	248
Pruebas y análisis de resultados del sistema CNC.....	253
Prueba 1 .....	257
Precisión .....	257
Exactitud .....	258

Prueba 2 .....	259
Precisión .....	260
Exactitud .....	260
Prueba 3 .....	261
Prueba 4 .....	264
Ejecución de proyecto constructivo comercial .....	266
Aplicación del corte plasma.....	271
Capítulo V Análisis Económico Financiero .....	273
Capítulo VI Conclusiones y Trabajos Futuros.....	280
Conclusiones.....	280
Trabajo Futuro.....	283
Referencias.....	284
Apéndices .....	288

### Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Especificaciones técnicas de Everlast PowerPlasma i .....	38
<b>Tabla 2</b> Especificaciones técnicas de la Hypertherm Powermax 85 .....	59
<b>Tabla 3</b> Especificaciones técnicas de Victor Cutmaster 82.....	60
<b>Tabla 4</b> Especificaciones técnicas de la Everlast Powerplasma 82i.....	62
<b>Tabla 5</b> Comparación de una máquina convencional o una máquina CNC .....	63
<b>Tabla 6</b> Especificaciones técnicas de la Medusa Practicut 4x8.....	67

<b>Tabla 7</b>	Especificaciones técnicas de MyPlasmCNC .....	73
<b>Tabla 8</b>	Cargas puntuales sobre el puente .....	93
<b>Tabla 9</b>	Cargas distribuidas sobre el puente .....	94
<b>Tabla 10</b>	Carga puntual sobre el bastidor.....	94
<b>Tabla 11</b>	Cargas distribuidas en el bastidor .....	96
<b>Tabla 12</b>	Elementos seleccionados para el bastidor de la mesa CNC .....	115
<b>Tabla 13</b>	Cargas del eje Z.....	131
<b>Tabla 14</b>	Cargas de los elementos para el montaje del motor del eje X .....	131
<b>Tabla 15</b>	Cargas sobre la placa del soporte secundario del eje Z.....	135
<b>Tabla 16</b>	Cargas de los elementos para el montaje del motor del eje X .....	136
<b>Tabla 17</b>	Valores de velocidad y aceleración de máquinas plasma CNC .....	149
<b>Tabla 18</b>	Coefficiente de seguridad .....	150
<b>Tabla 19</b>	Tabla de factores de sobrecarga $K_o$ .....	155
<b>Tabla 20</b>	Factor de tamaño $K_s$ .....	156
<b>Tabla 21</b>	Factor de confiabilidad.....	159
<b>Tabla 22</b>	Cargas para el tornillo sin fin del eje Z .....	166
<b>Tabla 23</b>	Especificaciones generales del motor NEMA23 de 1.26 [N-m] .....	171
<b>Tabla 24</b>	Especificaciones eléctricas del motor NEMA23 de 1.26 [N-m].....	172
<b>Tabla 25</b>	Carga para el dimensionamiento de los motores del eje Y .....	172
<b>Tabla 26</b>	Carga para el dimensionamiento de los motores del eje X .....	178
<b>Tabla 27</b>	Especificaciones generales del motor NEMA23 de 3 [N-m] .....	182
<b>Tabla 28</b>	Especificaciones eléctricas del motor NEMA23 de 3 [N-m].....	182
<b>Tabla 29</b>	Comparación HGR (guía perfilada) vs SBR (guía redonda).....	183
<b>Tabla 30</b>	Factor de contacto .....	186
<b>Tabla 31</b>	Condiciones de funcionamiento para el coeficiente de seguridad estático .....	187

<b>Tabla 32</b>	Presiones de diseño por aplastamiento para tornillos .....	191
<b>Tabla 33</b>	Series de dimensiones básicas de roscas Acme .....	194
<b>Tabla 34</b>	Coefficientes de fricción .....	196
<b>Tabla 35</b>	Cargas sobre la bandeja de elementos .....	212
<b>Tabla 36</b>	Cargas del posterior y anterior del gabinete .....	212
<b>Tabla 37</b>	Elementos de control e indicadores.....	212
<b>Tabla 38</b>	Elementos del tablero de control y potencia .....	213
<b>Tabla 39</b>	Comparativa de drivers para motores Nema 23 .....	215
<b>Tabla 40</b>	Especificaciones eléctricas del Driver DM542A.....	216
<b>Tabla 41</b>	Especificaciones eléctricas del Driver DM542T. ....	218
<b>Tabla 42</b>	Comparación de tarjetas controladoras.....	218
<b>Tabla 43</b>	Especificaciones técnicas de la tarjeta controladora MyPlasmCNC. ....	220
<b>Tabla 44</b>	Consumo de corriente de los equipos .....	222
<b>Tabla 45</b>	Componentes para el circuito IoT .....	234
<b>Tabla 46</b>	Recomendación de parámetros de corte dependiendo del espesor de placa .....	254
<b>Tabla 47</b>	Parámetros de corte dependiendo del espesor de placa.....	255
<b>Tabla 48</b>	Datos de la prueba 1 .....	257
<b>Tabla 49</b>	Datos de la prueba 2.....	259
<b>Tabla 50</b>	Datos de la prueba 3 en cuadrados.....	261
<b>Tabla 51</b>	Resultados de precisión y exactitud en cuadrados de la prueba 3 .....	262
<b>Tabla 52</b>	Datos de la prueba 3 en círculos .....	262
<b>Tabla 53</b>	Resultados de precisión y exactitud en círculos de la prueba 3.....	263
<b>Tabla 54</b>	Datos de la prueba 4.....	264
<b>Tabla 55</b>	Resultados de precisión y exactitud en círculos de la prueba 4 .....	265
<b>Tabla 56</b>	Presupuesto para el sistema mecánico.....	273

<b>Tabla 57</b>	Presupuesto para el sistema eléctrico, electrónico y de control .....	275
<b>Tabla 58</b>	Presupuesto para el sistema informático .....	277
<b>Tabla 59</b>	Presupuesto para equipos .....	277
<b>Tabla 60</b>	Presupuesto para mano de obra .....	278
<b>Tabla 61</b>	Presupuesto para diseños .....	278
<b>Tabla 62</b>	Presupuesto final .....	279

### Índice de figuras

<b>Figura 1</b>	Corte con oxicorte y corte por plasma .....	32
<b>Figura 2</b>	Corte en forma de triángulo.....	33
<b>Figura 3</b>	Corte en forma de rectángulo.....	34
<b>Figura 4</b>	Corte en forma de círculo.....	34
<b>Figura 5</b>	Corte manual .....	35
<b>Figura 6</b>	Equipo fuente de plasma de la empresa Metal Imperial .....	38
<b>Figura 7</b>	Esquema propuesto para mesa CNC .....	40
<b>Figura 8</b>	Mesa forrada o recubierta con planchas de tool para un acabado estético .....	42
<b>Figura 9</b>	Rejilla para el descanso de las planchas de acero.....	43
<b>Figura 10</b>	Cama de agua .....	44
<b>Figura 11</b>	Antorcha CNC del equipo fuente de plasma .....	45
<b>Figura 12</b>	Carga del eje X.....	45
<b>Figura 13</b>	Carga del eje Y .....	46
<b>Figura 14</b>	Transmisión piñón cremallera .....	47
<b>Figura 15</b>	Sistema de desplazamiento de los tres ejes .....	47
<b>Figura 16</b>	Tarjeta controladora MyPlasmCNC .....	48



<b>Figura 17</b>	Interfaz del software MyPlasmCNC .....	49
<b>Figura 18</b>	Calidad en el acabado de corte por plasma .....	56
<b>Figura 19</b>	Esquema básico de una cortadora de plasma .....	57
<b>Figura 20</b>	Hypertherm Powermax 85.....	58
<b>Figura 21</b>	Víctor Cutmaster 82.....	60
<b>Figura 22</b>	Everlast Powerplasma 82i.....	61
<b>Figura 23</b>	Torno CNC.....	64
<b>Figura 24</b>	Esquema de una mesa CNC.....	65
<b>Figura 25</b>	Mesa CNC Medusa Practicut 4x8 .....	67
<b>Figura 26</b>	Sistema de correas.....	69
<b>Figura 27</b>	Piñón-cremallera .....	69
<b>Figura 28</b>	Sistema de transmisión por husillo .....	70
<b>Figura 29</b>	CNC NVEM Ethernet.....	71
<b>Figura 30</b>	Mach3 CNC .....	72
<b>Figura 31</b>	MyPlasmCNC .....	73
<b>Figura 32</b>	Motor paso a paso Nema 23.....	75
<b>Figura 33</b>	Servomotor y controlador .....	76
<b>Figura 34</b>	Sensores inductivos .....	77
<b>Figura 35</b>	Sensor Capacitivo .....	78
<b>Figura 36</b>	Final de carrera.....	79
<b>Figura 37</b>	Plataforma Bylink.....	81
<b>Figura 38</b>	Alternativa de solución .....	82
<b>Figura 39</b>	Alturas para la malla de software de análisis estructural .....	83
<b>Figura 40</b>	Bastidor de la mesa CNC en software de análisis estructural .....	84
<b>Figura 41</b>	Áreas correspondientes a las vigas secundarias .....	86

<b>Figura 42</b>	Áreas correspondientes de la cama de agua .....	91
<b>Figura 43</b>	Aplicación de la carga muerta de la cama de agua en el modelo 1.....	97
<b>Figura 44</b>	Aplicación de la carga muerta de las platinas de la rejilla en el modelo 1.....	98
<b>Figura 45</b>	Aplicación de la carga viva de la plancha en el modelo 1.....	98
<b>Figura 46</b>	Aplicación de la carga muerta de la cremallera y guías lineales en el modelo 1. ....	99
<b>Figura 47</b>	Aplicación de la carga viva de la cadena de arrastre en el modelo 1.....	99
<b>Figura 48</b>	Aplicación de la carga puntual, cargas laterales y longitudinales en el modelo 1..	100
<b>Figura 49</b>	Diseño con las platinas en la rejilla de los elementos en el modelo 1.....	100
<b>Figura 50</b>	Resultados del criterio de servicialidad del modelo 1.....	101
<b>Figura 51</b>	Deformación por la aplicación de cargas vivas y muertas del modelo 1. ....	102
<b>Figura 52</b>	Deformación en los ángulos de soporte de las platinas del modelo 1.....	103
<b>Figura 53</b>	Deformación en las vigas de soporte de la cama de agua del modelo 1. ....	103
<b>Figura 54</b>	Deformación en las vigas de soporte de los ángulos del modelo 1.....	104
<b>Figura 55</b>	Deformación en los tubos rectangulares en sentido el eje X del modelo 1. ....	105
<b>Figura 56</b>	Deformación en los tubos rectangulares en sentido el eje Y del modelo 1. ....	105
<b>Figura 57</b>	Aplicación de la carga muerta de la cama de agua en el modelo 2.....	106
<b>Figura 58</b>	Aplicación de la carga muerta de las platinas de la rejilla en el modelo 2.....	106
<b>Figura 59</b>	Aplicación de la carga viva de la plancha en el modelo 2.....	107
<b>Figura 60</b>	Aplicación de la carga muerta de la cremallera y guías lineales en el modelo 2. ..	107
<b>Figura 61</b>	Aplicación de la carga viva de la cadena de arrastre en el modelo 2.....	108
<b>Figura 62</b>	Aplicación de la carga cargas laterales y longitudinales en el modelo 2. ....	108
<b>Figura 63</b>	Diseño con las platinas en la rejilla de los elementos del modelo 2. ....	109
<b>Figura 64</b>	Resultados del criterio de servicialidad del modelo 2.....	110
<b>Figura 65</b>	Deformación por la aplicación de cargas vivas y muertas en el modelo 2. ....	111
<b>Figura 66</b>	Deformación en los ángulos de soporte de las platinas del modelo 2.....	112

<b>Figura 67</b>	Deformación en las vigas de soporte de la cama de agua del modelo 2. ....	112
<b>Figura 68</b>	Deformación en las vigas de soporte de los ángulos .....	113
<b>Figura 69</b>	Deformación en los tubos rectangulares en sentido el eje X .....	114
<b>Figura 70</b>	Deformación en los tubos rectangulares en sentido el eje Y .....	114
<b>Figura 71</b>	Aplicación de cargas laterales por movimiento sísmicos .....	117
<b>Figura 72</b>	Desplazamientos por acción de cargas laterales en el eje X.....	117
<b>Figura 73</b>	Criterio de servicialidad por aplicación de cargas laterales .....	118
<b>Figura 74</b>	Aplicación de cargas laterales en sentido Y.....	119
<b>Figura 75</b>	Desplazamientos por acción de cargas laterales en el eje Y.....	119
<b>Figura 76</b>	Simulación del puente en el software de análisis estructural.....	122
<b>Figura 77</b>	Aplicación de la carga puntual en el punto medio. ....	122
<b>Figura 78</b>	Aplicación de la carga puntuales de las cargas lateral y longitudinal. ....	123
<b>Figura 79</b>	Aplicación de la carga distribuida de la carga de los cables. ....	123
<b>Figura 80</b>	Aplicación de las cargas de la cremallera y las guías lineales.....	124
<b>Figura 81</b>	Deformación del puente luego de aplicar las cargas correspondientes. ....	125
<b>Figura 82</b>	Criterio de servicialidad en el puente. ....	125
<b>Figura 83</b>	Diseño CAD de la placa de soporte del puente.....	127
<b>Figura 84</b>	Condiciones de simulación para la placa de soporte del puente. ....	127
<b>Figura 85</b>	Tensión de von Mises de la placa de soporte del puente. ....	128
<b>Figura 86</b>	Desplazamientos de la placa soporte del puente.....	129
<b>Figura 87</b>	Factor de seguridad de la placa soporte del puente .....	129
<b>Figura 88</b>	Gráfico de convergencia del método h de la placa soporte del puente .....	130
<b>Figura 89</b>	Diseño CAD de la placa de soporte principal del eje Z. ....	132
<b>Figura 90</b>	Condiciones de simulación para la placa de soporte principal del eje Z. ....	132
<b>Figura 91</b>	Tensión de von Mises de la placa de soporte principal del eje Z.....	133

<b>Figura 92</b>	Desplazamientos de la placa de soporte principal del eje Z. ....	133
<b>Figura 93</b>	Factor de seguridad de la placa de soporte principal del eje Z. ....	134
<b>Figura 94</b>	Gráfico de convergencia del método h de la placa de soporte principal del eje Z. ....	135
<b>Figura 95</b>	Diseño CAD de la placa de soporte secundario del eje Z. ....	136
<b>Figura 96</b>	Condiciones de simulación para la placa de soporte secundario del eje Z. ....	137
<b>Figura 97</b>	Tensión de von Mises de la placa de soporte secundario del eje Z. ....	137
<b>Figura 98</b>	Desplazamientos de la placa de soporte secundario del eje Z. ....	138
<b>Figura 99</b>	Factor de seguridad de la placa de soporte secundario del eje Z. ....	138
<b>Figura 100</b>	Gráfico de convergencia del método h del soporte secundario del eje Z. ....	139
<b>Figura 101</b>	Diseño CAD de las zapatas para las columnas del bastidor. ....	140
<b>Figura 102</b>	Condiciones de simulación para la zapata. ....	141
<b>Figura 103</b>	Tensión de von Mises de la zapata. ....	141
<b>Figura 104</b>	Desplazamientos de la zapata. ....	142
<b>Figura 105</b>	Factor de seguridad de la zapata. ....	142
<b>Figura 106</b>	Gráfico de convergencia del método h de la zapata. ....	143
<b>Figura 107</b>	Diseño CAD del cabezal deslizante. ....	144
<b>Figura 108</b>	Condiciones del cabezal deslizante. ....	145
<b>Figura 109</b>	Tensión del cabezal deslizante. ....	145
<b>Figura 110</b>	Desplazamientos del cabezal deslizante. ....	146
<b>Figura 111</b>	Factor de seguridad del cabezal deslizante. ....	146
<b>Figura 112</b>	Gráfico de convergencia del método h del cabezal deslizante. ....	147
<b>Figura 113</b>	Diagrama de selección del módulo del dentado helicoidal. ....	151
<b>Figura 114</b>	Factor Geométrico para engranajes helicoidal. ....	154
<b>Figura 115</b>	Corrección del factor geométrico para engranajes helicoidales. ....	154
<b>Figura 116</b>	Factor de ciclos de esfuerzo. ....	159

<b>Figura 117</b>	Número de esfuerzo de flexión permisible de aceros .....	161
<b>Figura 118</b>	Propiedades mecánicas medias de algunos aceros tratados térmicamente.....	162
<b>Figura 119</b>	Catálogo de cremalleras. ....	163
<b>Figura 120</b>	Diagrama de selección del módulo del dentado helicoidal. ....	165
<b>Figura 121</b>	Parte de un tornillo de potencia. ....	167
<b>Figura 122</b>	Diagramas de fuerza: a) al subir la carga; b) al bajar la carga. ....	167
<b>Figura 123</b>	Tipos de roscas .....	168
<b>Figura 124</b>	Motor NEMA 23 de 1.26 [N-m].....	171
<b>Figura 125</b>	Motor NEMA 23 de 3 [N-m].....	181
<b>Figura 126</b>	Dimensiones de la Serie EG de HIWIN .....	187
<b>Figura 127</b>	Dimensiones del Rail EGR-U.....	189
<b>Figura 128</b>	Diseño CAD del brazo para movilizar la mesa CNC .....	202
<b>Figura 129</b>	Condiciones de simulación del brazo para movilizar la mesa CNC.....	203
<b>Figura 130</b>	Tensión de von Mises del brazo para movilizar la mesa CNC.....	203
<b>Figura 131</b>	Desplazamientos del brazo para movilizar la mesa CNC. ....	204
<b>Figura 132</b>	Factor de seguridad del brazo para movilizar la mesa CNC.....	204
<b>Figura 133</b>	Gráfico de convergencia del método h del brazo para movilizar la mesa CNC. ..	205
<b>Figura 134</b>	Diseño CAD del tornillo de potencia .....	207
<b>Figura 135</b>	Condiciones de simulación para el pandeo elástico.....	207
<b>Figura 136</b>	Factor de carga del pandeo 1. ....	208
<b>Figura 137</b>	Factor de carga del pandeo 2. ....	208
<b>Figura 138</b>	Garruchas industriales .....	209
<b>Figura 139</b>	Modelo CAD del gabinete .....	210
<b>Figura 140</b>	Creación de la estructura del gabinete .....	211
<b>Figura 141</b>	Estructura del gabinete en el software de análisis estructural .....	211

<b>Figura 142</b>	Análisis de servicialidad de la estructura del gabinete .....	213
<b>Figura 143</b>	Desplazamientos en puntos críticos de la armadura del gabinete.....	214
<b>Figura 144</b>	STEPPER MOTOR DRIVER-DM542A .....	216
<b>Figura 145</b>	STEPPER MOTOR DRIVER-DM542T .....	217
<b>Figura 146</b>	Parte del circuito esquemático .....	221
<b>Figura 147</b>	Intensidades nominales de los fusibles .....	224
<b>Figura 148</b>	Corriente convencional de fusión fusibles .....	225
<b>Figura 149</b>	Tabla del calibre de alambres según la AWG .....	227
<b>Figura 150</b>	Arquitectura del medidor energético basado en IoT.....	230
<b>Figura 151</b>	Librerías necesarias para la programación .....	231
<b>Figura 152</b>	Entorno de Firebase.....	232
<b>Figura 153</b>	Pantallas para la aplicación de IoT .....	233
<b>Figura 154</b>	Programación por bloques en App Inventor .....	234
<b>Figura 155</b>	Esquema eléctrico y diseño PCB para sistema IoT .....	235
<b>Figura 156</b>	Construcción de la mesa CNC.....	236
<b>Figura 157</b>	Construcción de la cama de agua.....	237
<b>Figura 158</b>	Montaje ángulos de la rejilla y zapatas .....	237
<b>Figura 159</b>	Mecanismo de elevación.....	238
<b>Figura 160</b>	Estructura del centro de control .....	239
<b>Figura 161</b>	Recubrimiento del centro de control .....	239
<b>Figura 162</b>	Montaje final del centro de control .....	240
<b>Figura 163</b>	Construcción de los tableros de control y potencia .....	241
<b>Figura 164</b>	Montaje de los tableros en el centro de control.....	241
<b>Figura 165</b>	Corte de placas para los elementos del sistema CNC .....	242
<b>Figura 166</b>	Piezas impresas para el porta antorcha .....	243

<b>Figura 167</b>	Construcción del puente.....	244
<b>Figura 168</b>	Anclaje de guías lineales y cremalleras.....	244
<b>Figura 169</b>	Elementos de protección.....	245
<b>Figura 170</b>	Aplicación de batepiedra.....	246
<b>Figura 171</b>	Aplicación de anticorrosivo.....	246
<b>Figura 172</b>	Acabado final.....	247
<b>Figura 173</b>	Placa IOT.....	247
<b>Figura 174</b>	Montaje del puente y del eje Z.....	249
<b>Figura 175</b>	Montaje de los motores.....	249
<b>Figura 176</b>	Colocación de sensores.....	250
<b>Figura 177</b>	Ventiladores y torre de luces.....	251
<b>Figura 178</b>	Colocación de la antorcha para corte.....	251
<b>Figura 179</b>	Conexiones eléctricas en la mesa CNC.....	252
<b>Figura 180</b>	Montaje de las rejillas.....	252
<b>Figura 181</b>	Ensamble final.....	253
<b>Figura 182</b>	Configuración de parámetros en el Software MYplasmCNC.....	255
<b>Figura 183</b>	Medición de cuadrados.....	256
<b>Figura 184</b>	Medición de círculos.....	256
<b>Figura 185</b>	Resultados de la Prueba 1.....	259
<b>Figura 186</b>	Resultados de la Prueba 2.....	261
<b>Figura 187</b>	Resultados de la Prueba 3.....	264
<b>Figura 188</b>	Resultados de la Prueba 4.....	265
<b>Figura 189</b>	Diseño de cerramiento.....	266
<b>Figura 190</b>	Proceso de corte de cerramiento.....	267
<b>Figura 191</b>	Resultado del corte del cerramiento.....	267

<b>Figura 192</b>	Instalación del cerramiento .....	268
<b>Figura 193</b>	Corte de balcón y celosía.....	269
<b>Figura 194</b>	Instalación de puerta y balcón .....	269
<b>Figura 195</b>	Pruebas de conexión del sistema IoT .....	270
<b>Figura 196</b>	Registro de datos en la base de datos del sistema IOT .....	270
<b>Figura 197</b>	Proceso de corte de IMPERIAL ENTERPRISE X .....	271
<b>Figura 198</b>	Resultados de corte de letras .....	272
<b>Figura 199</b>	Montaje de las letras .....	272



## Resumen

Metal Imperial es una empresa dedicada al armado y montaje de estructuras metálicas y metalmecánica en general, en la ciudad de Azogues, provincia del Cañar. El presente trabajo de titulación consiste en el diseño y construcción de una mesa de control numérico computarizado CNC para el corte por arco de plasma, lo permitirá a la empresa incrementar su nivel de competitividad y productividad tanto en la ejecución de sus proyectos constructivos, así como la oferta del servicio en el mercado local.

La empresa impuso los requerimientos técnicos como el área de trabajo de 3000 mm de largo por 1500 mm de ancho, y la capacidad de corte de 25 mm. La metodología empleada divide a todo el sistema mecatrónico en sistemas subyacentes. En el sistema mecánico se diseña y construye el bastidor empleando miembros estructurales, se realiza la selección de los sistemas de transmisión de potencia, deslizamientos y generación de movimiento. En el sistema eléctrico, electrónico y de control se diseñan y construyen los circuitos de control y potencia para proveer de energía a todo el sistema, así como procesar las señales de control mediante la tarjeta controladora. En el sistema informático se desarrolla una aplicación para celular con conexión a una base de datos (nube) donde se monitorean variables eléctricas para la determinación del consumo energético de la máquina.

Finalizada la construcción, se realizan pruebas de corte mediante diseño iterativo para establecer los parámetros de corte para cada espesor de pieza de trabajo, así como la repetibilidad y confiabilidad del sistema mecatrónico. La máquina construida permite realizar cortes en planchas de acero al carbono cuyos espesores varían entre 1 y 25 mm, a una velocidad máxima de 5000 mm/min para 1 milímetro y una velocidad mínima de 108 mm/min.

*Palabras clave:* Corte plasma, CNC, bastidor, nube

## Abstract

Metal Imperial is a company dedicated to the assembly and mounting of metal structures and metal-mechanics in general, in the city of Azogues, province of Cañar. This titling work consists of the design and construction of a CNC computerized numerical control table for plasma arc cutting, which will allow the company to increase the level of competitiveness and productivity in both the execution of its construction projects, as well as their portfolio of services in the local market.

The company imposed technical requirements such as a work area of 3000 mm long by 1500 mm wide, and a cutting capacity of 25 mm. The methodology used divides the entire mechatronic system into underlying systems. In the mechanical system, the frame is designed and built using structural members, the power transmission system, as well as the sliding and movement generation systems are selected. In the electrical, electronic and control system, the control and power circuits are designed and built to provide energy to the entire system, as well as process the control signals through the controller card. In the computer system, a mobile application is developed with connection to a database (cloud) where electrical variables are monitored to determine the energy consumption of the machine.

Once the construction is finished, cutting tests are carried out through iterative design to establish the cutting parameters for each thickness of the workpiece, as well as the repeatability and reliability of the mechatronic system. The machine allows cutting carbon steel plates whose thicknesses vary between 1 and 25 mm, at a maximum speed of 5000 mm/min for 1 mm and a minimum speed of 108 mm/min.

*Key words:* Plasma cutting, CNC, frame, cloud

## Capítulo I

### Introducción

#### Antecedentes

Metal Imperial es una empresa dedicada al armado y montaje de estructuras metálicas, satisfaciendo las necesidades de la construcción en acero de sus clientes, con calidad y garantía. Ubicada en la ciudad de Azogues, provincia del Cañar.

Metal Imperial nace en marzo de 2019, de la ilusión de aportar soluciones inteligentes e innovadoras en la industria metalmeccánica de la localidad, brindando servicios constructivos rápidos, oportunos, eficaces y eficientes, satisfaciendo estándares de calidad.

En Metal Imperial se caracterizan por estar siempre a la vanguardia de los avances tecnológicos, es así que cuentan con máquinas y herramientas de punta que garantizan la mejor calidad en los servicios y la optimización de recursos para beneficio de sus clientes. Es una empresa que se compromete firmemente con sus clientes, generando valor y construyendo la sólida estructura para hacer de sus proyectos y sueños una realidad tangible.

La empresa ofrece servicios de armado y montaje de estructuras metálicas tales como:

- Estructura metálica para casas
- Cubiertas metálicas
- Galpones
- Naves industriales

Metalmeccánica en general

- Portones

- Cerramientos
- Puertas
- Mesas
- Protecciones para puertas y ventanas, etc.

Para los cortes largos del metal se emplean amoladoras con disco de metal; sin embargo, una solución más rápida y económica es el corte con arco de plasma.

En el libro (Cary, 1992) menciona que “el corte por arco de plasma es un proceso de corte que emplea un arco estrecho de chorro de gas ionizado a alta velocidad que funde un área localizada de la pieza de trabajo.” Este sistema de corte permite una alta definición, así como una calidad superior de corte en metales, haciéndolo ideal para la realización de figuras de compleja geometría que resultaría muy difícil con otros procesos de corte como el oxicorte.

En la figura 1 se muestra un corte realizado con oxicorte y un corte realizado de forma manual con la cortadora de plasma.

### **Figura 1**

*Corte con oxicorte y corte por plasma*



*Nota.* Adaptado de la empresa Metal Imperial

Actualmente, la empresa realizó la adquisición de una cortadora de plasma de la marca EVERLAST modelo POWERPLASMA 82i.

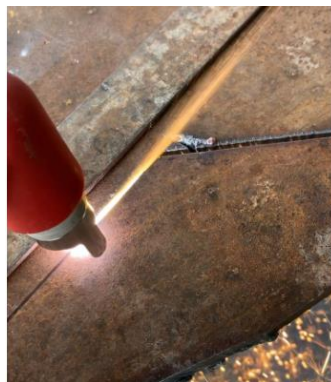
En (EVERLAST IGBT INVERTER TECHNOLOGY, 2020) se manifiesta que “esta cortadora de plasma es ideal para cortar regularmente un máximo de 1 pulgada de espesor y un máximo corte de calidad @10-12 IPM de 1 ¼ pulgadas de espesor.”

Con dicha máquina se ejecutan los cortes de planchas de acero al carbono requeridos en la ejecución de proyectos de construcciones, sin embargo, los cortes se realizan manualmente, empleando reglas o moldes, de tal forma que las únicas geometrías que se pueden realizar actualmente son líneas rectas para la formación de cuadrados, rectángulos, triángulos y círculos de un diámetro mínimo de 100 milímetros, además que el tiempo empleado para la realización de dichos cortes simples es bastante considerable, convirtiéndose en un cuello de botella en el proceso constructivo de la empresa.

En las figuras 2, 3 y 4 se muestran los cortes realizados de forma manual empleando la máquina cortadora de plasma Everlast Powerplasma 82i.

## **Figura 2**

*Corte en forma de triángulo*



*Nota.* Adaptado de la empresa Metal Imperial

**Figura 3**

*Corte en forma de rectángulo*



*Nota.* Adaptado de la empresa Metal Imperial

**Figura 4**

*Corte en forma de círculo*



*Nota.* Adaptado de la empresa Metal Imperial

El corte de forma manual, al no realizarse con una velocidad continua de avance puede afectar en la calidad del corte, como se aprecia en la figura 5.

**Figura 5**

*Corte manual*



*Nota.* Adaptado de la empresa Metal Imperial

La falta de control en el avance de la antorcha produce líneas indeseables y poco estéticas en el filete de la pieza de trabajo.

Según (Naranjo, 2017) menciona que “sin una mesa CNC no se puede realizar cortes de geometría compleja tales como figuras artísticas, letras, dibujos creativos, entre otros.” Estas geometrías son muy requeridas en los diseños presentados por los clientes, para lo cual la empresa, para no perder el contrato del proyecto y realizar dichos cortes complejos en otras empresas donde sí se disponga del servicio de corte CNC.

Por tal motivo, la empresa, a fin de lograr incrementar su nivel de competitividad y productividad, busca adquirir una mesa CNC para el corte por arco de plasma, ya sea para la ejecución de sus proyectos, así como para la oferta del servicio en el mercado local.

## **Justificación e importancia**

La principal actividad económica de la empresa Metal Imperial es la construcción en acero, lo cual requiere realizar cortes de planchas de acero de espesores que varían entre 1 a 25 milímetros, por lo que resulta mucho más sencillo el uso o empleo de una máquina CNC ya que permitiría una mayor velocidad de trabajo e incluso una mejor precisión en los acabados de los cortes para aumentar la calidad de los productos finales.

Con la realización de este proyecto para la empresa Metal Imperial se busca la aplicación de los conocimientos adquiridos a lo largo de los semestres de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica en la aplicación de un sistema mecatrónico. Además, la importancia del proyecto en la contribución del adelanto de la industria ecuatoriana, para que la empresa diversifique sus servicios a fin de satisfacer la demanda de sus clientes. Sumado a ello, la realización de este proyecto permitirá la incursión en el campo laboral en lo que a estructuras en acero se refiere, siendo éste un giro de negocio rentable.

Un aspecto importante a considerar dentro de la industria ecuatoriana y en particular en la ciudad de Azogues, capital de la provincia del Cañar, es que solamente existen dos talleres o empresas que ofertan el servicio de corte CNC por plasma: Taller Buestan y El Tugal. Es así que la competencia en la localidad es mínima, haciendo que estas dos empresas, al ser las únicas del sector que ofertan el servicio de corte CNC por plasma, cobren un costo muy elevado por el servicio, dejándoles a los clientes sin otra alternativa que pagar.

Con la implementación del servicio de corte CNC por plasma, la empresa Metal Imperial busca ampliar sus servicios para dar soluciones tecnológicas, inteligentes y económicas a sus clientes.



Con el desarrollo de este proyecto y la implementación de un sistema IOT en el mismo permitirá conectar e intercambiar datos con otros dispositivos y sistemas a través de internet. Lo que se busca con la implementación de IOT en el sistema es poder visualizar el consumo energético del equipo para lo cual es necesario la medición de los parámetros de tensión y corriente que este consuma cuando el equipo se encuentre en funcionamiento, para lo cual se calculará la potencia y posteriormente poder mostrar el consumo energético. Esto se vuelve importante ya que en la actualidad se busca que los equipos sean de menor consumo y con una alta eficiencia energética, haciéndolos amigables con el medio ambiente. Todo lo implementado en IOT se deberá visualizar en la aplicación de un teléfono móvil que esté conectado a internet y pueda ser posible el envío de datos desde el equipo central del sistema CNC hasta el teléfono móvil ubicado.

La implementación de la tecnología IOT en la mesa CNC lo hace diferente y exclusivo al resto de máquinas o mesas CNC existentes en el mercado nacional.

### **Alcance del Proyecto**

La empresa Metal Imperial ofrece servicios en el armado y montaje de estructuras metálicas y metalmecánica en general. Es así que la empresa requiere diversificar sus servicios mediante la implementación de servicio de corte por plasma mediante tecnología CNC.

El sistema CNC solicitado por la empresa tiene los siguientes requerimientos técnicos:

- Área de trabajo de la mesa: 3000 [mm] X 1500 [mm].
- Capacidad de la mesa: 890 [kg].
- Espesor máximo de la plancha a cortar: 25 [mm].
- Cama de agua para la refrigeración de la pieza de trabajo durante el corte.

- Sistema de monitoreo de consumo energético mediante tecnología IOT y estimación de costos del servicio.

La empresa únicamente dispone del equipo fuente de plasma Everlast Powerplasma 82i de la figura 6.

### Figura 6

*Equipo fuente de plasma de la empresa Metal Imperial*



*Nota.* Adaptado de la empresa Metal Imperial

Como se mencionó anteriormente, uno de los requerimientos de la empresa es la de realizar cortes en planchas de un espesor máximo de 25 milímetros. La fuente plasma con la que cuenta la empresa está fabricada para cumplir dicha capacidad como se muestra en su manual de usuario de la tabla 1.

### Tabla 1

*Especificaciones técnicas de Everlast PowerPlasma i*

<b>Especificaciones</b>	<b>PowerPlasma 62i</b>	<b>PowerPlasma 82i</b>	<b>PowerPlasma 102i</b>
<b>Tipo de inversor</b>	Inversor IGBT controlado digitalmente		
<b>Salida nominal</b>	20A/88V –	20A/88V –	20A/88V –
<b>mínima/máxima</b>	60A/108V	80A/112V	100A/120V

<b>Tipo de inicio</b>	<b>Tipo de retroceso, Inicio de alta frecuencia</b>		
<b>Tipo de antorcha manual o CNC</b>	iPT60 12ft. /iPT60M 25ft.	iPT80 12ft. /iPT80M 25ft.	iPT100 12ft. /iPT100M 25ft.
<b>Ciclo de trabajo a amperios/voltios nominales (40°) (salida V/A)</b>	60% @ 60A/104V 100% @ 50A/100V	60% @ 60A/112V 100% @ 63A/104V	60% @ 100A/120V 100% @ 80A/112V
<b>OCV (UO)</b>	240 V	240 V	250 V
<b>Tensión de entrada (U1)</b>	240V 50/60Hz 1 fase (±10%)	240V 50/60Hz 1 fase (±10%)	240V 50/60Hz 1 fase (±10%)
<b>Amperios máximos de irrupción (I1MAX) @ 240 V</b>	41 A	58.4 A	78 A
<b>Amperios efectivos nominales máximos (I1EFF)</b>	32.4 A	45.2 A	60 A
<b>Puerto CNC / Compatible con CNC</b>		Si	
<b>Temporizador de postfluj</b>	Ajustable, 0-60 segundos		
<b>Requisitos y recomendaciones del compresor de aire</b>	4.5 – 5 CFM @ 90 PSI (127-142 lpm @ 6.2 bar)	7 – 8 CFM @ 90 PSI (200 - 225 lpm @ 6.2 bar)	
<b>Espesor de corte promedio diario máximo recomendado (acero)</b>	15.8 mm	25 mm	31 mm
<b>Corte de calidad máxima nominal 10-12 IPM (250-300 mm/min) (acero)</b>	25 mm	31 mm	38 mm
<b>Corte máximo de separación a 3 IPM (75 mm/min)</b>	31 mm	36 mm	44 mm

*Nota.* Adaptado de (EVERLAST IGBT INVERTER TECHNOLOGY, 2020)

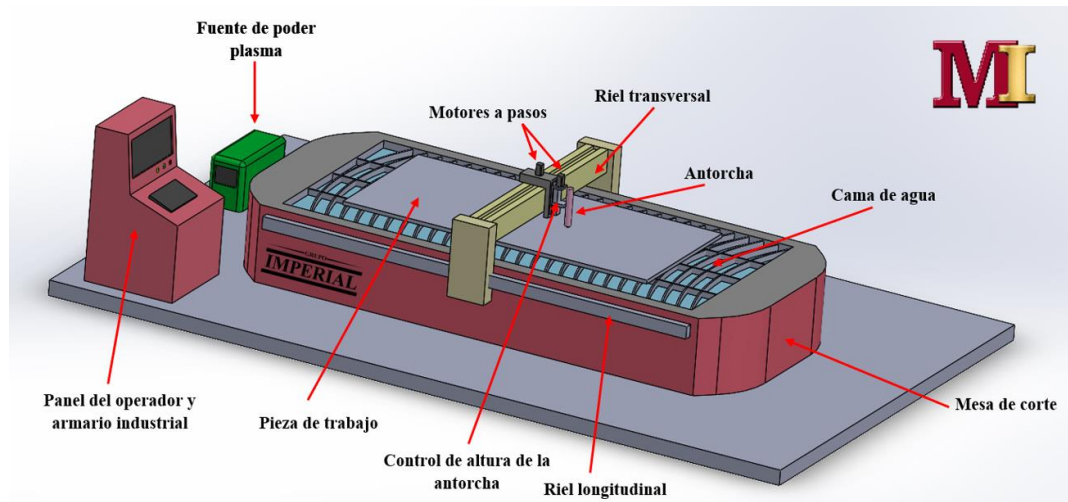
Claramente en la figura 7 se puede observar que la fuente de plasma con la que dispone la empresa puede cortar hasta 36 [mm] si su velocidad es de 31PM o 75 [mm/min].

El espesor de corte promedio diario máximo recomendado es de 25 [mm] como se especifica en el manual del equipo, por lo tanto, el requerimiento de la empresa de cortar planchas de 25 [mm] de espesor puede ser satisfecho sin ningún problema ya que la capacidad de corte que tendrá el sistema mecatrónico depende directamente de la fuente de plasma de la figura 6.

El proyecto de titulación se centra en diseñar y construir la mesa con la cama de agua, el sistema cartesiano (CNC) y el armario industrial para el control del sistema como se muestra en el esquema propuesto de la figura 7.

### Figura 7

*Esquema propuesto para mesa CNC*



*Nota.* Mesa CNC es una propuesta elaborada en el software de diseño.

Como se puede ver en la figura 7, el panel de operador se encuentra separado de la mesa, será una estructura movable de tal forma que pueda ubicarse donde el operador lo requiera.

Por lo tanto, el entregable para la empresa será un sistema mecatrónico compuesto por una mesa con cama de agua, sistema cartesiano (CNC) y armario industrial con panel de control del sistema.

La mesa será construida con perfiles estructurales (tubos estructurales) y recubierta o forrada con planchas de tool de 0.7 milímetros de espesor para un acabado estético. En dicha mesa se incluye una cama de agua para la refrigeración de las piezas de trabajo y la inhibición de gases producidos durante el corte.

Es de trascendental importancia mencionar que sobre la mesa se colocará la pieza de trabajo o plancha metálica a cortar, de tal forma que la pieza de trabajo o plancha siempre estará en una posición estática o fija, mientras que el sistema cartesiano moverá la antorcha CNC de la figura 11 describiendo la trayectoria del diseño CAD del corte a realizar.

El sistema mecatrónico que se va a diseñar, construir y entregar a la empresa Metal Imperial como proyecto de titulación es la integración sinérgica de sistemas mecánico, eléctrico y electrónico, de control e informático.

En los siguientes apartados se describen, a detalle, cada uno de los sistemas que componen este sistema mecatrónico:

## **Sistema mecánico**

### **Diseño de la mesa con perfiles estructurales de acero**

El bastidor de la mesa CNC debe ser capaz de soportar planchas de acero al carbono, cuyos espesores varían entre 1 [mm] hasta 25 [mm], lo que implica que la mesa debe soportar una carga de 890 [kg] aproximadamente, sumado a ello, la carga generada por la cama de agua. Es así que para el diseño de la mesa se emplearán miembros estructurales de acero para formar un bastidor o armazón sólido y resistente.

El bastidor o armazón de la mesa finalmente será recubierto o forrado con planchas de tool de 0.7 [mm] de espesor para darle un acabado estético a la mesa, como se observa en el ejemplo de la mesa de la figura 8.

### **Figura 8**

*Mesa forrada o recubierta con planchas de tool para un acabado estético*



*Nota.* Mesa CNC del mercado

Se realizará las siguientes actividades:

- Diseño de bastidor o armazón empleando perfiles estructurales de acero ASTM A36.
- Diseño de juntas soldadas y juntas empernadas del bastidor.
- Diseño de la rejilla para el descanso de las piezas de trabajo o planchas de acero a cortar.  
Observe la figura 9.
- Diseño de la cama de agua y su respectivo sistema de alimentación y drenaje como se aprecia en la figura 10.
- Diseño del sistema de movilidad para la mesa mediante ruedas o garruchas de alta capacidad.
- Diseño del mecanismo de nivelación de la mesa mediante pernos.
- Diseño de la carcasa, recubrimiento o forrado de la mesa empleando planchas de tool de 0.7 [mm] de espesor.

### Figura 9

Rejilla para el descanso de las planchas de acero



*Nota.* Rejilla de una mesa CNC del mercado

**Figura 10**

*Cama de agua*



*Nota.* Vista de una cama de agua de una CNC del mercado

**Diseño del sistema cartesiano de tres ejes para el movimiento.**

En el proyecto de (Gómez & Alberco, 2019) se manifiesta que “una mesa CNC por lo general tiene un sistema de tres ejes.” Los cuales X e Y serán empleados para desplazar la antorcha CNC plasma describiendo la trayectoria requerida por el diseño CAD, mientras que el eje Z es para el control de altura de la antorcha sobre la pieza de trabajo. Éste es un aspecto importante a considerar debido a que la mesa CNC será empleada para cortar planchas de acero de espesores que varían entre 1 y 25 [mm].

En la mesa va montado este sistema cartesiano que se construirá para formar los tres ejes: Y (longitudinal), X (transversal) y Z (perpendicular).

- Eje Z (perpendicular): moverá una carga aproximada de 2.5 kg correspondiente al peso de la antorcha CNC del equipo fuente de plasma que se observa en la figura 11. Para el accionamiento de este eje se empleará un motor a pasos.



## Figura 11

*Antorcha CNC del equipo fuente de plasma*

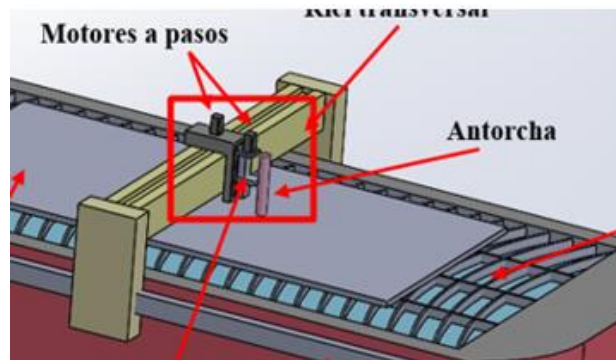


*Nota. Adaptado de la empresa Metal Imperial*

- Eje X (transversal): moverá una carga de 7 kg aproximadamente que corresponde al eje Z, es decir, el peso de la mesa deslizante y motor del eje Z y la antorcha CNC del equipo fuente de plasma como se muestra en la figura 12. El accionamiento de este eje será con un motor a pasos.

## Figura 12

*Carga del eje X*



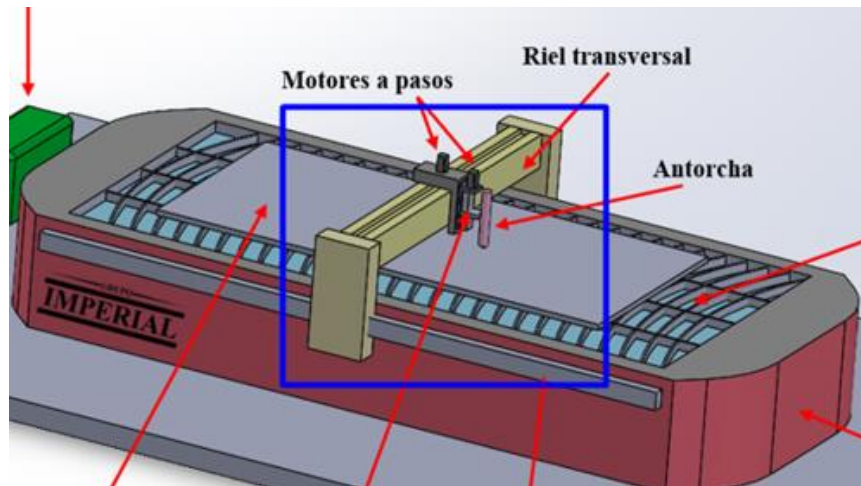
*Nota. Adaptado del esquema propuesto de mesa CNC.*

- Eje Y (longitudinal): desplazará una carga aproximada de 20 kg correspondiente del eje X, es decir, viga estructural de acero y la carga del eje Z (peso de la mesa deslizante,

peso del motor, peso de la antorcha CNC, cableado) como se muestra en la figura 13. Para el movimiento de este eje se empleará dos motores a pasos, uno a cada lado de la viga transversal.

### Figura 13

*Carga del eje Y*



*Nota.* Adaptado del esquema propuesto de mesa CNC.

Para cumplir con el sistema cartesiano, en este apartado se realizará lo siguiente:

- Diseño del mecanismo de movimiento de los ejes Y y X mediante transmisión piñón-cremallera como se observa en la figura 14 y el eje Z mediante tornillo sinfín.
- Diseño de la viga horizontal mediante perfiles estructurales de acero para el eje X.
- Diseño del cabezal porta antorcha de plasma.
- Diseño del sistema de desplazamiento de los ejes X e Y empleando rieles y rodamientos lineales como se muestra en la figura 15.

**Figura 14**

*Transmisión piñón cremallera*



*Nota.* Sistema de transmisión

**Figura 15**

*Sistema de desplazamiento de los tres ejes*



*Nota.* Guías y rodamientos para el desplazamiento

***Sistema eléctrico, electrónico y de control*****Diseño del sistema eléctrico**

La empresa dispone de una cortadora de plasma de la marca EVERLAST modelo POWERPLASMA 82i de la figura 6. El sistema eléctrico gestionará la correcta alimentación de

la fuente de poder, así como de los actuadores del sistema y el panel de control. Se tendrá en cuenta:

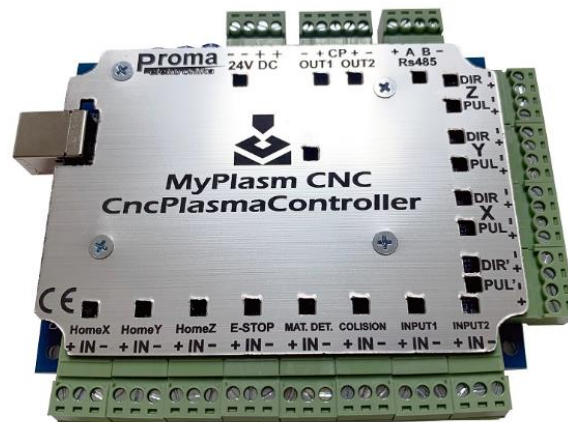
- Diseño de la red de alimentación de energía.
- Diseño del circuito de potencia del sistema.
- Dimensionamiento de cables y conectores.
- Diseño del armario industrial.
- Selección de motores a pasos para el movimiento de los tres ejes.

### Diseño del sistema electrónico y de control

El control del sistema cartesiano (CNC) se realizará mediante la tarjeta controladora MyPlasmCNC de la marca PROMA INTERFACE. Esta tarjeta es exclusiva para sistemas CNC de corte por arco de plasma. En la figura 16 se aprecia dicha tarjeta controladora.

**Figura 16**

*Tarjeta controladora MyPlasmCNC*



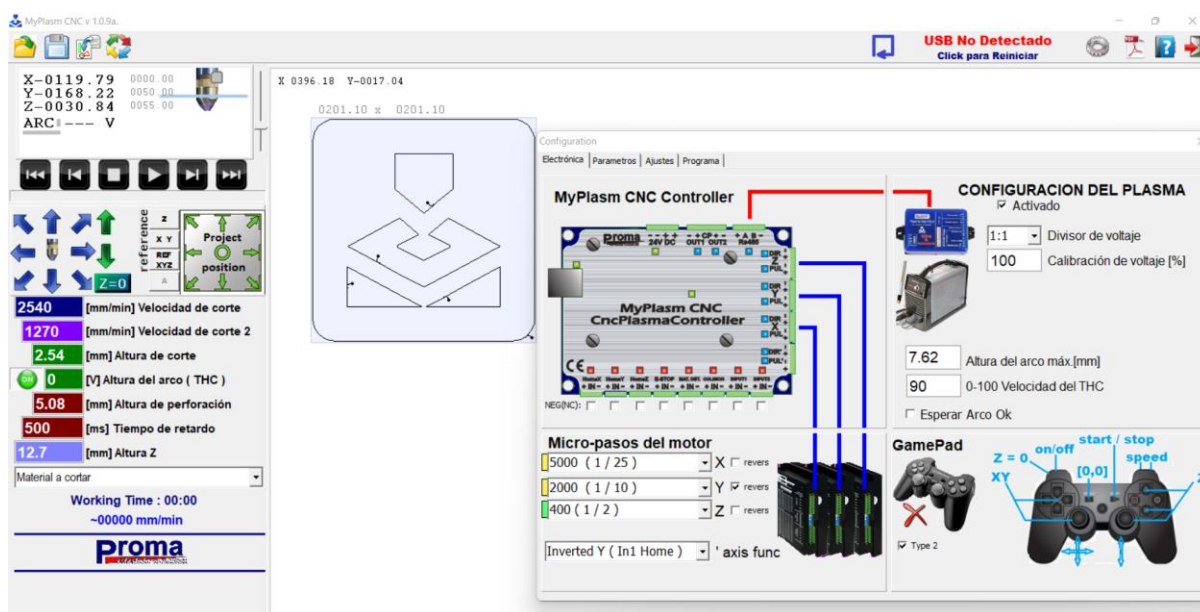
*Nota.* Adaptado del catálogo MyPlasmCNC

El sistema CNC se moverá gracias a la acción de motores a pasos controlados por la tarjeta MyPlasmCNC. Además, el sistema contará con sensores para el respectivo cero de máquina. Para el efecto, se realizará el dimensionamiento y selección de sensores.

Para la interfaz de usuario o HMI del sistema se empleará el software de computador MyPlasmCNC proveído por el fabricante de la tarjeta controladora. La HMI permite al usuario la calibración y asignación de parámetros necesarios para un buen corte. En la figura 17 se muestra el software a emplear.

**Figura 17**

*Interfaz del software MyPlasmCNC*



*Nota.* Adaptado del catálogo MyPlasmCNC

Todos los componentes electrónicos, drivers de motores, fuentes de alimentación de motores, fusibles, interruptores, entre otros, irán dentro de un armario industrial que se diseñará y construirá para el efecto.

Las actividades a realizar son:

- Selección de sensores para el homing del sistema CNC.
- Diseño del circuito de control.
- Dimensionamiento de cables y conectores.
- Diseño de la red de alimentación de sensores, drivers, tarjeta controladora.

### ***Sistema informático***

El sistema informático permitirá dar seguimiento al funcionamiento en tiempo real del sistema, permitiendo generar estadísticas para evaluar el desempeño, así como el consumo energético del sistema mecatrónico. Por lo tanto, se implementará un sistema basado en tecnología IOT para el monitoreo remoto a través de una aplicación para celular. Las mediciones requeridas por el sistema informático se obtendrán a través de sensores de corriente y tensión para su posterior procesamiento.

Las actividades a realizar son:

- Diseño de la red de comunicación inalámbrica sistema mecatrónico-celular.
- Selección del microcontrolador para comunicación inalámbrica.
- Selección de la aplicación móvil.
- Programación de la red inalámbrica.
- Diseño del interfaz humano máquina o HMI para la aplicación del celular.
- Selección de sensores de medición de variables para determinar el consumo energético.
- Programación para la contabilización del tiempo de corte y estimación de costos del servicio.

## **Objetivo General**

Diseñar y construir una mesa de control numérico computarizado (CNC) para el corte por arco de plasma de planchas de acero al carbono para la empresa Metal Imperial

## **Objetivos Específicos**

- Investigar acerca de distintos controladores y softwares que permitan un mejor control del sistema, así como una interfaz de usuario amigable para simplificar el uso de la máquina por parte de cualquier operador.
- Realizar el diseño mecánico de la estructura de la mesa con un área de trabajo de 3000 x 1500 milímetros para el soporte de planchas de acero al carbono con un espesor máximo de 25 milímetros.
- Realizar el diseño del sistema de transmisión del sistema CNC para una adecuada interacción de los tres grados de libertad de la mesa.
- Implementar la tecnología IOT para visualizar de forma remota el consumo energético y la estimación de costos.
- Realizar pruebas de funcionamiento y dimensionales del sistema CNC para el corte por arco de plasma de planchas de acero al carbono.

## **Capítulo II**

### **Fundamentación teórica**

#### **Corte por arco de plasma**

Conocido como PAC, del inglés plasma arc cutting, el corte por arco de plasma es una técnica de corte que consiste en la fundición de un área localizada de una pieza de trabajo mediante un arco constreñido.

Según (Cary, 1992) el corte por arco de plasma es “un proceso que usa arco restringido y elimina metal fundido con una boquilla de expulsión de alta velocidad de gas ionizado el cual sale del orificio restringido” p.300.

El plasma es el cuarto estado de la materia donde hay la aglomeración de iones positivos y electrones libres, consecuentemente, átomos neutros. Este fenómeno ocurre cuando un gas es calentado a temperaturas elevadas lo que provoca que los electrones escapen de su órbita en el átomo produciendo un conductor eléctrico de tipo gaseoso altamente denso en energía.

El arco eléctrico se conoce como la transferencia o flujo de electrones en un medio gaseoso o vacío. En un proceso de corte por arco de plasma, la fuente es la encargada de producir artificialmente el plasma para lo cual el arco eléctrico se constriñe cuando pasa por un orificio en el electrodo, el gas del proceso atraviesa dicho arco y se calienta de forma instantánea, se expande y gana velocidad al pasar por el orificio de construcción en dirección de la pieza de trabajo.

El corte por arco de plasma es aplicable a casi todos los metales, de manera especial el acero estructural, acero inoxidable y material metálico no ferroso. La temperatura a la que se



encuentra el plasma es de aproximadamente 20 000 grados centígrados lo que provoca la evaporación instantánea del material metálico o la pieza de trabajo.

### ***Ventajas del corte por arco de plasma***

- Una de las principales ventajas de este proceso de corte es su baja afectación por calor que sufre la pieza de trabajo, esto reduce al mínimo la deformación que pudiera tomar la pieza al ser cortada.
- La alta densidad energética del plasma permite la perforación en metal sin la necesidad de precalentar la pieza de trabajo.
- El gas que alimenta el plasma puede ser de cualquier tipo siempre y cuando no dañe al electrodo. El gas más común empleado en este proceso es el aire comprimido, resultando además muy económico frente a otros procesos como el oxicorte que requieren oxígeno para alimentar la flama.
- Permite realizar cortes a altas velocidades de avance haciendo a este proceso idóneo para ser implementado sobre una mesa de control numérico computarizado.
- Si son calibrados correctamente los parámetros, el corte por plasma realiza cortes de alta calidad con un acabado fino.
- Dependiendo de la capacidad del equipo de plasma, se pueden realizar cortes en planchas que van desde los 0,5 milímetros de espesor hasta planchas de 160 milímetros.

### ***Desventajas del corte por arco de plasma***

- El costo del equipo o fuente de plasma suele ser mucho más elevado que un

equipo de oxicorte.

- La limitación de espesor de corte. El corte por plasma no supera la capacidad del oxicorte, mismo que puede cortar hasta espesores de 12 pulgadas.
- El lugar o campo de trabajo donde se requiera realizar cortes debe disponer de tomas de electricidad ya que el equipo fuente de plasma lo requiere para funcionar.

### ***Parámetros de entrada***

La calidad de corte en la pieza de trabajo depende directamente de los parámetros detallados a continuación.

#### **Espesor del material**

Es el parámetro de partida del proceso, pues de él dependerá la calibración del resto de parámetros. Para cada espesor se recomienda destinar un valor específico de parámetros.

#### **Corriente**

Este parámetro depende de la fuente o equipo de plasma. Hay equipos que pueden proveer desde los 30 amperios hasta equipos de centros de mecanizados que proporcionan corrientes superiores a los 1000 amperios. Es importante destacar que mientras mayor sea la corriente mayor es el espesor que se puede cortar con este proceso. La corriente está relacionado con el espesor de corte y la velocidad de avance:

- Mayor corriente permite mayor espesor de corte, pero la velocidad de avance debe ser menor.
- Menor corriente corte menor espesor, pero la velocidad de avance debe ser mayor.

### **Distancia de separación entre la antorcha y la pieza de trabajo**

Es la separación que existe entre la pieza de trabajo y la punta de la antorcha. Mientras mayor sea esa distancia el arco disminuye reduciendo su potencia. Si dicha distancia es menor puede existir contacto entre el material y la punta y fundirse dañando así el consumible o punta.

### **Velocidad de avance**

Se refiere a la velocidad a la que avanza la antorcha de corte respecto a la pieza de trabajo. Este parámetro está en íntima relación con la corriente y el espesor del material. Sin embargo, los fabricantes de equipo o fuentes de plasma proporcionan las velocidades recomendadas para cada espesor.

### ***Parámetro de salida***

#### **Calidad de corte**

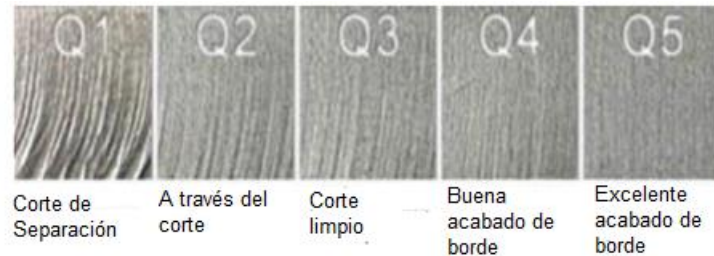
La calidad en el acabado de un corte realizado con tecnología plasma se clasifica en una escala de 5 niveles que van desde el Q1 hasta el Q5.

El tipo de calidad que se desee lograr depende de los parámetros de entrada y los requisitos del acabado del borde.

Si el objetivo es únicamente separación de material, el acabado que se obtiene es un Q1 donde se realiza un corte rápido. Si se quiere lograr cortes con tolerancias estrictas y buen acabado, la calidad varía entre Q2 y Q5. En la figura 18 se muestran 5 fotografías con las distintas calidades de acabados.

## Figura 18

*Calidad en el acabado de corte por plasma*



*Nota.* Adaptado de (Gómez & Alberco, 2019)

### **Sistemas de inhibición de gases productos del corte**

El corte por arco de plasma da como resultado una producción significativa de gases contaminantes para el medio ambiente. Actualmente en la industria se tiene dos sistemas de inhibición de estos gases mediante aspiración y agua.

A continuación, se detallan cada uno de los sistemas:

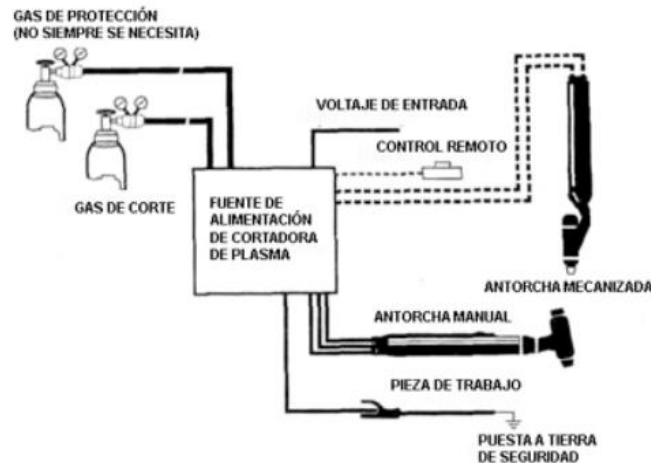
- **Sistema de inhibición mediante aspiración:** Este método consiste en un sistema de extracción de gases mediante aspiración. El sistema es colocado bajo la mesa para aspirar y desechar los gases hacia el exterior pasando por un filtro de aire. Las mesas CNC que cuentan con este sistema se conocen como mesas secas.
- **Sistema de inhibición mediante agua:** Este sistema emplea agua para reducir los gases. El agua es contenida en un recipiente a lo largo y ancho de la mesa, bajo las rejillas del área de trabajo, lo que facilita que los gases, polvos y sólidos que son expulsados durante el corte sean dirigidos hacia el agua. Las mesas CNC que emplean este sistema se conocen como mesas de agua o mesa con cama de agua.

## Cortadora de plasma

En la figura 19 se muestra un esquema de una cortadora básica de plasma.

### Figura 19

*Esquema básico de una cortadora de plasma*



*Nota.* Adaptado de (Cortadoras plasma, 2021)

Este equipo consta de las siguientes partes:

- Fuente de alimentación: Es un equipo alimentado por energía eléctrica que tiene un generador de frecuencia alta que transforma la tensión de corriente alterna en tensión de corriente continua de tipo constante cuyo valor se encuentra entre 200 y 400 V.
- Antorcha manual/mecanizada: Proporciona la alineación necesaria a los consumibles, así como su refrigeración. Toda antorcha está compuesta principalmente por el electrodo, la boquilla y el anillo de turbulencia. La antorcha se conecta con la fuente mediante un sistema de cables que conducen la

energía y una manguera para el gas.

- Pinza de tierra: es una pinza cargada positivamente que se conecta a la pieza de trabajo para que el circuito se cierre.
- Gas de corte: es el gas que se emplea para formar el plasma. Es importante mencionar que toda cortadora de plasma requiere de un gas externo. La mayoría de máquinas cortadoras emplean aire comprimido, mismo que puede ser proporcionado por un compresor de aire.

Comercialmente existe una gran variedad de fabricantes de cortadoras de plasma. A continuación, se detallan algunas marcas y modelos disponibles en el mercado nacional.

### ***HYPERTHERM POWERMAX 85***

Es un equipo de la marca americana Hypertherm, capaz de proporcionar 85 amperios para la realización de cortes limpios de 25 milímetros de espesor. En la figura 20 se muestra el equipo en cuestión.

#### **Figura 20**

*Hypertherm Powermax 85*



*Nota.* Adaptado de (Hypertherm, 2022)

En la tabla 2 se especifican sus principales características técnicas.

**Tabla 2**

*Especificaciones técnicas de la Hypertherm Powermax 85*

<b>Especificaciones</b>	<b>Valor</b>
<b>Tensión de entrada</b>	200-480 V, 1 fase, 50/60 Hz
<b>Corriente de entrada</b>	70-29 A, 1 fase
<b>Corriente de salida</b>	25-85A 143 VDC
<b>Ciclo de trabajo</b>	60% a 85A / 100% a 66A
<b>Alimentación de gas</b>	Aire sin aceite, nitrógeno
<b>Presión y rango de flujo de entrada de gas</b>	189 l/min a 86 PSI
<b>Corte recomendado</b>	25 mm
<b>Corte máximo</b>	38 mm
<b>Perforación</b>	20 mm

*Nota.* Permite conocer las especificaciones técnicas de la cortadora Hypertherm Powermax 85

### **VICTOR CUTMASTER 82**

Es un equipo versátil, pequeño y potente que proporciona 72 amperios lo que permite la realización de cortes ideales de 20 milímetros y cortes máximos de 40 milímetros. En la figura 21 se muestra el equipo.

## Figura 21

*Victor Cutmaster 82*



*Nota.* Adaptado de (ESAB, 2022)

En la tabla 3 se detallan sus características técnicas.

**Tabla 3**

*Especificaciones técnicas de Victor Cutmaster 82*

<b>Especificaciones</b>	<b>Valor</b>
<b>Tensión de entrada</b>	208-480 V, 3 fases, 50/60 Hz
<b>Corriente de entrada</b>	72A-39A, 3 fases
<b>Corriente de salida</b>	25-85 A
<b>Tensión de salida nominal</b>	143 VDC
<b>Ciclo de trabajo</b>	60% a 85A / 100% a 66A
<b>Alimentación de gas</b>	Aire sin aceite, nitrógeno
<b>Presión y rango de flujo de entrada de gas</b>	190 l/min a 70 PSI
<b>Corte recomendado</b>	20 mm
<b>Corte máximo</b>	40 mm
<b>Perforación</b>	15 mm

*Nota.* Permite conocer las especificaciones técnicas de la cortadora Victor Cutmaster 82



### ***EVERLAST POWERPLASMA 82i***

Es un equipo altamente sofisticado cuya corriente máxima de salida es 80 amperios, lo que permite realizar cortes limpios de 25 milímetros y cortes máximos de 36 milímetros.

En la figura 22 se muestra el equipo

#### **Figura 22**

*Everlast Powerplasma 82i*



*Nota.* Adaptado de (Everlast Generators, 2022)

Entre las principales características de este equipo se tiene:

- Manómetro digital incorporado para la regulación de presión aire con precisión.
- Control ajustable de flujo posterior para regular el tiempo del post flujo de aire.
- Maximiza la vida útil de los consumibles mediante un selector digital que permite elegir el modo de operación, ya sea con encendido manual o re encendido automático.
- Capacidad CNC integrada para conectar el equipo a cualquier mesa de control numérico computarizado. Para el efecto, el equipo cuenta con su propia antorcha mecanizada.

En la tabla 4 se muestran las especificaciones técnicas del equipo de Everlast.

**Tabla 4**

*Especificaciones técnicas de la Everlast Powerplasma 82i*

<b>Especificaciones</b>	<b>Valor</b>
<b>Tensión de entrada</b>	220/240V, 1 fase, 50/60 Hz
<b>Corriente de entrada</b>	58-45.2 A
<b>Corriente de salida</b>	20-80A
<b>Tensión de salida nominal</b>	88-112 VDC
<b>Ciclo de trabajo</b>	60% a 80A / 100% a 63A
<b>Alimentación de gas</b>	Aire sin aceite, nitrógeno
<b>Presión y rango de flujo de entrada de gas</b>	198 l/min a 90 PSI
<b>Corte recomendado</b>	25 mm
<b>Corte máximo</b>	37 mm
<b>Perforación</b>	15 mm

*Nota.* Permite conocer las especificaciones técnicas de la cortadora Everlast Powerplasma 82i.

### **Control numérico computarizado**

Según (Ruíz, 2006) CNC hace referencia “al control numérico de máquinas, generalmente este tipo de control se lo realiza a través de un computador y la máquina está diseñada a fin de obedecer las instrucciones de un programa dado” (pp.3)

En la actualidad existe una gran expectativa por los rápidos cambios que se puede observar en la tecnología, muchas veces asimilar los cambios o actualizaciones no es tan sencillo por eso no se lo puede sacar su mejor provecho. Dentro de los cambios más importantes en la automatización están las máquinas de herramientas de Control Numérico Computarizado que ayudan con muchas ventajas adicionales para el desarrollo industrial.

Las ventajas que posee una máquina CNC en comparación a otras son las siguientes: una mayor calidad y precisión de los productos, facilidad para que una operación pueda manejar algunas máquinas al mismo tiempo, permiten cambios en el diseño en los modelos en un corto tiempo, a su vez brinda una mayor seguridad a operario, además permite una simulación del proceso con la finalidad de verificar que todo esté correcto. Pero a su vez estas máquinas tienen algunas desventajas como lo son: un alto costo, se necesita un conocimiento de programación para la selección de herramientas de corte y su secuencia en el proceso para lograr una rentabilidad de la máquina se necesita que el volumen de producción en la empresa sea alto para lograr una mayor eficiencia. En la tabla 5 se observa las diferencias entre un sistema convencional o una máquina CNC.

**Tabla 5**

*Comparación de una máquina convencional o una máquina CNC*

<b>Convencional</b>	<b>Maquina CNC</b>
Se opera por una sola persona	Existen trabajos que es imposible realizar.
Es necesario localizar por las Plano.	No es necesario localizar medidas para el dimensionamiento en dimensiones.
Es necesario la experiencia	No es necesario la experiencia.
El operador tiene el control de profundidad, avance, etc.	El programa tiene todo el Control de los parámetros de corte
Existen trabajos que es imposible realizar.	Luego que se ejecuta el Programa virtualmente se realiza cualquier trabajo

*Nota.* Permite conocer las diferencias entre las dos máquinas.

Por la mayor flexibilidad que permiten o brindan las máquinas de control numérico computarizado como el ejemplo de la figura 23, se ha empleado este control en distintas aplicaciones como lo pueden ser:

- Tornos CNC
- Fresadoras CNC
- Corte por plasma
- Máquinas de corte por hilo, etc.

### **Figura 23**

*Torno CNC*

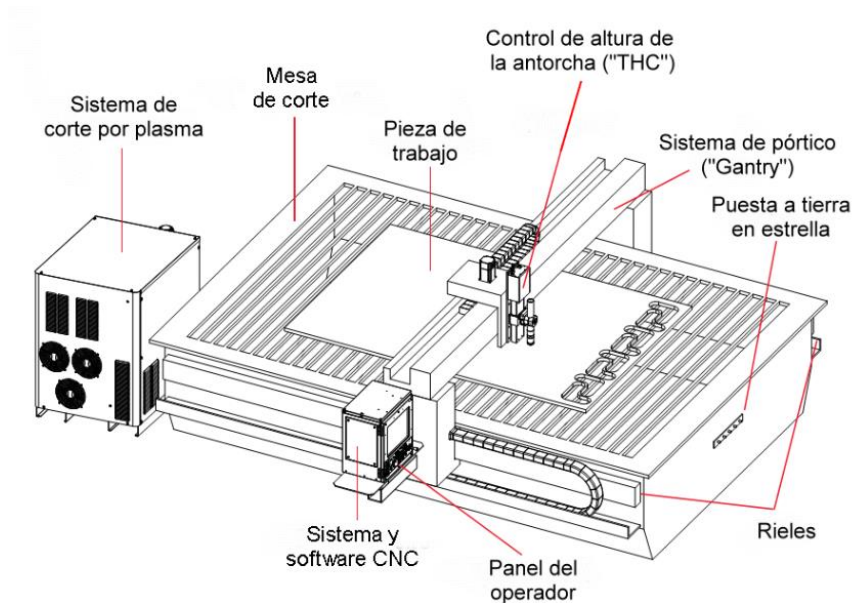


*Nota. Adaptado de (Valencia, 2015)*

### **Mesa CNC para corte de plasma**

Es una mesa estacionaria de 3 o 4 ejes para el corte mecanizado de piezas metálicas conocidas como piezas de trabajo. Emplea plasma para la realización del corte.

En la figura 24 se muestra un esquema básico de una mesa CNC.

**Figura 24***Esquema de una mesa CNC*

*Nota.* Adaptado de (De Máquinas y Herramientas, 2015)

Una mesa CNC tiene tres ejes principales:

- Eje Z: Es el eje perpendicular de la mesa y el encargado de subir o bajar la antorcha de mecanizado.
- Eje X: Es el eje transversal de la mesa. Sobre éste es instalado el eje Z.
- Eje Y: Es el eje longitudinal de la mesa y que da soporte al eje X.

### ***Partes o componentes de una mesa para corte de plasma***

Toda mesa CNC para el corte por arco de plasma tiene los siguientes componentes:

- **Sistema de corte por plasma:** Consiste en el equipo o fuente que produce el plasma.

- **Mesa de corte:** Es la mesa donde se asienta la pieza de trabajo para el corte. Esta mesa está construida con un bastidor resistente capaz de soportar el peso de las planchas de acero y los mecanismos que mueven a los tres ejes X, Y y Z. Para la construcción de la mesa se suelen emplear perfiles estructurales.
- **Sistema y software CNC:** Es el encargado de poner en funcionamiento a la mesa, es decir, el software recibe como dato de entrada el diseño o dibujo que el operador requiera, dichas instrucciones son enviadas al controlador CNC, mismo que las interpreta y acciona los motores de los ejes, así como la fuente de plasma.
- **Panel de operador:** Es la interfaz humano-máquina donde el operador interactúa con la mesa.
- **Pórtico:** Es la viga que forma el eje X, donde se soporta el eje Z y demás componentes como la antorcha de mecanizado, cableado de potencia y control, entre otros.
- **Rieles:** Son los componentes sobre los cuales se deslizan los ejes. Éstos deben ejercer la menor fricción posible para garantizar la precisión en el trabajo y no forzar a los motores.
- **Control de altura THC:** Es un sistema que manipula al eje Z de tal forma que mueve a la antorcha para mantener siempre constante la distancia entre la pieza de trabajo y la antorcha.

Tanto en el mercado nacional como internacional existe gran variedad de fabricantes de mesas CNC para corte por plasma. Un ejemplo de aquello es la empresa MEDUSA. En la figura 25 se muestra una mesa CNC.

**Figura 25***Mesa CNC Medusa Practicut 4x8*

*Nota.* Adaptado de (Aeromaquinados, 2022)

En la tabla 6 se muestran las especificaciones técnicas.

**Tabla 6***Especificaciones técnicas de la Medusa Practicut 4x8*

<b>Especificaciones</b>	<b>Valor</b>
<b>Modo de corte</b>	Plasma
<b>Área de trabajo</b>	1220x2440 mm
<b>Tensión de entrada</b>	220 VAC
<b>Corriente de entrada</b>	1A
<b>Programa</b>	FAST CAM
<b>Fuente de plasma</b>	Hypertherm Powermax 105
<b>Velocidad máxima</b>	6000 mm/min
<b>Softwares compatibles</b>	Autocad, Tekla, Solidworks

<b>Precisión</b>	0.2 mm
<b>Tipo de gas</b>	aire comprimido

*Nota.* Permite conocer las especificaciones técnicas de la Medusa Practicut 4x8

### **Sistemas de transmisión para mesas CNC**

Para el movimiento del cabezal de corte se obtiene por la combinación de desplazamientos de cada uno de los ejes principales, en eso intervienen los sistemas de transmisión que producen las traslaciones rectilíneas en los ejes principales a través del giro de un motor. (Ruíz P. , 2011)

Existen algunos tipos de sistemas de transmisión como lo son:

- Piñón-cremallera
- Husillo
- Transmisión por cadena
- Transmisión por correa

#### ***Sistema de correas***

El sistema de poleas con correa, se puede observar en la figura 26, tiene dos poleas que giran al mismo tiempo por la acción de una correa dentada, dicha correa se encuentra sometida a esfuerzos en dos puntos de agarre, por lo general están fabricadas de caucho y son reforzadas mediante hilos internos.



## Figura 26

*Sistema de correas*



*Nota.* Adaptado de (Maji, 2018)

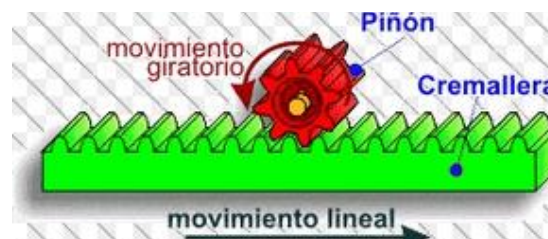
## **Sistema piñón - cremallera**

El sistema que se encuentra conformado por un piñón (rueda dentada) que tiene un movimiento de rotación y la cremallera que es un elemento lineal dentado el cual su movimiento es rectilíneo. Como se puede observar en la figura 27.

El mecanismo piñón-cremallera permite transformar el movimiento de rotación del piñón en el rectilíneo de la cremallera o viceversa. El funcionamiento es parecido al de un engranaje simple, por tanto, la cremallera y el piñón deben tener el mismo paso y el mismo módulo.

## Figura 27

*Piñón-cremallera*



*Nota.* Adaptado de (Blog SEAS, 2019)

### **Sistema de husillo**

El sistema de un husillo consiste en un mecanismo que se fundamenta en un tornillo sinfín y que se usa generalmente para la transformación de un movimiento rotacional en uno rectilíneo.

El husillo es un tornillo sin cabeza como se verifica en la figura 28, largo en relación a su diámetro, que en combinación con una tuerca convierte un movimiento giratorio en uno longitudinal, dando lugar al denominado sistema tornillo-tuerca. Se trata de un mecanismo muy empleado para movimientos precisos y grandes esfuerzos, muy común en tornos, fresadoras, prensas, etc. (Birh LH, 2020)

### **Figura 28**

*Sistema de transmisión por husillo*



*Nota.* Adaptado de (Birh LH, 2020)

### **Controladores para sistemas CNC**

Es una tarjeta electrónica que interpreta las instrucciones de un programa en forma secuencial y activa las funciones de la máquina para que realice determinada acción como el

movimiento de los motores de cada uno de los ejes, lectura de variables a través de los sensores, accionamiento del actuador del mecanizado. Todo controlador tiene numerosos pines de entradas y salidas, depende del número de ejes de la máquina.

Comercialmente existen muchos fabricantes, a continuación, se detallan algunos de ellos.

### ***CNC NVEM Ethernet de Novusun***

Es un controlador que cuenta con 10 canales programables de salida y 12 canales programables de entrada. La particularidad de este controlador es la interfaz ethernet para la comunicación tarjeta-software (computador), lo que permite una velocidad alta en la transmisión de datos. En la figura 29 se puede observar la tarjeta en mención.

#### **Figura 29**

##### *CNC NVEM Ethernet*



*Nota.* Adaptado de (NVEM, 2021)

Esta tarjeta es compatible con el software Mach3 y puede ser aplicable a varias operaciones de mecanizado como router, fresadora, torno, corte por plasma.

### ***MACH3 5 Axis CNC***

Es una tarjeta de control CNC para la conexión de 5 ejes y compatible con el software Mach3. Puede ser empleado para operaciones como el fresado, taladrado, corte por plasma.

La comunicación con el ordenador es mediante puerto paralelo. En la figura 30 se muestra esta tarjeta.

#### **Figura 30**

*Mach3 CNC*



Nota. Adaptado de (eBay, 2022)

### ***MyPlasmCNC de Proma Interface***

Es una tarjeta controladora exclusiva para sistemas de corte por arco de plasma. Es así que puede controlar un máximo de 4 motores correspondientes a los ejes Z, X, Y e Y auxiliar.

Además, cuenta con entradas para el homing del sistema CNC, detección de material y sistema anticolidión de la antorcha. En la figura 31 se muestra la tarjeta MyPlasmCNC.



La tarjeta además cuenta con su propio software donde se puede operar a la máquina CNC de forma manual y automática. Una particularidad de este sistema es la posibilidad de conectar un gamepad o joystick para controlar a la mesa CNC de forma manual e inalámbrica. Esto optimiza tiempo y favorece las operaciones de corte cuando la figura a realizar sea sencilla.

### ***Control de Altura THC***

Es un controlador que mantiene constante la distancia entre la boquilla de la antorcha y la pieza de trabajo durante una operación de corte. Éste es un aspecto muy importante ya que cuando una pieza es cortada sufre deformación en forma de ondulación debido al calor del plasma.

Este controlador funciona bajo dos principios: la supervisión y la tensión de arco.

La tensión de arco es la tensión de salida de una fuente plasma, mismo que varía en función de la distancia entre el cátodo y el ánodo, dándose a interpretar como cátodo el electrodo de la antorcha y como ánodo a la pieza de trabajo. Dicha tensión se encuentra entre 100 y 200 VDC.

La forma en que la distancia influye en la tensión de arco se debe a la resistencia en el arco, como la resistencia es directamente proporcional a la tensión de acuerdo a la ley de Ohm, se concluye que a mayor distancia, mayor resistencia y consecuentemente mayor tensión. Sucede lo mismo si dichos valores disminuyen.

El THC, como todo controlador electrónico, obedece a valores establecidos como setpoint, siendo éstos la tensión de arco y la altura de corte.

### **Funcionamiento de un THC**

El operador u operario de la máquina setea los valores de tensión de arco y distancia de separación deseados a través de la HMI del THC.

Se realiza el corte y el THC recibe como señal de entrada la tensión de arco del corte procedente de la antorcha de la cortadora de plasma, lo interpreta mediante la consola de control y envía señales de salida hacia el posicionador motorizado. Este posicionador es un mecanismo de desplazamiento que mueve la antorcha hacia arriba o hacia abajo en función de la distancia de separación. Esto garantiza que la distancia de separación sea, en todo momento, la misma durante la operación de corte.

### **Actuadores de un sistema CNC**

Dentro de los componentes de una máquina CNC, uno de los fundamentales es el elemento que proporciona el movimiento de los ejes para el funcionamiento de la máquina. Para la selección del actuador depende del tipo de control si se realiza un bucle abierto el actuador más usado y recomendado es el motor paso a paso como se puede ver en la figura 32.

#### **Figura 32**

*Motor paso a paso Nema 23*



*Nota. Adaptado del catálogo de Amazon*

Consiste en un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa es que es capaz de avanzar una serie de grados dependiendo de sus entradas de control. Un motor paso a paso posee una cantidad finita de posiciones a las que puede moverse y no tiene una realimentación de la información al controlador. (De Máquinas y Herramientas, 2015)

Por otro lado, cuando el control se lo realiza con un bucle cerrado lo más usado y recomendado son los actuadores tipo servomotor con su controlador como se puede ver en la figura 33.

### **Figura 33**

*Servomotor y controlador*



*Nota.* Adaptado de (De Máquinas y Herramientas, 2015)

Un servomotor generalmente se trata de un motor básico de corriente alterna o continua, con o sin escobillas, provisto de un codificador o “encoder” que es un sensor de giro. Lo cual utiliza dicho sensor para obtener la información y monitorear constantemente la posición exacta de la herramienta de corte, puede desplazarse por una cantidad infinita de posiciones dentro de su rango de movimiento y tiene una retroalimentación para brindar información al controlador para conocer su posición.



## Sensores para un sistema CNC

Los sensores empleados en un sistema mesa CNC pueden finales de carrera que a su vez se clasifican en:

- Inductivos
- Capacitivos
- Mecánicos

### ***Sensores inductivos***

Estos sensores son aquellos que permiten detectar algún elemento que se aproxime a la necesidad u obligación de existir un contacto físico, se puede emplear en materiales ferrosos los cuales se encuentran compuestos por hierro. Su aplicación puede ser muy grande desde una línea de ensamble o incluso utilizado en robots. Se puede observar en la figura 34.

### **Figura 34**

*Sensores inductivos*



*Nota.* Adaptado de (Cimech3D, 2022)

### **Sensores capacitivos**

Los sensores capacitivos son elementos que producen o generan un campo electrostático que a su diferencia de los inductivos producen un campo electromagnético, con lo cual con dicha diferencia permite que los sensores capacitivos puedan identificar o detectar elementos metálicos y a su vez no metálicos como lo puede ser vidrio, papel u otros. Un sensor capacitivo es el presentado en la figura 35.

#### **Figura 35**

*Sensor Capacitivo*



*Nota.* Adaptado de (Sensores.top, 2019)

#### **Final de carrera**

Estos sensores son denominados sensores de contacto, ya que son elementos electromecánicos ya que para ponerse en funcionamiento necesitan del contacto de un objeto o elemento móvil sobre el fin de carrera, por lo general se emplea para detectar la posición exacta de un elemento que se desplaza dentro de una trayectoria fija. Se puede ver en la figura 36.

**Figura 36**

*Final de carrera*



*Nota.* Adaptado de (OTECE, 2022)

**Tecnología IoT**

El internet de las cosas o Internet of Things (IoT), es una cuestión que ha tomado mucha importancia en los últimos años y es una tecnología más innovadora de la actualidad, donde se le asigna la capacidad a cualquier artefacto o equipo de conectarse a una red inalámbrica para poder ser controlado por otro dispositivo móvil. (Mendieta, 2019)

Muchas veces la tecnología de IoT se encuentra en diferentes proyectos, los cuales están incluidos en las labores cotidianas de la sociedad o del hogar, pero se busca que estén enfocados en automatización de procesos en las industrias. Algunos ejemplos de IoT según (Mendieta, 2019) puede ser “regular de manera automática la temperatura en un lugar donde se preservan productos, con el fin de favorecer el mantenimiento de los mismos, conocer cuándo es necesario realizar la revisión a maquinaria, administrar de manera ágil los inventarios, etc”. (pp. 15)

## ***Componentes para IoT***

Una gran cantidad de equipos y dispositivos que pueden ser parte de una red IoT, incluso muchos ya contienen una interfaz de usuario, pero lo primordial son los dispositivos que incluyen ya sea sensores, actuadores o puede darse una combinación de los dos.

## ***Plataformas de IoT***

Una vez recopilada la información a través de los sensores del IoT, se deben analizar los datos. Porque esos números no tienen ningún valor. Sin embargo, cuando se hace un análisis de esos datos brinda información correcta que nos permitirá tomar acciones según lo obtenido. Existen muchas plataformas y herramientas que nos permiten el análisis, procesamiento y presentación de los datos muchas de estas plataformas son gratuitas.

- **Arduino**

Ofrece una combinación adecuada de software y hardware de IoT, Arduino es una plataforma de IoT fácil de usar. Se puede emplear mediante una serie de especificaciones de hardware que se pueden dar a la electrónica. El software de Arduino viene en el plan del lenguaje de programación Arduino y el entorno de desarrollo integrado (IDE).

- **Node-Red**

Nodo-RED es una herramienta visual para presentar el Internet de las cosas, es decir, conectar dispositivos de hardware, API y servicios en línea de nuevas formas. Construido sobre Node.js, Node-RED es "un medio visual para conectar el Internet de las cosas".

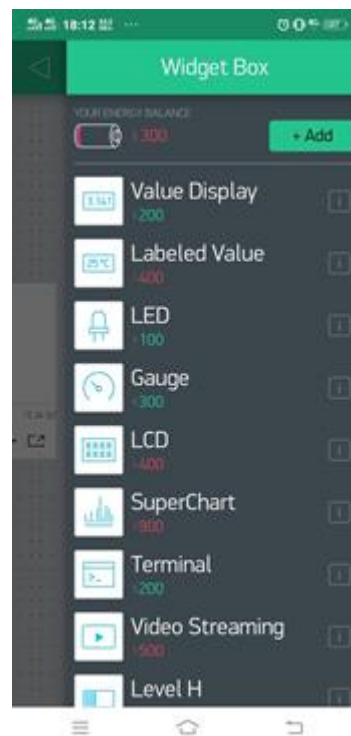
- **Bylink**

Blynk es una plataforma de IoT independiente del hardware y basada en la nube que permite a los usuarios conectar más de 400 modelos de hardware con la nube Blynk. Un

ejemplo de la plataforma se puede observar en la figura 37. Se pueden crear aplicaciones nativas de IoT para Android y iOS usando una selección de widgets prediseñados para el control de datos de sensores, actuadores, recibir notificaciones y más. Los módulos de aplicaciones prediseñados permiten a los usuarios crear prototipos y probar e implementar rápidamente sus aplicaciones sin necesidad de contar con un equipo de diseño o ingeniería, con un simple dispositivo móvil se puede emplear esta aplicación para el funcionamiento de IoT

### Figura 37

*Plataforma Bylink*



*Nota.* Plataforma Bylink que nos permite una serie de monitoreo desde una aplicación de un dispositivo móvil.

## Capítulo III

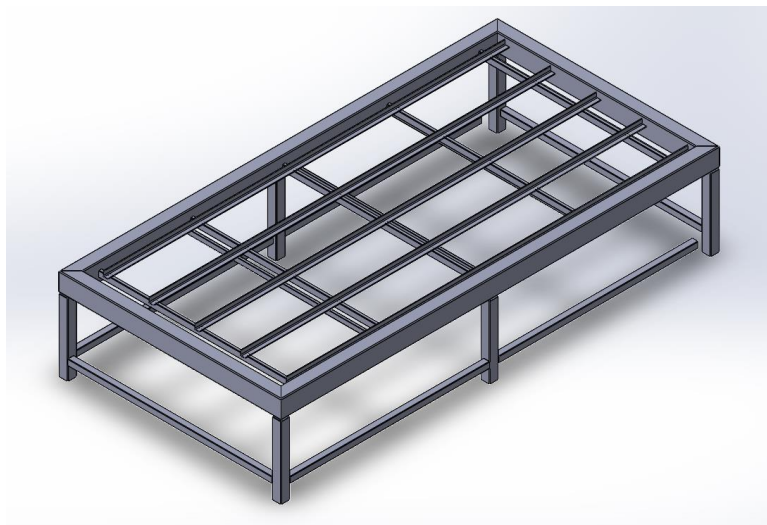
### Diseño

#### Diseño del bastidor de la mesa

Considerando los parámetros y alcance del proyecto a desarrollar se plantea una alternativa de solución en el software CAD el cual brindará una mejor visualización de la alternativa a desarrollar la cual cumplirá con las dimensiones del área de trabajo y del espesor máximo a cortar el cual será de planchas de acero al carbono de 25 mm.

#### Figura 38

*Alternativa de solución*

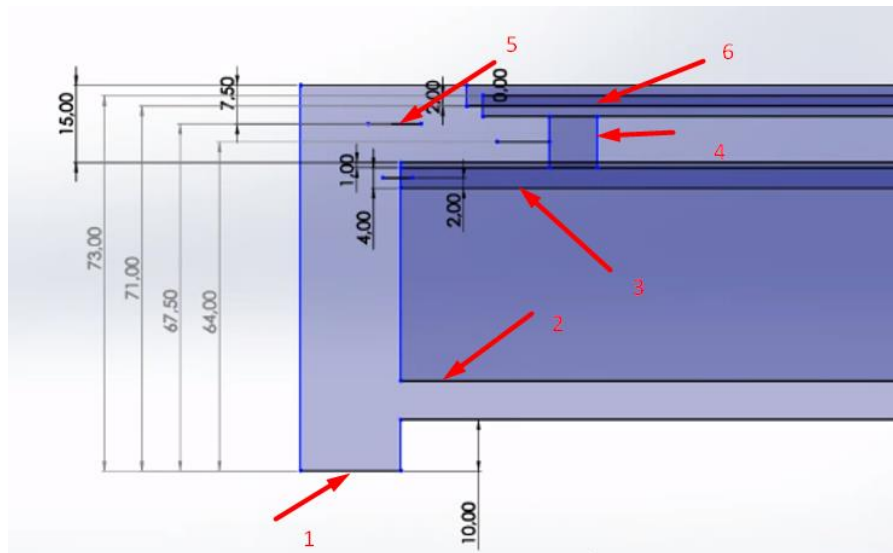


*Nota.* Alternativa de solución del bastidor de la mesa CNC elaborada en software CAD.

Tomando en cuenta la dimensiones de la alternativa desarrollada en el software CAD la cual se puede observar en la figura 38 se realizará la simulación con la aplicación de cargas vivas y muertas en el software de análisis estructural.

### Figura 39

Alturas para la malla de software de análisis estructural

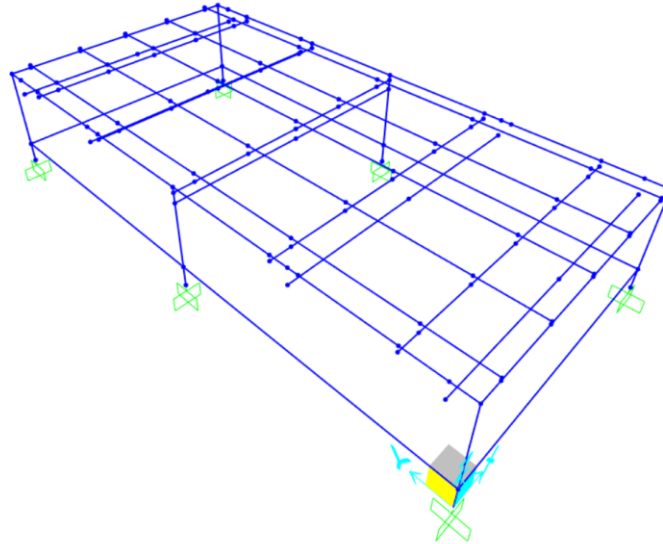


*Nota.* Alturas de las líneas neutras de los elementos para el diseño en el software de análisis estructural.

En la figura 39 se puede ver los indicadores numéricos que representan: 1 al nivel del piso, 2 vigas de refuerzo para las patas, 3 ángulos para soporte de la cama de agua, 4 viga de soporte de la rejilla, 5 marco de la mesa y 6 vigueta de la rejilla. De igual manera se considera la distancia entre elementos para elaborar la malla en los ejes X y Y.

**Figura 40**

*Bastidor de la mesa CNC en software de análisis estructural*



*Nota.* Bastidor dibujado con ángulos y perfiles rectangulares en software de análisis estructural.

Realizado el mallado y dibujo del bastidor que se puede observar en la figura 40 se necesita calcular y aplicar las cargas a la que somete la mesa las cuales serán: el peso de la plancha de acero, la cama de agua, el peso de las platinas, la carga de todo el puente sobre el bastidor y los elementos como cremallera, bandeja de la cadena de arrastre, carga de las guías y los cables, cabe mencionar que muchas cargas pueden ser cargas vivas o muertas, o cargas puntuales o distribuidas.

A continuación, se especificará el valor cada una de las carga y tipo para poder ser aplicada en la simulación del software.



**Carga de la plancha de acero**

Considerando que los ángulos se encontraran sobre las vigas principales se puede considerar que la distribución de la carga se realizará en una sola dirección.

$$m_p = \rho * V \quad (1)$$

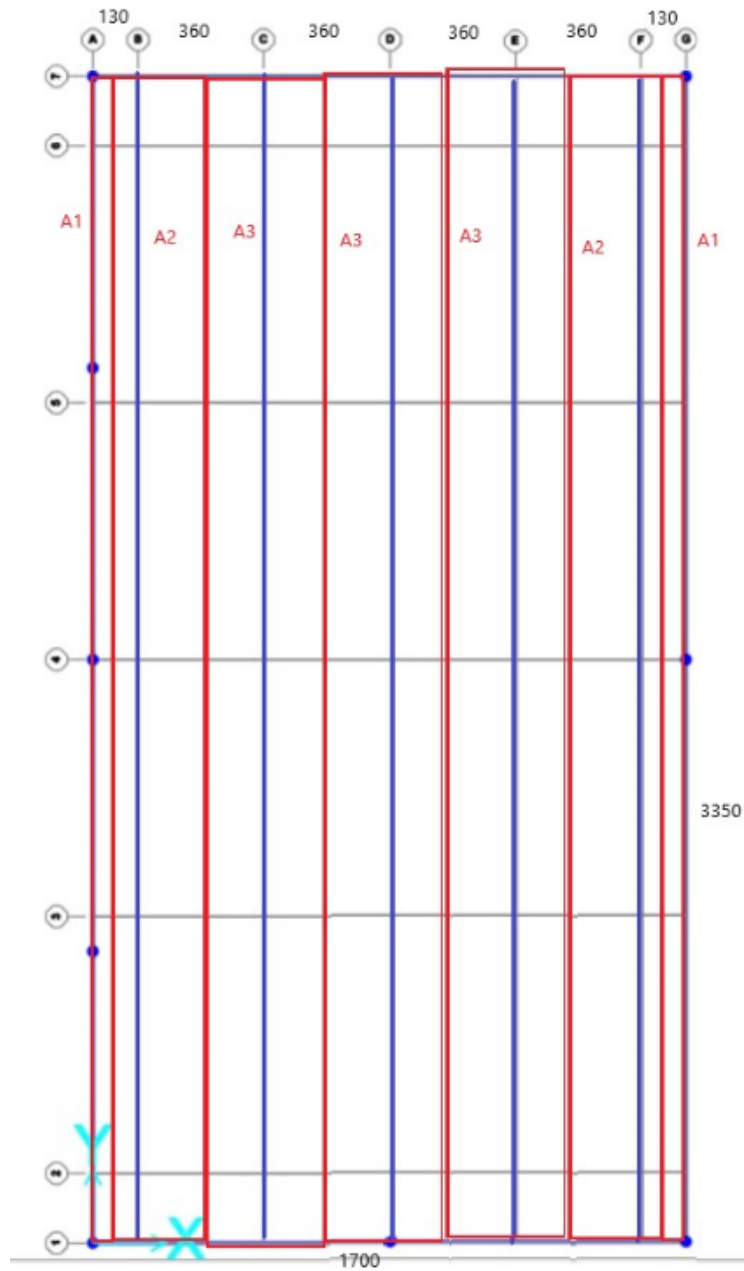
Donde m es la masa de plancha de acero [Kg],  $\rho$  es la densidad del acero [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ] y V el volumen de la plancha de acero [ $\text{m}^3$ ].

$$m_p = \rho * V = 7850 * (3 * 1.5 * 0.0025) = 883.125 \text{ [Kg]}$$

Se aplicará el criterio de áreas tributarias para conocer el valor de la carga en cada uno de los ángulos (vigas secundarias) que soportan a la rejilla y a plancha de acero y que a su vez serán soportados por las vigas principales. La sección de áreas tributarias para la carga de la plancha de acero se observa en la figura 41.

**Figura 41**

Áreas correspondientes a las vigas secundarias



*Nota.* Se tiene tres tipos de áreas porque la diferencia entre separaciones en los elementos.

Se verifica la relación aspecto donde según (Williams, 2011) si el valor es mayor o igual a 2 la carga trabaja en una sola dirección caso contrario si es menor la carga trabaja en dos direcciones.

$$\frac{a}{b} \quad (2)$$

Donde a es el lado mayor [mm] y b es el lado menor [mm].

En este caso se tiene tres áreas la cual se verificará en cada una la relación de aspecto, donde el lado mayor es constante en las áreas y el lado menor es variable en cada una.

$$a = 3450 \text{ [mm]}$$

$$b_1 = 65 \text{ [mm]}$$

$$b_2 = 245 \text{ [mm]}$$

$$b_3 = 360 \text{ [mm]}$$

$$\frac{a}{b_1} = \frac{3450}{65} = 53.077$$

$$\frac{a}{b_2} = \frac{3450}{245} = 14.082$$

$$\frac{a}{b_3} = \frac{3450}{360} = 9.583$$

En los tres casos de áreas la relación de aspecto es mayor que 2 lo que significa que la carga trabaja en una sola dirección. A continuación, se calcularán las áreas y el área de trabajo con la transformación de unidades a metros de cada componente.

$$A_1 = a * b_1 = 0.224 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_2 = a * b_2 = 0.845 [m^2]$$

$$A_3 = a * b_3 = 1.242 [m^2]$$

$$A_t = 3.25 * 1.6 = 5.2 [m^2]$$

La carga de la plancha está representada por la siguiente ecuación:

$$Cp = \frac{m_p}{A_t} \quad (3)$$

Donde Cp es la carga de la plancha [Kg/m<sup>2</sup>], m<sub>p</sub> es la masa de la plancha [Kg], A<sub>t</sub> es el área de trabajo [m<sup>2</sup>].

$$Cp = \frac{m_p}{A_t} = \frac{883.125}{5.2} = 169.832 \left[ \frac{Kg}{m^2} \right]$$

Según la (ASCE, 2017) cuando se trata de maquinaria, el peso de la misma y las cargas móviles se incrementará en un 20% para maquinaria ligera y accionada por motor. Esto se toma en cuenta por que la carga de la plancha de acero es una carga viva.

$$Cp = Cp * 1.2 = 203.798 \left[ \frac{Kg}{m^2} \right]$$

Las cargas en las vigas secundarias están dadas por la siguiente ecuación:

$$q_v = A * \frac{Cp}{a} \quad (4)$$

Donde q es la carga en la viga [Kg/mm] (esta puede ser viga externa, intermedias, o internas), A es el área [m<sup>2</sup>], Cp es el valor de carga de la plancha [Kg/m<sup>2</sup>] y a es la longitud mayor del área [mm].

Carga de la viga externa

$$q_{ve} = A_1 * \frac{Cp}{a} = \frac{0.224 * 169.832}{3450} = 0.013 \left[ \frac{Kg}{mm} \right]$$

Carga de la viga intermedias

$$q_{vin} = A_2 * \frac{Cp}{a} = \frac{0.845 * 169.832}{3450} = 0.05 \left[ \frac{Kg}{mm} \right]$$

Carga de la viga interna

$$q_{vi} = A_3 * \frac{Cp}{a} = \frac{1.242 * 169.832}{3450} = 0.073 \left[ \frac{Kg}{mm} \right]$$

### **Carga de las platinas sobre los ángulos**

Para el caso de las platinas se tiene las mismas áreas que la plancha de acero por esta razón no es necesario calcular la relación de aspecto y las áreas correspondientes, se calculará la masa de las platinas en total.

$$m_{pl} = \rho * V_{pt} = 7850 * (6 * 0.003 * 0.04) = 5.652 [Kg]$$

La cantidad de platinas necesarias se calcula de la siguiente manera:

$$np = \left( \frac{3250}{50} - 1 \right) * \frac{1600}{6000} \approx 17$$

La masa total de las platinas es:

$$m_{pt} = np * m_{pl} = 17 * 5.652 = 96.084 [Kg]$$

La carga de la platina está representada por la siguiente ecuación:

$$C_{pt} = \frac{m_{pt}}{A_t} = \frac{96.084}{5.2} = 18.478 \left[ \frac{Kg}{m^2} \right]$$

Esta carga es una carga muerta por lo que no es necesario aplicar el incremento del 20%.

Las cargas en las vigas secundarias están dadas por la siguiente ecuación:

Carga de la viga externa

$$q_{ve} = A_1 * \frac{C_{pt}}{a} = \frac{0.224 * 18.478}{3450} = 0.001 \left[ \frac{Kg}{mm} \right]$$

Carga de la viga intermedias

$$q_{vin} = A_2 * \frac{C_{pt}}{a} = \frac{0.845 * 18.478}{3450} = 0.005 \left[ \frac{Kg}{mm} \right]$$

Carga de la viga interna

$$q_{vi} = A_3 * \frac{C_{pt}}{a} = \frac{1.242 * 18.478}{3450} = 0.007 \left[ \frac{Kg}{mm} \right]$$

### **Carga de la cama de agua**

La masa de la cama de agua está dada por el peso del agua en el volumen de su recipiente contenedor.

$$m_{tca} = m_a + m_e$$

$$m_{tca} = \rho_{agua} * V + m_e$$

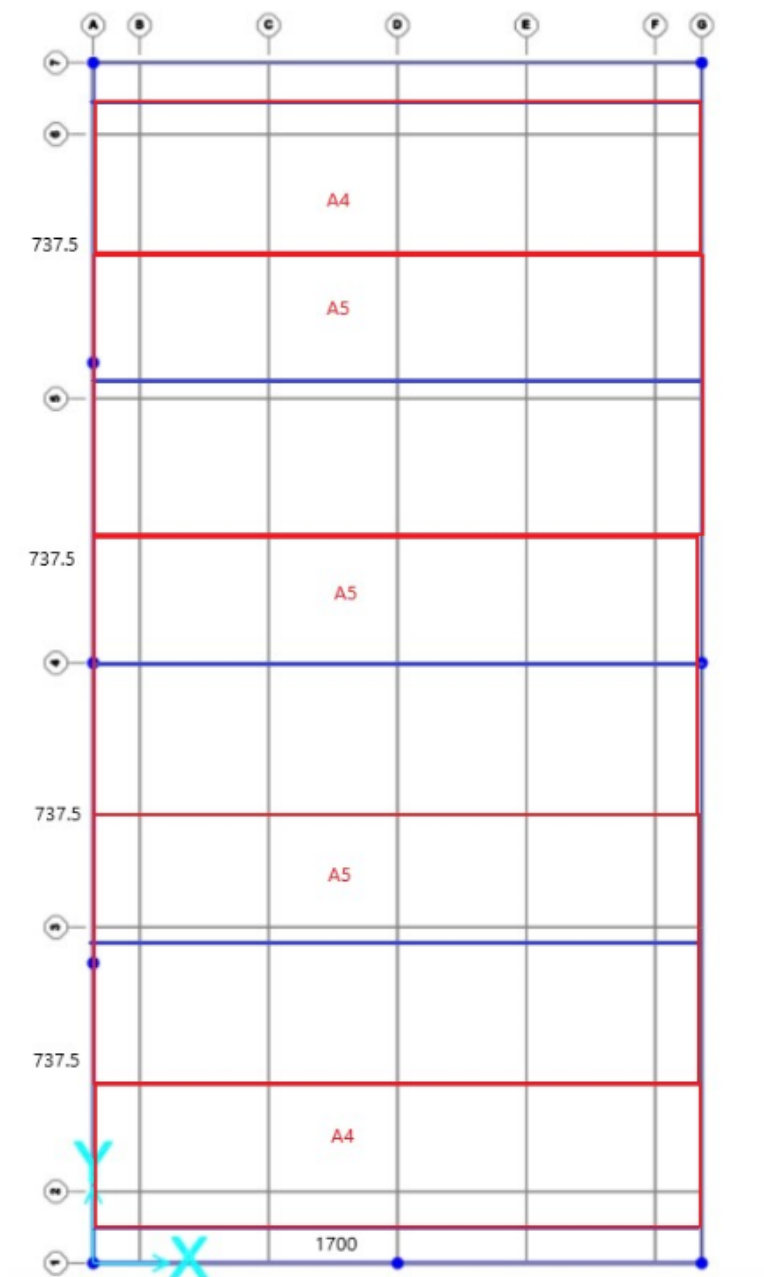
$$m_e = 35 [Kg]$$

$$m_{tca} = 1000 * (3.35 * 1.6 * 0.14) + 37 = 787.4 [Kg]$$

Se aplicará el criterio de áreas tributarias como se puede verificar en la figura 42 para conocer el valor de la carga en cada una de las vigas que soportan la cama de agua.

**Figura 42**

Áreas correspondientes de la cama de agua



*Nota.* La distribución de las vigas que soportan la cama es igual y se tiene dos valores para el área.

Se verifica la relación aspecto en este caso se tiene dos áreas la cual se verificará en cada una la relación de aspecto como se puede observar en la figura 42, donde el lado mayor es constante en las áreas y el lado menor es variable en cada una.

$$a = 1700 \text{ [mm]}$$

$$b_1 = 400 \text{ [mm]}$$

$$b_2 = 800 \text{ [mm]}$$

$$\frac{a}{b_1} = \frac{1700}{400} = 4.25$$

$$\frac{a}{b_2} = \frac{3450}{245} = 2.125$$

En los dos casos de áreas la relación de aspecto es mayor que 2 lo que significa que la carga trabaja en una sola dirección. A continuación, se calcularán las áreas con la transformación de unidades a metros de cada componente.

$$A_4 = a * b_1 = 0.68 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_5 = a * b_2 = 1.36 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$Cp = \frac{m_a}{A_t} = \frac{787.4}{5.2} = 151.423 \left[ \frac{Kg}{m^2} \right]$$

La carga es una carga muerta y no se aplica el incremento del 20%.

Carga de la viga externa

$$q_{ve} = A_4 * \frac{Cpa}{a} = \frac{0.68 * 151.423}{1700} = 0.061 \left[ \frac{Kg}{mm} \right]$$

Carga de la viga interna



$$q_{vi} = A_5 * \frac{Cpa}{a} = \frac{1.36 * 151.423}{1700} = 0.121 \left[ \frac{Kg}{mm} \right]$$

### ***Carga del puente sobre el bastidor***

La carga que se ejerce sobre el bastidor por la acción de puente comprende diversos elementos como las placas de soporte del puente, la viga y los distintos elementos que conforman el eje X y el eje Z, que se detallan en las tablas 8, 9, 10 y 11.

**Tabla 8**

*Cargas puntuales sobre el puente*

<b>No.</b>	<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Peso</b>	<b>Total</b>
1	Motores nema	1	1,65 Kgf	1,65 Kgf
2	Mesa deslizante	1	3,37 Kgf	3,37 Kgf
3	Antorcha	1	0,6 Kgf	0,60 Kgf
4	Cabezal flotante	1	1 Kgf	1,00 Kgf
5	Placa de soporte 1	1	2,71 Kgf	2,71 Kgf
6	Placa de soporte 2	1	1,36 Kgf	1,36 Kgf
7	EGH15	4	0,332 Kgf	1,33 Kgf
8	Tensores de motor	1	1.5 Kgf	1,5 Kgf
9	Tapa del eje z	1	2 Kgf	2,00 Kgf
10	Tapa del cabezal	1	0,5 Kgf	0,50 Kgf
11	Luz indicadora	1	0,5 Kgf	0,50 Kgf
12	Perno y tuerca	93	0,04 Kgf	3,72 Kgf
13	Arandela	93	0,007 Kgf	0,65 Kgf
Carga total				21,39 Kgf

*Nota.* Cargas puntuales que actúan sobre el puente.

En la tabla 8 se pueden observar el valor de la carga total que se ejerce sobre el puente, cabe mencionar que este valor es para una carga puntual y a su vez de una carga viva

por lo cual se considera el criterio de la ASCE para aumentar en un 20% el valor de dicha carga para colocarla en la simulación.

$$m_{pp} = 21.39 \text{ [Kg]}$$

Donde  $m_{pp}$  es la carga puntual del puente [Kg].

$$m_{pp} = 1.2 * 21.39 = 25.67 \text{ [Kg]}$$

**Tabla 9**

*Cargas distribuidas sobre el puente*

No.	Elemento	Cantidad	Peso	Total
1	Cremallera	1,6	2,21 kgf/m	0,00221 Kg/mm
2	EGR 15	1,6	2,29 kgf/m	0,00229 Kg/mm
3	Cables	1,8	3 Kg	0,00166667 Kg/mm

*Nota.* Cargas distribuidas que actúan sobre el puente.

En la tabla 9 se pueden observar 3 cargas de las cuales corresponden a la cremallera y las guías EGR 15 son cargas muertas y por lo contrario la carga de los cables es una carga viva. Tanto la tabla 8 y 9 serán empleadas en la simulación en software de análisis estructural para la selección del perfil del puente.

**Tabla 10**

*Carga puntual sobre el bastidor*

No.	Elemento	Cantidad	Peso	Total
1	Riel	1,55	2,29 Kg/m	3,55 Kg
2	Cremallera	1,55	2,21 Kg/m	3,43 Kg
3	Puente	1	18,32 Kg	18,32 Kg
4	Placas tensoras	2	1,5 Kg	3 Kg

5	Motores nema	2	1.65 Kgf	3.30 Kgf
6	EGR 15	4	0,332 Kgf	1,33 Kgf
7	Pernos	1	1 Kgf	1,00 Kgf
8	Ventiladores	4	0,15 Kgf	0,60 Kgf
9	Placa soporte puente	2	11,46 Kgf	22,92 Kgf
10	Cobertor	3	3,6 Kgf	10,80 Kgf
11	Cable de cadena de arrastre plástico	4	0,3 Kgf	1,20 Kgf
12	Soporte de ventiladores	2	0,546 Kgf	1,64 Kgf
13	Placa montaje de motor x	1	1,6 Kgf	1,60 Kgf
14	Ángulo de sujeción vertical	2	0,21 Kgf	0,42 Kgf
15	Cargas puntuales sobre el puente	1	20.89 Kgf	21,39 Kgf
16	Ángulo de sujeción horizontal	2	0,1 Kgf	0,20 Kgf
17	Cables	1,8	1,66 Kgf	2,99 Kgf
Carga total				96,78 Kgf

*Nota.* Cargas puntuales que actúan sobre el bastidor.

Se considera toda la carga que ejercen los elementos del eje Z y X además de las placas del soporte del puente, esta es una carga viva por lo que se aplicará el criterio de ASCE.

$$m_{pb} = 96.78 [Kg]$$

Donde  $m_{pb}$  es la carga puntual del bastidor [Kg].

$$m_{pb} = 1.2 * 96.78 = 116.13 [Kg]$$

La carga que se ejerce del puente sobre el bastidor estará apoyada sobre dos puntos en el bastidor la cual dicha carga se divide para 2 correspondiendo a un valor de

$$m_{pb} = \frac{116.13}{2} \approx 60 [Kg]$$

Considerando las cargas laterales y longitudinales por la consideración de que el puente actúa como un puente grúa según la (ASCE, 2017) menciona que la fuerza longitudinal se calculará como el 10% de la carga máxima, y la fuerza lateral se calculará como el 20% de la carga máxima. Tomando en cuenta que no se tiene ningún elemento colgante en el puente se considerará la cara lateral como un 10% de la carga máxima.

$$m_{pbla} = m_{pblo} = 60 * 0.1 = 6 [Kg]$$

Donde  $m_{pbla}$  es la carga puntual sobre el bastidor lateral [Kg] y  $m_{pblo}$  es la carga puntual sobre el bastidor longitudinal [Kg].

A su vez el bastidor estará sometido a cargas distribuidas como se puede observar en la tabla 11 donde la cremallera, la bandeja de arrastre y las guías EGR 15 son cargas muertas.

**Tabla 11**

*Cargas distribuidas en el bastidor*

No.	Elemento	Cantidad	Peso	Total
1	Cremallera	3,4	2,21 kgf/m	0,00221 Kgf/mm
2	Bandeja cadena de arrastre	1,8	1,98 Kgf	0,0011 Kgf/mm
3	EGR 15	3,4	2,29 kgf/m	0,00229 Kgf/mm

*Nota.* Cargas distribuidas que actúan sobre el bastidor las cuales pertenecen al eje Y.

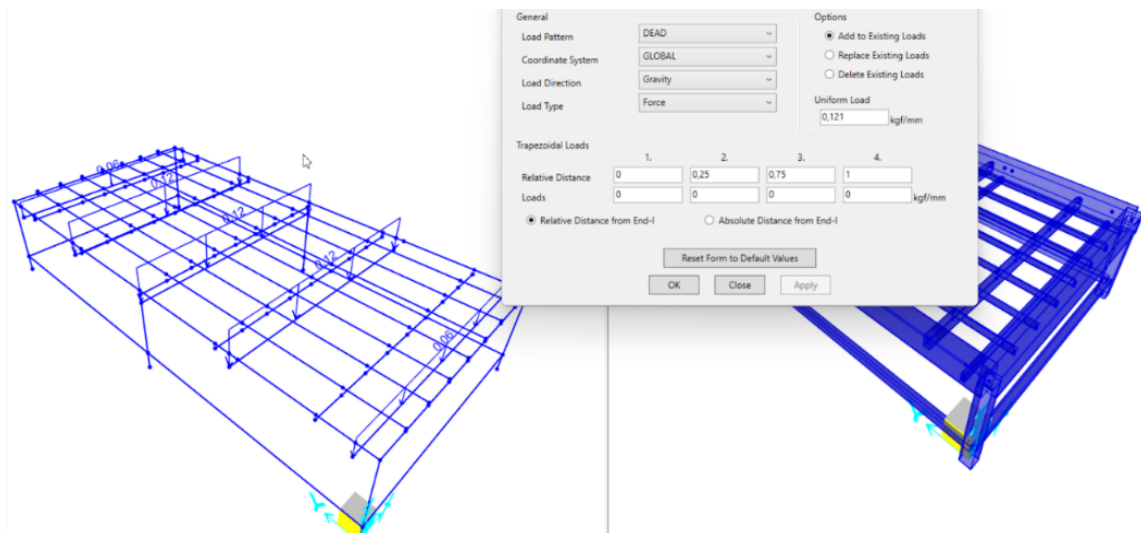
Previamente obtenidas las cargas necesarias para se realiza la simulación con dos ideas que consisten en variar el número de ángulos para soportar las platinas uno modelo consiste en 7 ángulos y el otro con 5 ángulos se seleccionara entre estos dos diseños el más adecuado de acuerdo a la simulación.

## Diseño del modelo 1 de 7 ángulos para soporte.

Se aplicarán las cargas y se verificará los resultados de demanda de capacidad y desplazamientos máximos permitidos en los puntos críticos. En las figuras 43,44,45,46,47 y 48 se puede verificar cómo se aplican las cargas en el software de análisis estructural.

### Figura 43

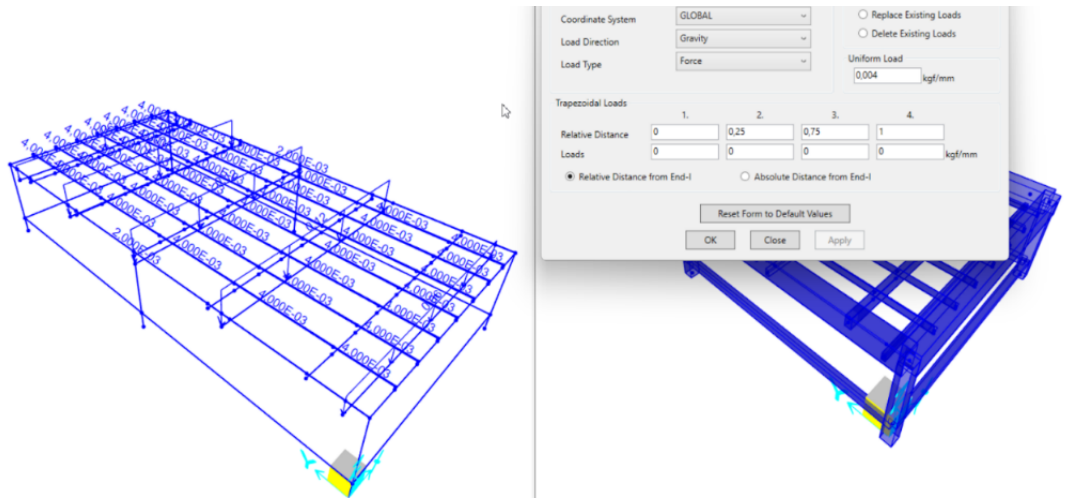
*Aplicación de la carga muerta de la cama de agua en el modelo 1.*



*Nota.* Carga muerta producida por la cama de agua.

**Figura 44**

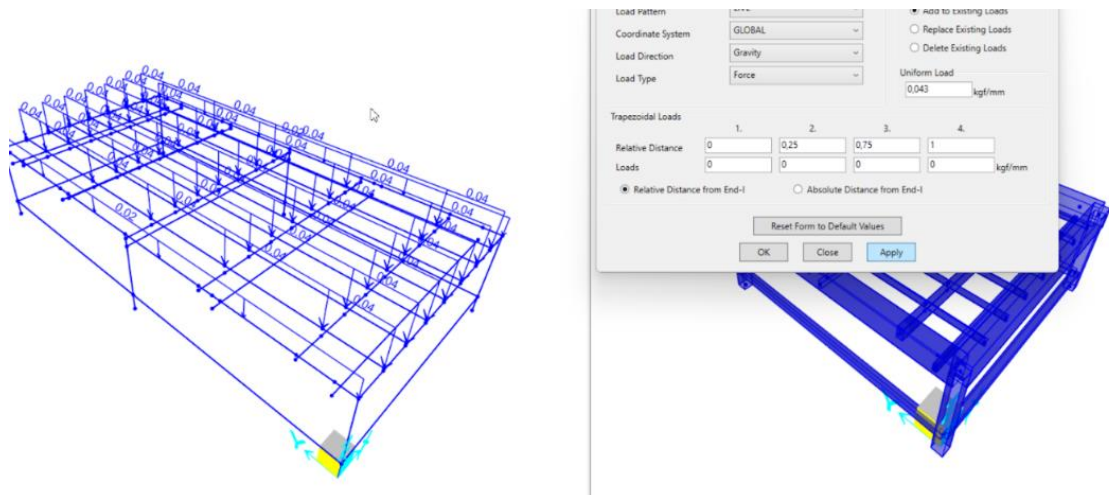
Aplicación de la carga muerta de las platinas de la rejilla en el modelo 1.



Nota. Carga muerta producida por las platinas.

**Figura 45**

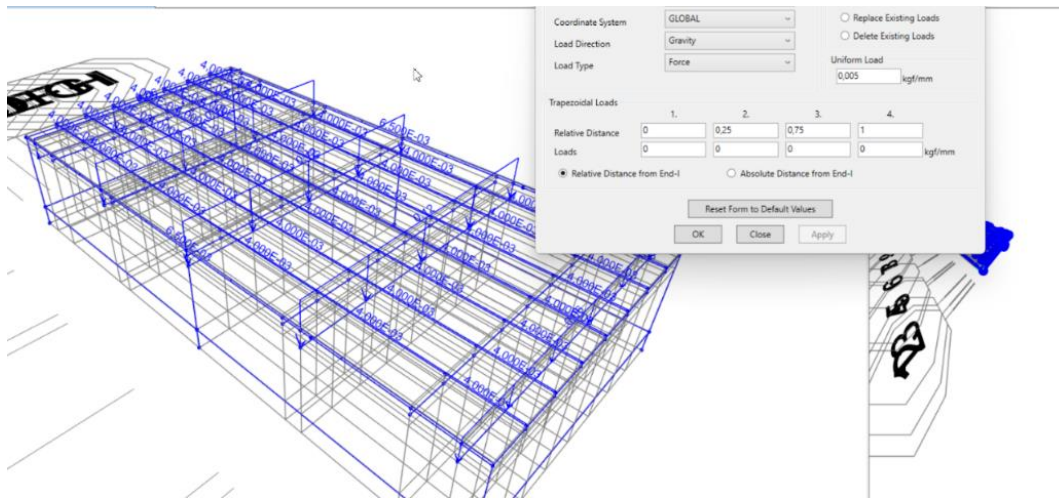
Aplicación de la carga viva de la plancha en el modelo 1.



Nota. Carga viva producida por la plancha de acero al carbono de 25 mm de espesor.

**Figura 46**

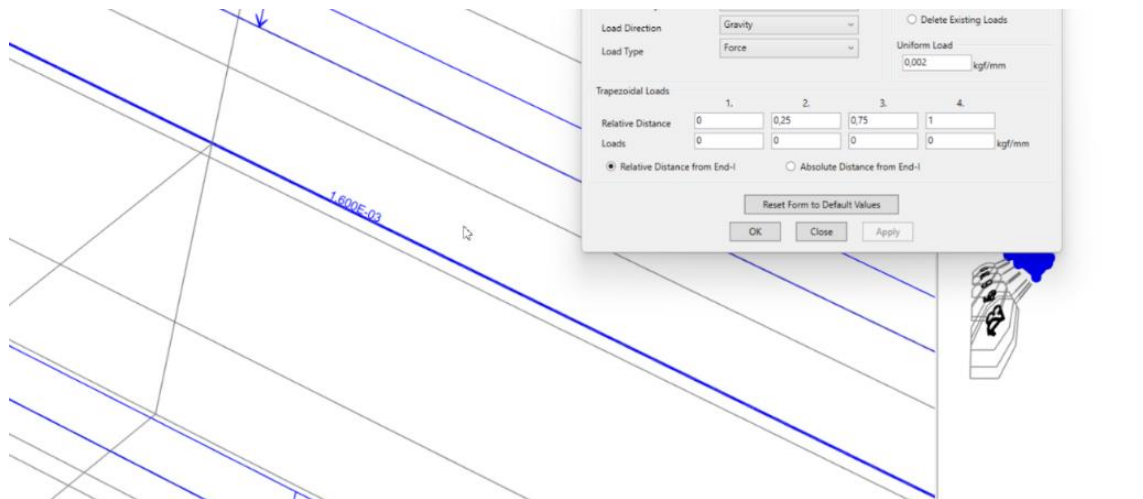
*Aplicación de la carga muerta de la cremallera y guías lineales en el modelo 1.*



*Nota. Cargas muertas producidas por la cremallera y guías.*

**Figura 47**

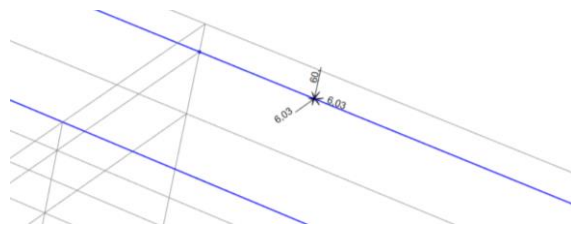
*Aplicación de la carga viva de la cadena de arrastre en el modelo 1.*



*Nota. Carga viva producida por la cadena de arrastre.*

### Figura 48

*Aplicación de la carga puntual, cargas laterales y longitudinales en el modelo 1.*

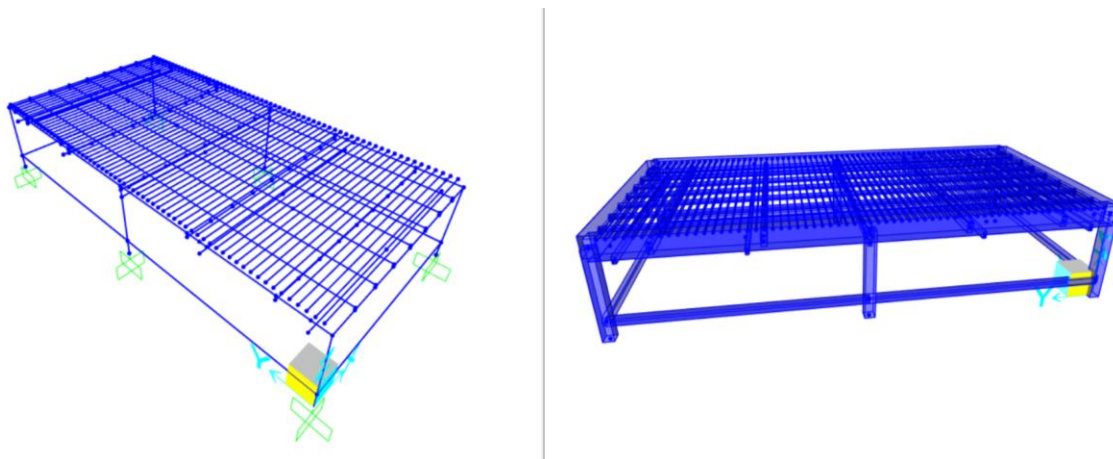


*Nota.* Cargas puntuales de la carga del puente y demás elementos sobre el bastidor, cargas laterales y longitudinales.

Para una mejor visualización se colocará las platinas donde se asentará la plancha de acero al carbono para poder realizar el corte, y una vista extruida de los elementos para observar que se está variando los ángulos, perfiles dependiendo su aplicación esto se puede verificar en la figura 49.

### Figura 49

*Diseño con las platinas en la rejilla de los elementos en el modelo 1.*



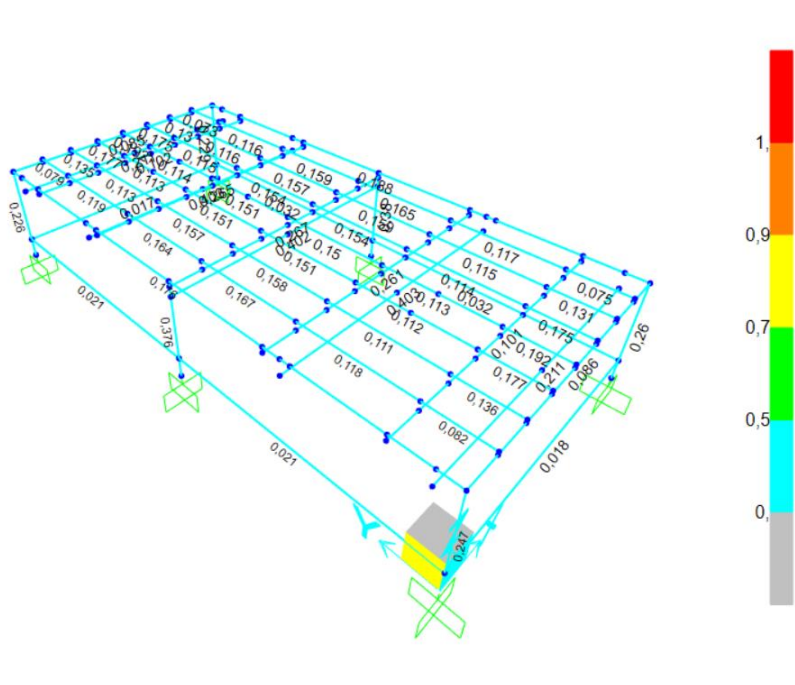
*Nota.* La vista izquierda los elementos se encuentran representados como una línea y la vista derecha los elementos se encuentran de forma extruida en software de análisis estructural.



Para la obtención de resultados en software de análisis estructural se asignó como material para todos los perfiles, ángulos y demás elementos el acero ASTM A36 y se definió distintas dimensiones de perfiles, tubos, ángulos y demás elementos para poder realizar una selección de dimensiones más adecuada con la finalidad de cumplir los criterios de servicialidad y desplazamientos máximos, como el diseño por el software es un diseño iterativo hasta seleccionar los perfiles óptimos se presentará solo la simulación con los miembros estructurales finales y no todas las iteraciones, además cabe mencionar el software de análisis estructural realiza el criterio de combinación de cargas acorde a los lineamientos del ASCE 7-16 necesario para poder obtener un resultado correcto que se puede observar en la figura 50.

### Figura 50

*Resultados del criterio de servicialidad del modelo 1.*



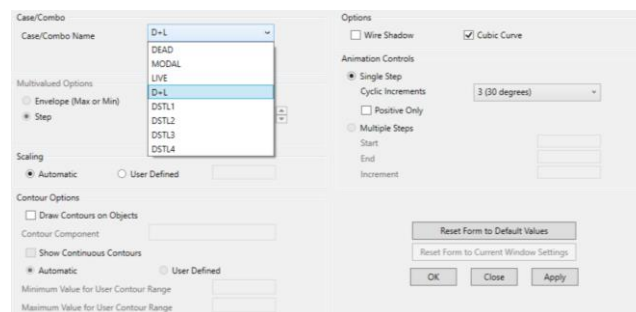
*Nota.* Simulación en el software de análisis estructural y resultados en el criterio de servicialidad

Por la simulación y la representación gráfica por colores y los valores que se muestran en los elementos se observa que ningún elemento se encuentra en estado crítico ya dichos valores incluso no superan un valor de 0.2 por lo cual el modelo cumple con esta condición de diseño.

Para el chequeo del criterio de deformaciones se debe crear un caso de simulación para que pueda reflejar los valores de desplazamientos por la acción de las cargas vivas y cargas muertas como se puede verificar en la figura 51, si en el caso contrario de no crear el resultado estará totalmente erróneo.

### Figura 51

*Deformación por la aplicación de cargas vivas y muertas del modelo 1.*



*Nota.* Se debe seleccionar el caso creado para desplazamientos por acción de las cargas vivas y muertas.

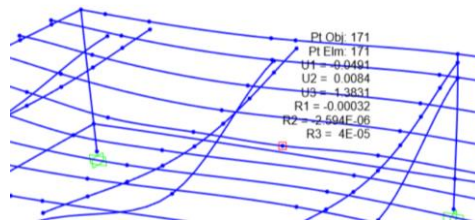
Ángulos de soporte de las platinas, se consideró un criterio de  $L/1000$  el cual proviene analizando que según (CMAA, 2000) menciona que los desplazamientos máximos para grúas no deberán exceder el criterio de  $L/888$ , tomando en cuenta que el propósito del proyecto necesita de una alta precisión se toma el criterio como  $L/1000$ , donde la longitud de los ángulos es de 3450 [mm] y el valor de la simulación se puede observar en la figura 52.

$$\frac{L}{1000}$$

$$\frac{3450}{1000} = 3.45 \text{ [mm]}$$

### Figura 52

*Deformación en los ángulos de soporte de las platinas del modelo 1.*



*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 1.38 [mm].

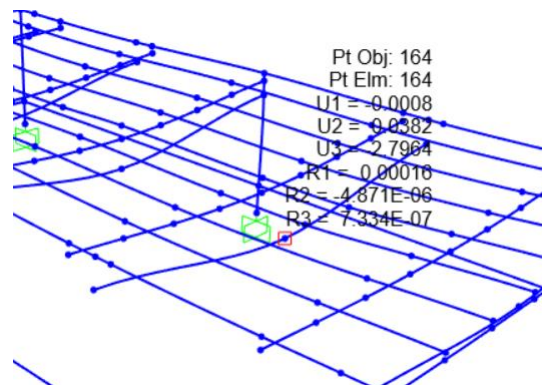
Vigas de soporte de la cama de agua, se consideró un criterio de  $L/600$  por el motivo que estas no influyen en ningún momento la precisión del sistema y la longitud de las vigas es de 1700 [mm] y el resultado se puede verificar en la figura 53.

$$\frac{L}{600}$$

$$\frac{1700}{600} = 2.833 \text{ [mm]}$$

### Figura 53

*Deformación en las vigas de soporte de la cama de agua del modelo 1.*



*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 2.79 [mm].

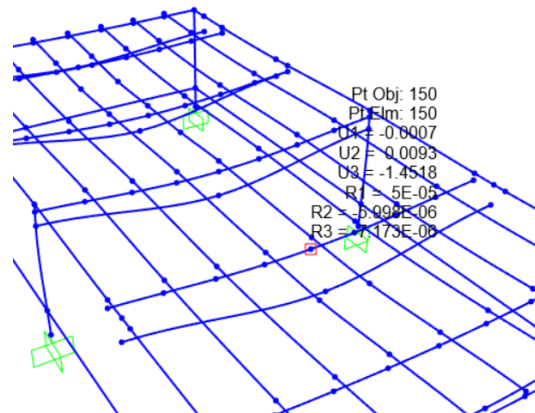
En la figura 54 se puede ver el resultado de la simulación de las vigas de soporte de los ángulos, se consideró un criterio de  $L/1000$  al igual que ángulos se necesita un menor desplazamiento para evitar problemas en la precisión y la longitud de las vigas es de 1700 [mm].

$$\frac{L}{1000}$$

$$\frac{1700}{1000} = 1.7 [mm]$$

### Figura 54

*Deformación en las vigas de soporte de los ángulos del modelo 1.*



*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 1.45 [mm].

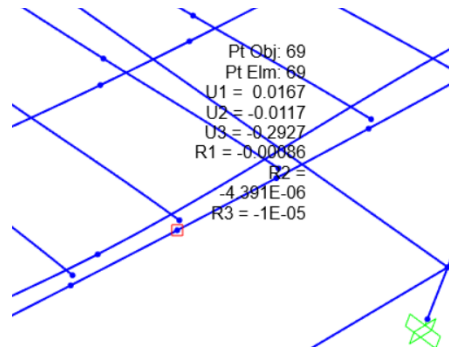
Tubos del marco en el eje X, se consideró un criterio de  $L/1000$  por motivo que forman parte del marco donde se asentará la placa y si los desplazamientos son muy elevados se perderá precisión del conjunto y la longitud de los tubos rectangulares es 1700 [mm], el resultado de la simulación se observa en la figura 55.

$$\frac{L}{1000}$$

$$\frac{1700}{1000} = 1.7 [mm]$$

**Figura 55**

*Deformación en los tubos rectangulares en sentido el eje X del modelo 1.*



*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 0.29 [mm].

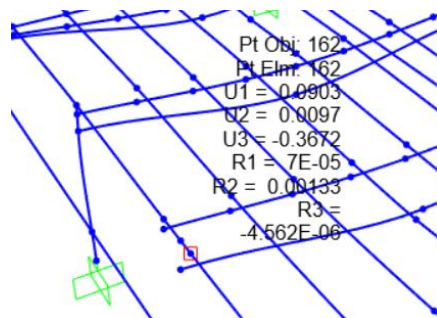
El desplazamiento resultante se presenta en la figura 56 de los tubos del marco en sentido del eje Y, se consideró un criterio de  $L/1000$  por que estos miembros forman parte del marco y la longitud de los tubos rectangulares es 3450 [mm].

$$\frac{L}{1000}$$

$$\frac{3450}{1000} = 3.45mm$$

**Figura 56**

*Deformación en los tubos rectangulares en sentido el eje Y del modelo 1.*



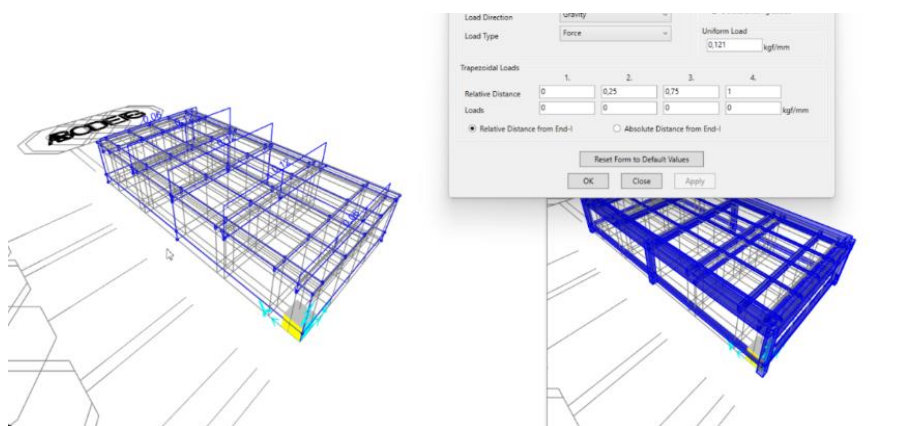
*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 0.36 [mm].

## Diseño del modelo 2 de 5 ángulos para soporte.

Por igual forma se aplicarán las cargas que se puede observar en las figuras 57, 58 , 59, 61 y 62, además se verificará los resultados de demanda de capacidad y desplazamientos máximos permitidos en los puntos críticos.

### Figura 57

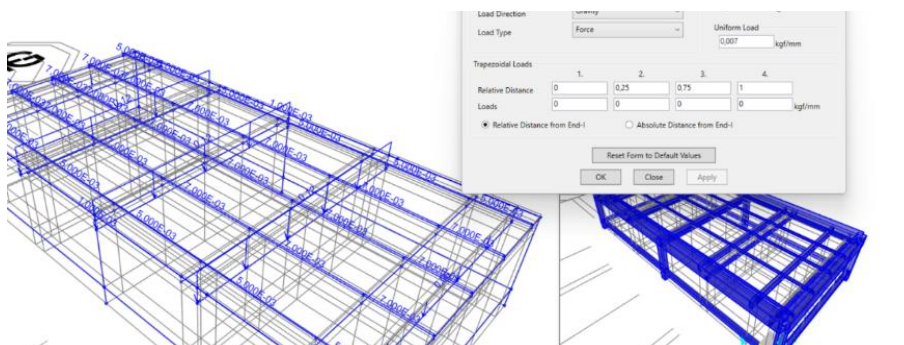
*Aplicación de la carga muerta de la cama de agua en el modelo 2.*



*Nota.* Carga muerta producida por la cama de agua.

### Figura 58

*Aplicación de la carga muerta de las platinas de la rejilla en el modelo 2.*

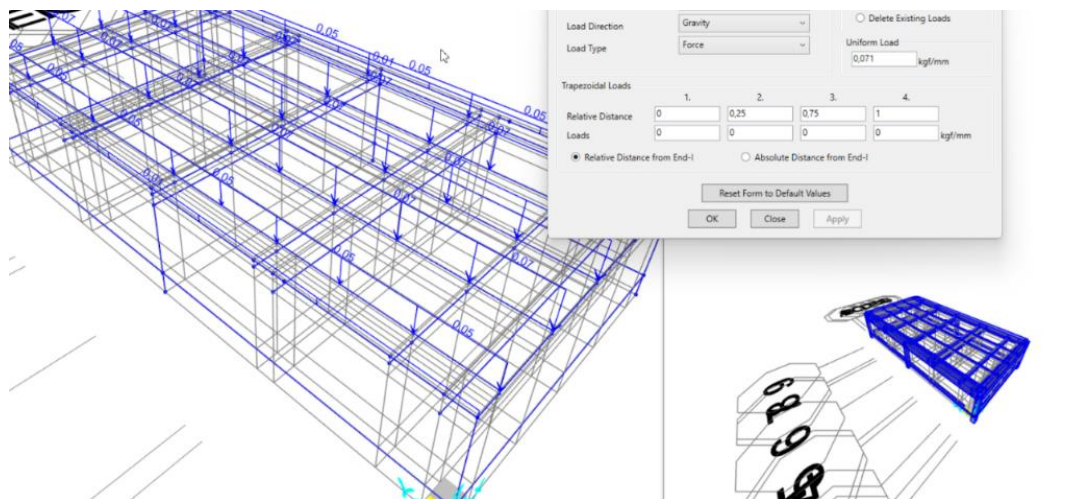


*Nota.* Carga muerta producida por las platinas.



**Figura 59**

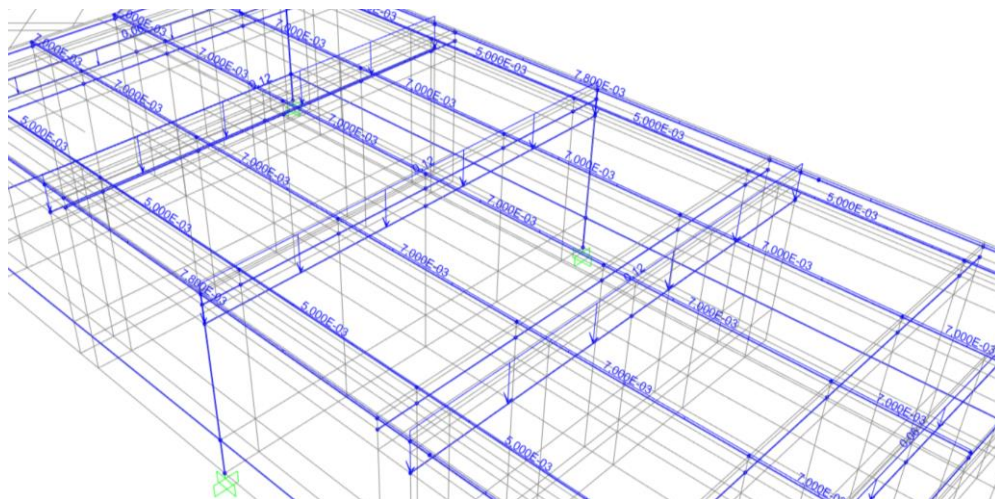
*Aplicación de la carga viva de la plancha en el modelo 2.*



*Nota.* Carga viva producida por la plancha de acero al carbono de 25 mm de espesor.

**Figura 60**

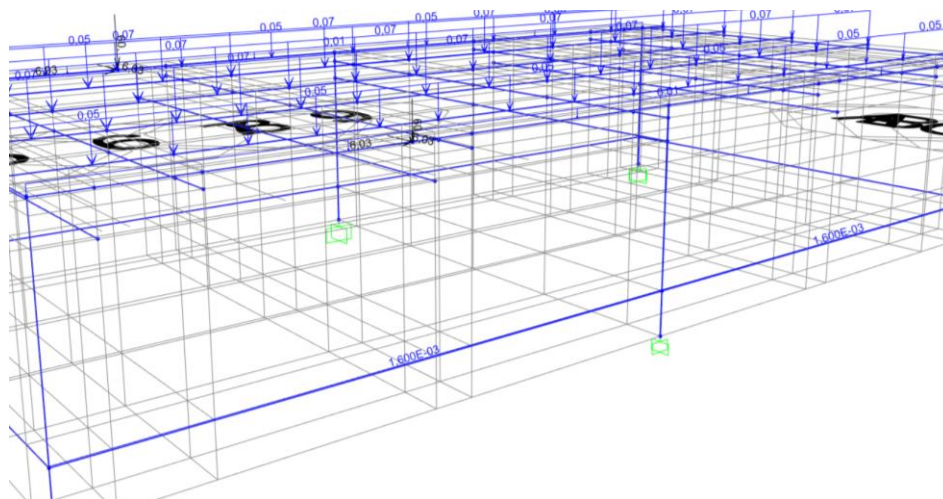
*Aplicación de la carga muerta de la cremallera y guías lineales en el modelo 2.*



*Nota.* Cargas muertas producidas por la cremallera y guías.

**Figura 61**

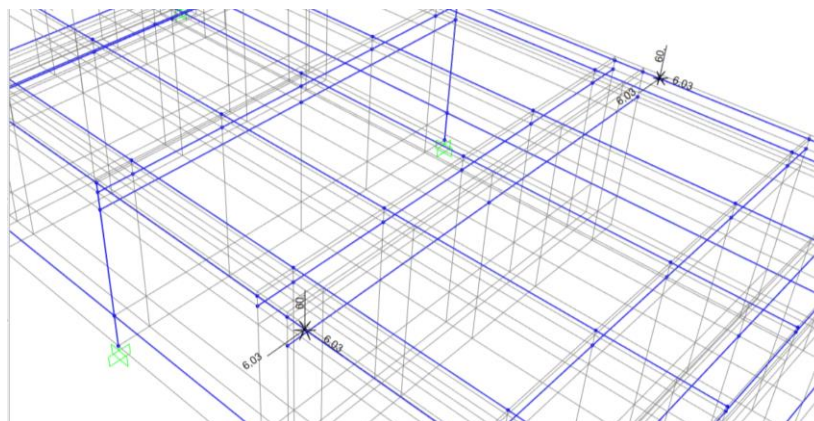
*Aplicación de la carga viva de la cadena de arrastre en el modelo 2.*



*Nota.* Carga viva producida por la cadena de arrastre.

**Figura 62**

*Aplicación de la carga cargas laterales y longitudinales en el modelo 2.*



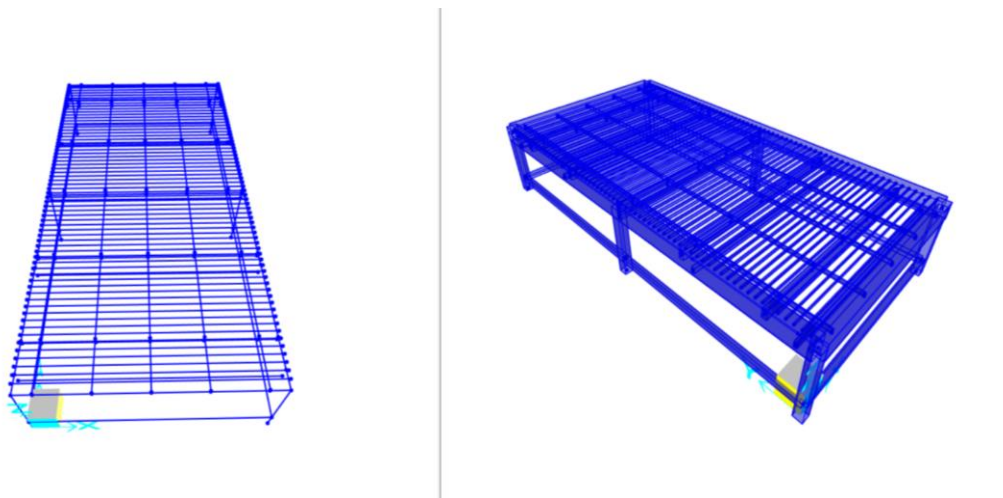
*Nota.* Cargas puntuales de la carga del puente y demás elementos sobre el bastidor, cargas laterales y longitudinales.



Para una mejor visualización se colocará las platinas y la vista extruida de los elementos que se encuentran en la figura 63.

### Figura 63

*Diseño con las platinas en la rejilla de los elementos del modelo 2.*

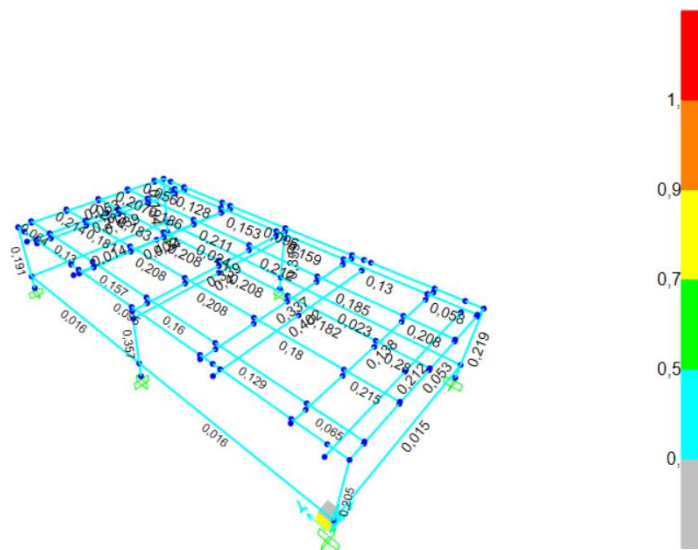


*Nota.* La vista izquierda los elementos se encuentran representados como una línea y la vista derecha los elementos se encuentran de forma extruida en software de análisis estructural.

De igual manera que el modelo 1 para el modelo 2 y la obtención de resultados en software de análisis estructural se asignó como material para todos los perfiles, ángulos y demás elementos el acero ASTM A36 y se definió distintas dimensiones de perfiles, tubos, ángulos y demás elementos para poder realizar una selección de dimensiones más adecuada con la finalidad de cumplir los criterios de servicialidad. En las figuras 64 se puede observar los resultados de la simulación.

**Figura 64**

Resultados del criterio de servicialidad del modelo 2.



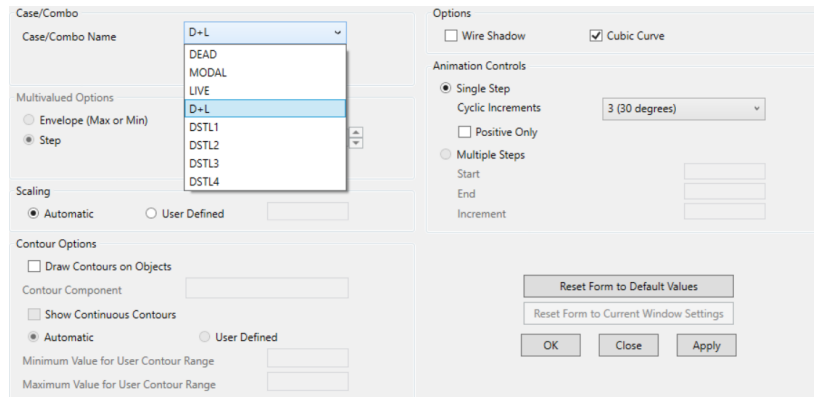
*Nota.* Simulación en el software de análisis estructural y resultados en el criterio de servicialidad

Para este modelo la simulación y la representación gráfica por colores y los valores que se muestran en los elementos se observa que ningún elemento se encuentra en estado crítico ya dichos valores incluso no superan un valor de 0.25 por lo cual el modelo cumple con esta condición de diseño.

Se encuentra en la figura 65 como empezar el chequeo del criterio de deformaciones para lo cual se debe crear un caso de simulación para que pueda reflejar los valores de desplazamientos por la acción de las cargas vivas y cargas muertas.

## Figura 65

Deformación por la aplicación de cargas vivas y muertas en el modelo 2.



*Nota.* Se debe seleccionar el caso creado para desplazamientos por acción de las cargas vivas y muertas en cada uno de los modelos.

Los criterios de deformación máxima se mantienen igual que en el modelo 1 esto es por la razón que en la longitud L ninguno de los elementos ha cambiado.

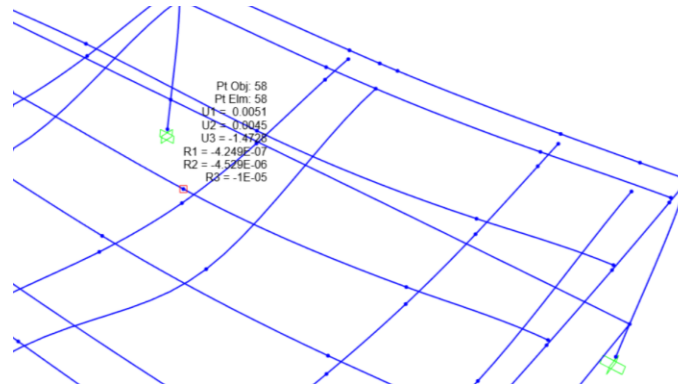
Ángulos de soporte de las platinas, tomando en cuenta el criterio analizado en el modelo 1 se considera un criterio de  $L/1000$  y la longitud de los ángulos es de 3450 [mm], el resultado se encuentra en la figura 66.

$$\frac{L}{1000}$$

$$\frac{3450}{1000} = 3.45 \text{ [mm]}$$

**Figura 66**

*Deformación en los ángulos de soporte de las platinas del modelo 2.*



*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 1.47 [mm].

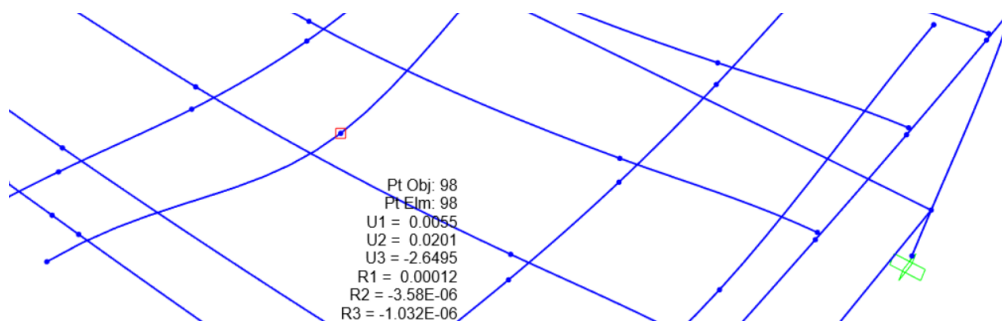
Vigas de soporte de la cama de agua y cuyo simulación se presenta en la figura 67, se consideró un criterio de  $L/600$  por que no afecta a la precisión del corte en las placas y la longitud de las vigas es de 1700 [mm].

$$\frac{L}{600}$$

$$\frac{1700}{600} = 2.833 \text{ [mm]}$$

**Figura 67**

*Deformación en las vigas de soporte de la cama de agua del modelo 2.*



*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 2.64 [mm].

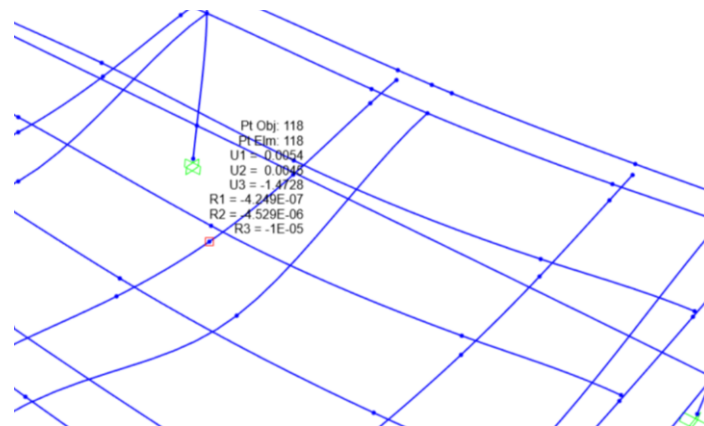
Vigas de soporte de los ángulos, se consideró un criterio de  $L/1000$  estos desplazamientos deben ser mínimos para evitar problemas con la precisión y la longitud de las vigas es de 1700 [mm], chequear el resultado de desplazamientos en la figura 68.

$$\frac{L}{1000}$$

$$\frac{1700}{1000} = 1.7 [mm]$$

### Figura 68

*Deformación en las vigas de soporte de los ángulos*



*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 1.47 [mm].

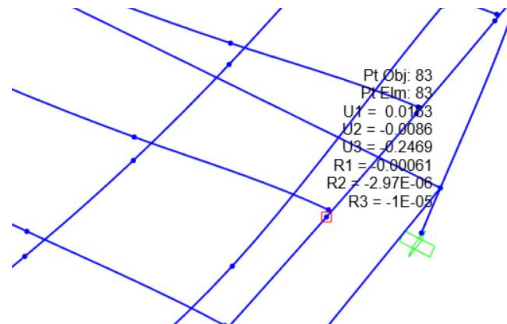
Tubos del marco en el eje X, se consideró un criterio de  $L/1000$  ya que son base del conjunto y la longitud de los tubos rectangulares es 1700 [mm]. En la figura 69 se puede observar el resultado de los desplazamientos.

$$\frac{L}{1000}$$

$$\frac{1700}{1000} = 1.7 [mm]$$

### Figura 69

*Deformación en los tubos rectangulares en sentido el eje X*



*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 0.24 [mm].

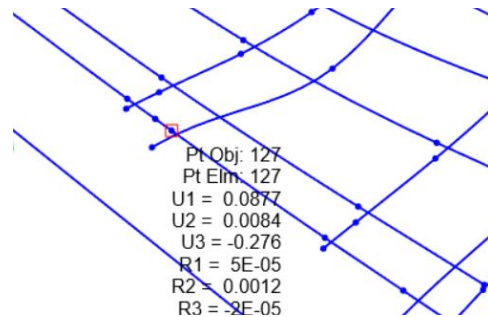
Tubos del marco en sentido del eje Y, se consideró un criterio de  $L/1000$  por que son parte fundamental del marco y sus desplazamientos afectarán al resultado al momento del corte y la longitud de los tubos rectangulares es 3450 [mm], verificar el cumplimiento del criterio en la figura 70.

$$\frac{L}{1000}$$

$$\frac{3450}{1000} = 3.45mm$$

### Figura 70

*Deformación en los tubos rectangulares en sentido el eje Y*



*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 0.36 [mm].

Luego de analizar los resultados de los dos modelos se eligió el modelo 2 ya que con la reducción de ángulos significa un cierto ahorro económico y verificando que cumple la demanda de capacidad y cumple con las deformaciones máximas en los miembros estructurales, se especifica que los ángulos, vigas o tubos a utilizar se presentan en la tabla 12.

**Tabla 12**

*Elementos seleccionados para el bastidor de la mesa CNC*

No,	Elemento	Tipo	Dimensiones	
1	Marco del bastidor	Tubo rectangular	150*100*2	mm
2	Columnas	Tubo cuadrado	75*75*1,8	mm
3	Refuerzos de las columnas	Tubo cuadrado	50*50*1.2	mm
4	Vigas de la cama de agua	Tubo rectangular	50*25*2	mm
5	Vigas de la rejilla	Tubo rectangular	80*40*2	mm
6	Ángulos de soporte de las platinas	Ángulos L	40*3	mm

*Nota.* Los tubos y ángulos han sido obtenidos de (DIPAC, 2022)

En la simulación se puede verificar que algunos de los tubos rectangulares pueden ser reemplazados por otros de menores dimensiones pero por facilidad de manufactura, y el posterior montaje de los demás elementos como guías lineales y cremalleras se necesita un espacio considerable para no tener problemas en el montaje, tomando en cuenta estos motivos se seleccionó el tubo más adecuado que cumpla con esta condición, además que se busca que el mecanismo sea un sistema rígido para no tener posibles problemas en su funcionamiento.

### ***Aplicación de cargas laterales al modelo seleccionado.***

Considerando el modelo desarrollado en el software de análisis estructural se puede obtener la masa de la estructura, además que se tiene el conocimiento de la carga de la plancha de acero, para una carga lateral según (ASCE, 2017) en puentes grúa se considera el

20% de suma de la capacidad nominal y el peso de la grúa. Para lo cual la capacidad nominal será dada por la plancha de acero de espesor de 25 mm y el peso de la grúa está definido como el peso de la estructura.

$$m_{cl} = m_e + m_p$$

Donde  $m_{cl}$  es la masa total para cara lateral [Kg],  $m_e$  es la masa de la estructura [Kg] y  $m_p$  es la masa de la plancha.

$$m_e = 200 \text{ [Kg]}$$

$$m_p = 800 \text{ [Kg]}$$

$$m_{cl} = m_e + m_p = 200 + 800 = 1000 \text{ [Kg]}$$

Aplicando el 20% para movimientos sísmicos la carga lateral es de:

$$m_{cl} = 200 \text{ [Kg]}$$

### **Aplicación de cargas en el eje X**

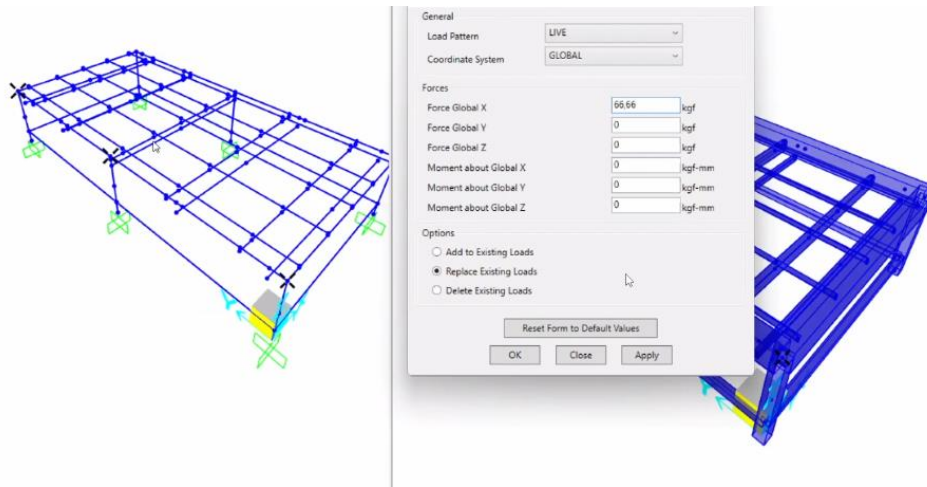
A este valor se le divide para 3 porque se tiene tres ejes de columnas, la simulación se presenta en la figura 71 y los resultados de los mismos en las figuras 72 y 73.

$$m_{cl} = 66.66 \text{ [Kg]}$$



**Figura 71**

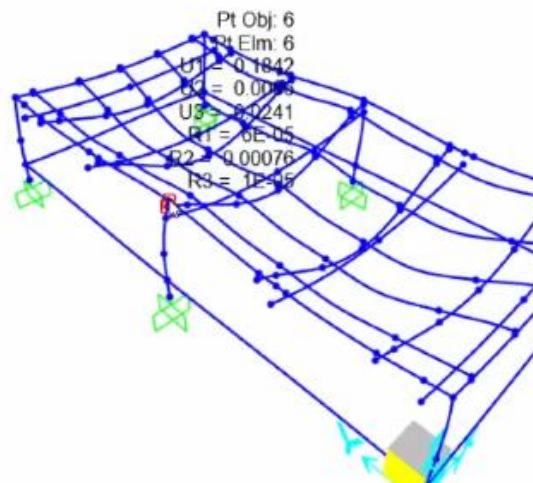
*Aplicación de cargas laterales por movimiento sísmicos*



*Nota.* Las cargas se encuentran en la dirección X.

**Figura 72**

*Desplazamientos por acción de cargas laterales en el eje X.*

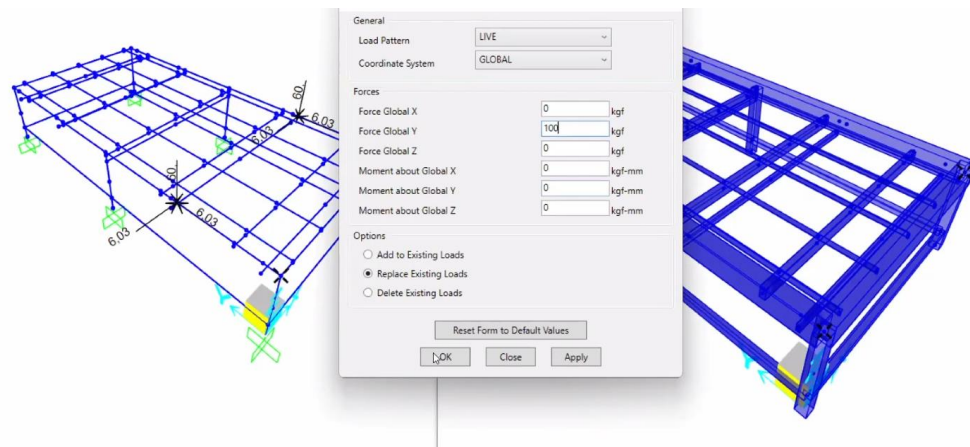


*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 0.18 [mm].



**Figura 74**

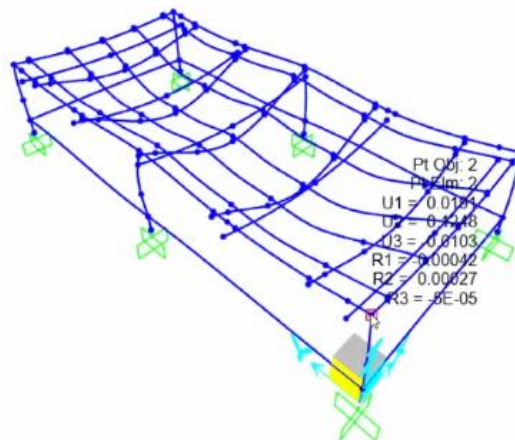
*Aplicación de cargas laterales en sentido Y.*



*Nota.* Cargas laterales en el sentido Y con un valor de 100 [Kg].

**Figura 75**

*Desplazamientos por acción de cargas laterales en el eje Y.*



*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 0.12 [mm].

Para verificar si este valor es adecuado se validará con el resultado de la ecuación de desplazamiento laterales máximos adoptada de la NEC 15 sobre deriva inelástica la cual es:

$$0.02 * \frac{h}{r * 0.75} \quad (5)$$

Donde h es la altura [mm], r es un valor que puede estar entre 3 y 8. Considerando el valor más grande de r igual a 8 el desplazamiento máximo es de:

$$0.02 * \frac{740}{8 * 0.75} = 2.46 [mm]$$

Se puede comprobar que el valor máximo es de 2.46 [mm] y el resultado de la simulación tiene un valor de 0.12 [mm], por lo cual no se necesita colocar refuerzos en diagonal en el bastidor es lo suficientemente rígido.

### ***Diseño del puente para el eje X y soporte del eje Z***

Para el diseño de puente se consideran las cargas presentadas en las tablas 8 y 9. Considerando como el puente es una grúa según (ASCE, 2017) menciona que la carga vertical se incrementa en un valor del 20% para tener en cuenta efectos de impacto vertical y se considera las cargas lateral y longitudinal como el 10% de la carga total ya que se considera como una grúa y esta a su vez no tiene elementos colgantes para que este valor sea mayor.

$$m_{pp} = 21.39 [Kg]$$

$$m_{pp} = 1.2 * 21.39 = 25.67 [Kg]$$

Se transformará las cargas distribuidas a cargas puntuales con la finalidad de obtener la carga total a la que estará sometido el puente y obtener el valor de las cargas lateral y longitudinal.

Carga de la cremallera

$$m_{cr} = L * w \quad (6)$$

Donde  $m_{cr}$  es la carga puntual de la cremallera [Kg], L es la distancia que recorre la carga distribuida [m] y w es el valor de la carga distribuida.

$$m_{cr} = 1.6 * 2.21 = 3.43 \text{ [Kg]}$$

Carga de las guías lineales

$$m_{gl} = 1.6 * 2.29 = 3.55 \text{ [Kg]}$$

Carga de los cables

$$m_{ca} = 1.8 * 1.67 = 3 \text{ [Kg]}$$

Sumando todas las cargas que actúan sobre el puente su valor es:

$$m_{pt} = m_{pp} + m_{cr} + m_{gl} + m_{ca}$$

$$m_{pt} = 25.67 + 3.43 + 3.55 + 3 = 35.65 \text{ [Kg]}$$

Este valor se le multiplica por el 10% para obtener la carga lateral y longitud que actuarán sobre el puente.

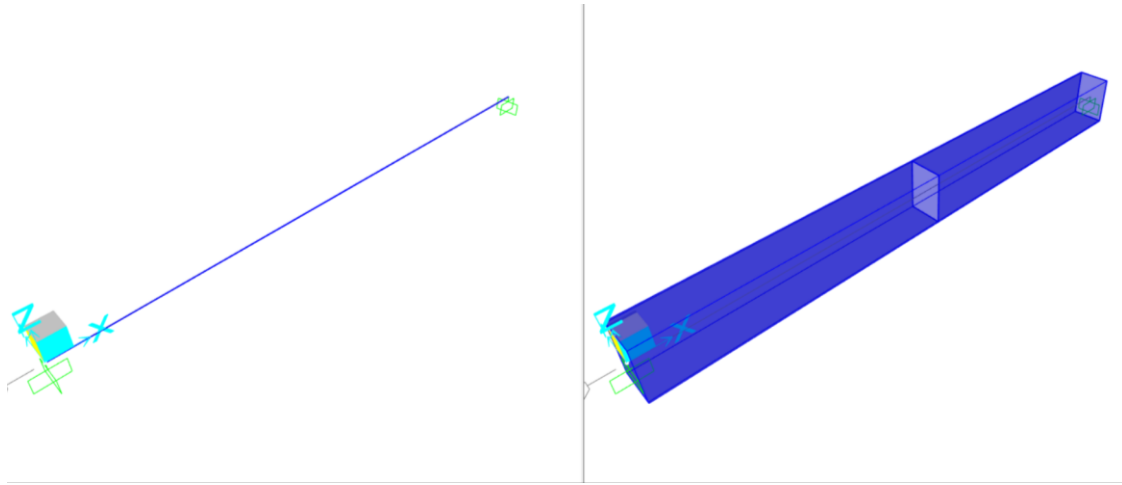
$$m_{pla} = m_{plo} = m_{pt} * 0.1$$

$$m_{pla} = m_{plo} = 35.65 * 0.1 = 3.565 \text{ [Kg]}$$

Conociendo las cargas a aplicarse se realizará un diseño del puente para su simulación en el software de análisis estructural que se puede verificar en la figura 76, 77, 78, 79 y 80, para seleccionar el tubo o perfil más óptimo con los que se cumpla el criterio de servicialidad y criterio de desplazamientos máximos.

**Figura 76**

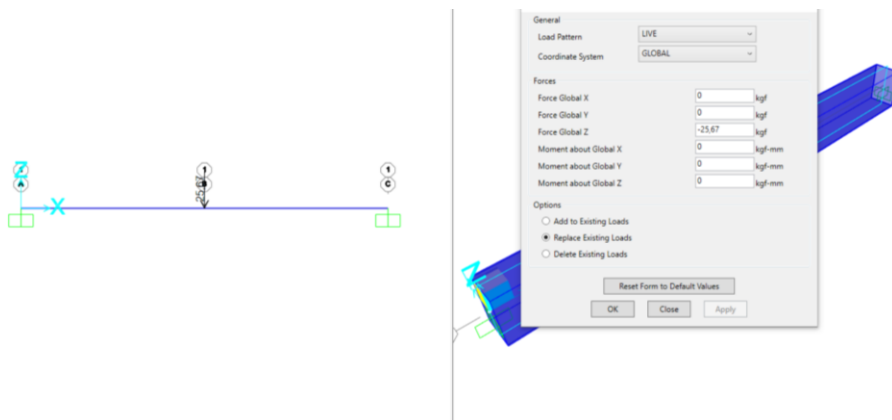
*Simulación del puente en el software de análisis estructural*



*Nota.* Vista estándar y la vista extruida del puente a simular.

**Figura 77**

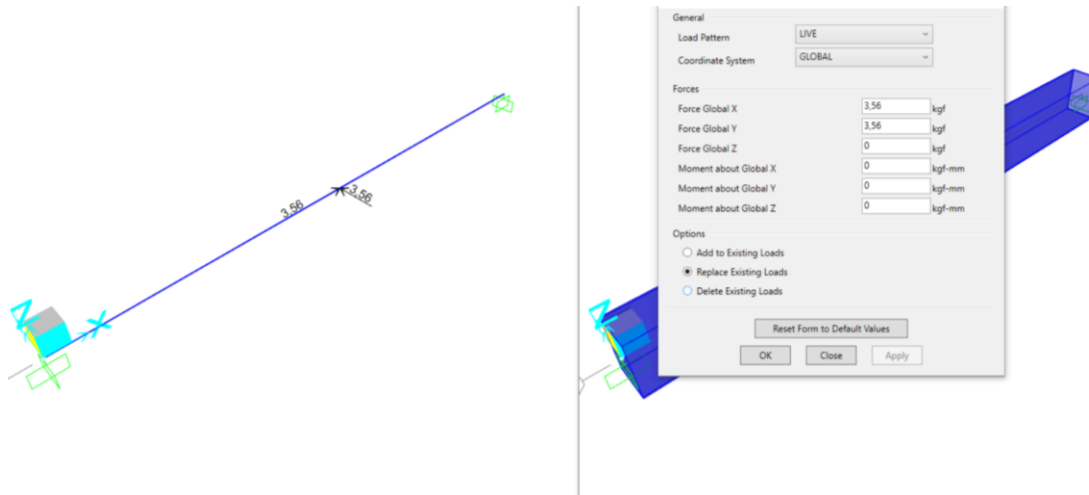
*Aplicación de la carga puntual en el punto medio.*



*Nota.* La carga aplicada en ese punto es una carga viva.

**Figura 78**

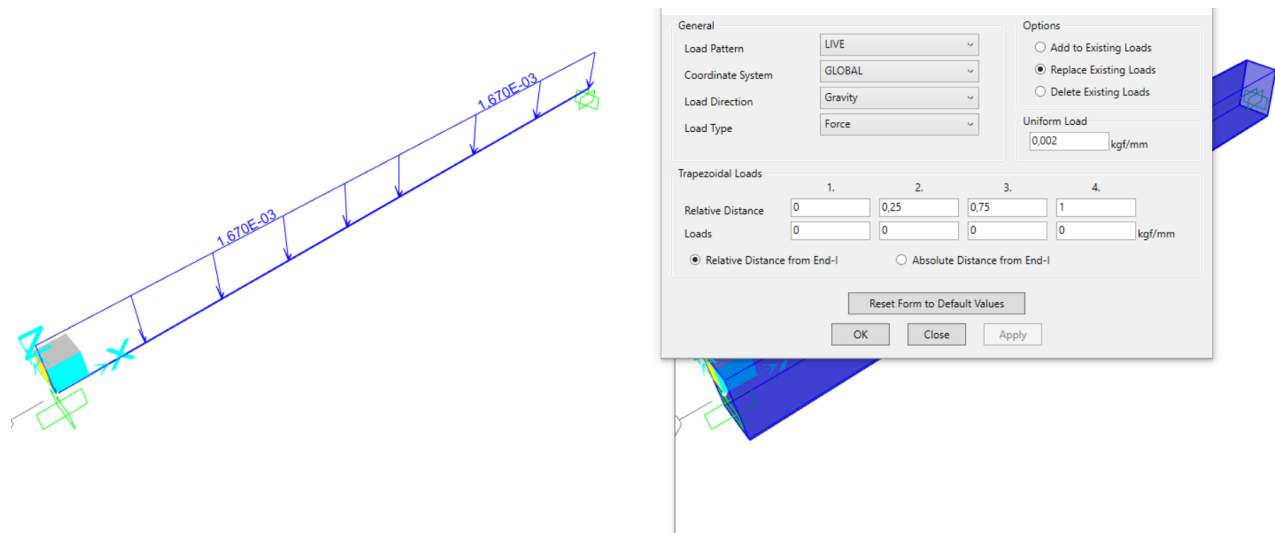
*Aplicación de la carga puntual de las cargas lateral y longitudinal.*



*Nota.* Las cargas tienen el mismo valor porque son el 10% de la carga total.

**Figura 79**

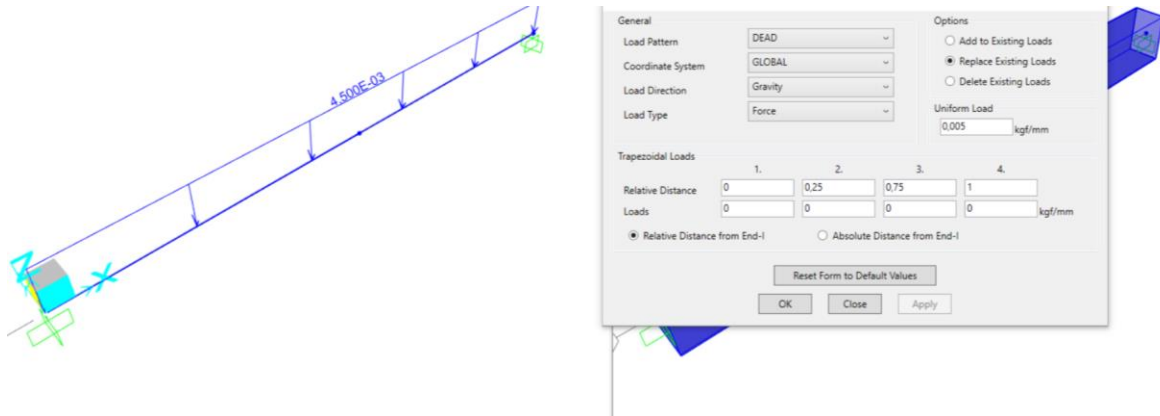
*Aplicación de la carga distribuida de la carga de los cables.*



*Nota.* Esta carga corresponde a una carga viva.

**Figura 80**

Aplicación de las cargas de la cremallera y las guías lineales.



*Nota.* Se colocó como una sola carga ya que son cargas muertas.

Para el análisis de desplazamientos se considera el desplazamiento en el eje Z, por la razón que es donde se aplica la mayor carga en ese sentido y tomando que en cuenta que el desplazamiento en este miembro estructural afectará en su totalidad a la altura del sistema, además que se considera lo mencionado por la CMAA, como resultado se consideró un criterio de  $L/1000$  y la longitud de los tubos rectangulares es 1800 [mm]. Los resultados se presentan en las figuras 81 y 82.

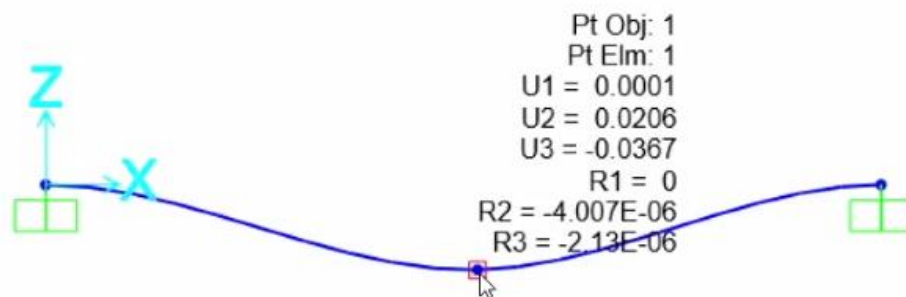
$$\frac{L}{1000}$$

$$\frac{3450}{1000} = 3.45mm$$



**Figura 81**

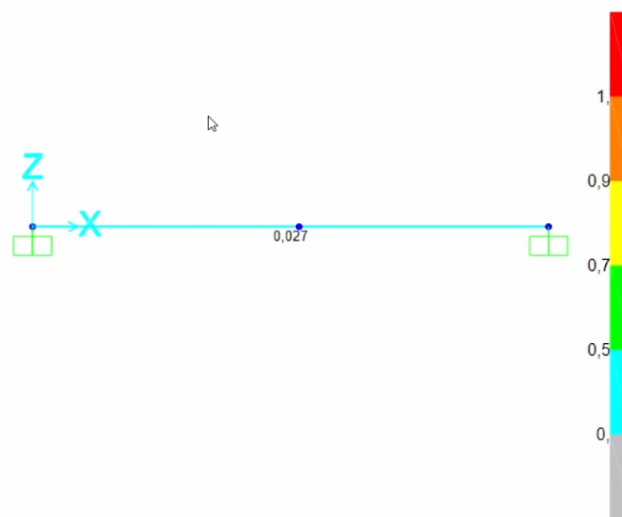
*Deformación del puente luego de aplicar las cargas correspondientes.*



*Nota.* El mayor desplazamiento en la simulación es de 0.036 [mm].

**Figura 82**

*Criterio de servicialidad en el puente.*



*Nota.* Se puede observar que el valor de servicialidad es muy bajo y no se tiene problemas en sobrepasar el límite.

Se puede observar en los resultados de deformaciones y servicialidad que los valores son muy bajos e incluso se puede seleccionar perfiles de menores dimensiones, pero por el factor constructivo ya que se necesita un gran peralte para el montaje de la cremallera y la guía lineal, se ha seleccionado el tubo rectangular de 150x50x2 [mm] para continuar con la construcción.

### ***Diseño CAD y CAE de elementos para el sistema CNC***

Para el diseño CAD y CAE de algunos elementos para la mesa se emplea el software CAE donde se diseñará las piezas necesarias y posteriormente se realizará un análisis según corresponda, con las cargas soportadas en cada uno de los elementos.

Para todos los elementos se desarrolló con una solución adaptativa por el método-h con un nivel de precisión del 99% y con un máximo número de bucles de 5. El método-h consiste en que la malla se va ajustar a la geometría de la pieza a ser analizada.

#### **Diseño y simulación de la placa de soporte del puente**

Las cargas que soportan estos elementos son las de la tabla 8 y 9 sumada la carga de la masa del perfil seleccionado, como se tiene dos apodos la carga total se dividirá para 2 y además de considerar las cargas lateral y longitudinal procedentes del puente.

Sumando todas las cargas que actúan sobre las placas de soporte son:

$$m_{pt} = m_{pp} + m_{cr} + m_{gl} + m_{ca} + m_v$$

Donde  $m_v$  es la carga de la viga seleccionada para el puente [Kg].

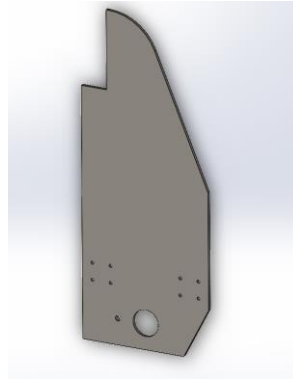
$$m_{pt} = 25.67 + 3.43 + 3.55 + 3 + 18.32 = 53.97 \text{ [Kg]}$$

Carga lateral y longitudinal del 10% de la carga total.

$$m_{pla} = m_{pt} = 53.97 * 0.1 = 5.4 \text{ [Kg]}$$

**Figura 83**

*Diseño CAD de la placa de soporte del puente*

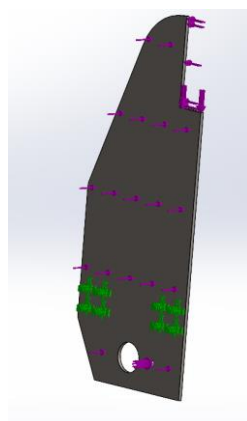


*Nota.* Se estableció la altura deseada y de desarrollo la geometría presentada.

Para el CAD de la figura 83 se consideró el material ASTM A36 y la colocación de sujeciones fijas a los agujeros de la placa que se unen con las guías lineales y la colocación de cargas total, lateral y longitudinal como se puede observar en la figura 84.

**Figura 84**

*Condiciones de simulación para la placa de soporte del puente.*

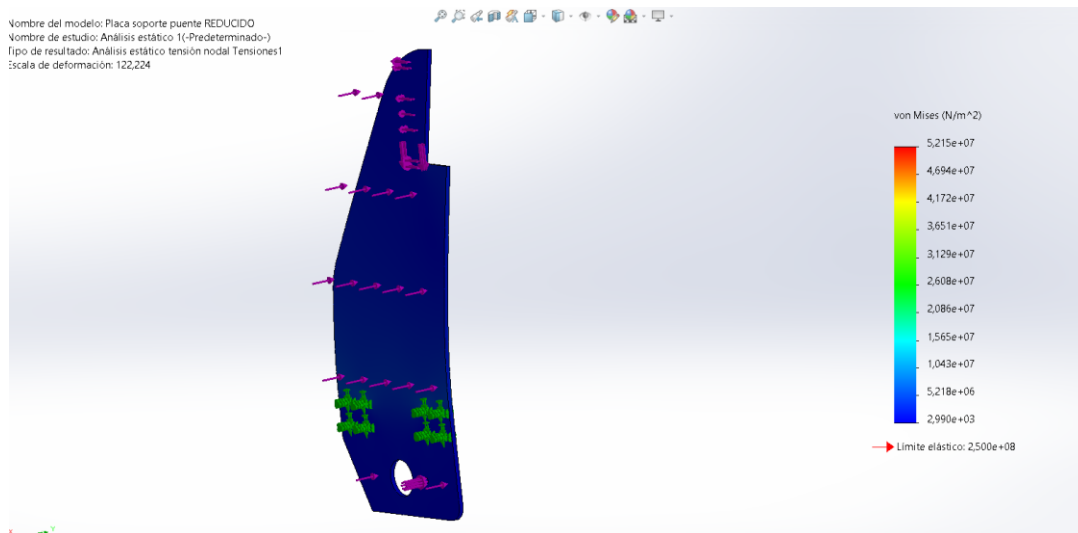


*Nota.* Las cargas se aplicaron en tres direcciones y las sujeciones están dentro de los agujeros.

En los resultados de la simulación se analizará la tensión de von Mises, los desplazamientos, el factor de seguridad y gráfico de convergencia, se pueden observar en las figuras 85, 86, 87 y 88.

### Figura 85

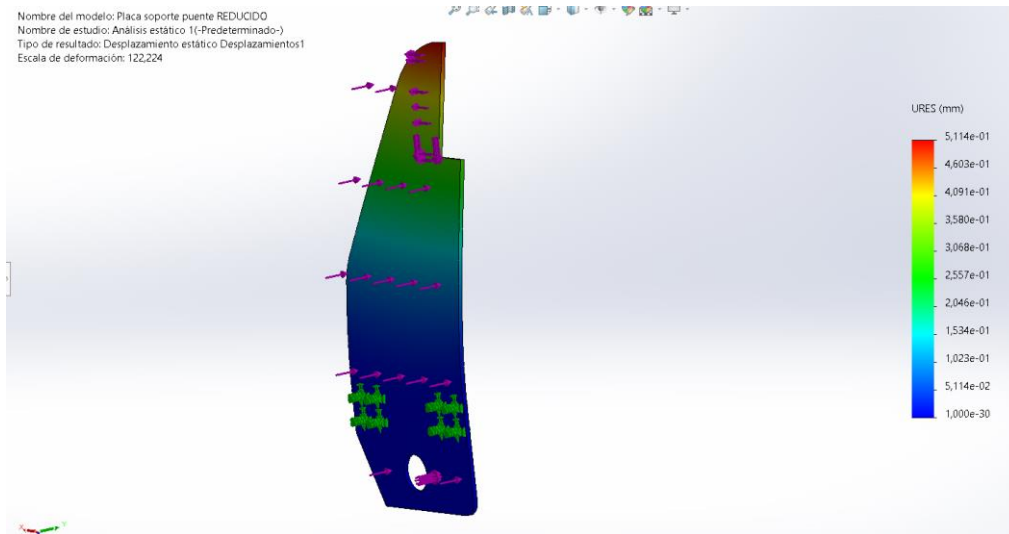
*Tensión de von Mises de la placa de soporte del puente.*



*Nota.* La mayor tensión presentada en la simulación es de 52.15 [MPa] y no supera el límite elástico del material asignado.

**Figura 86**

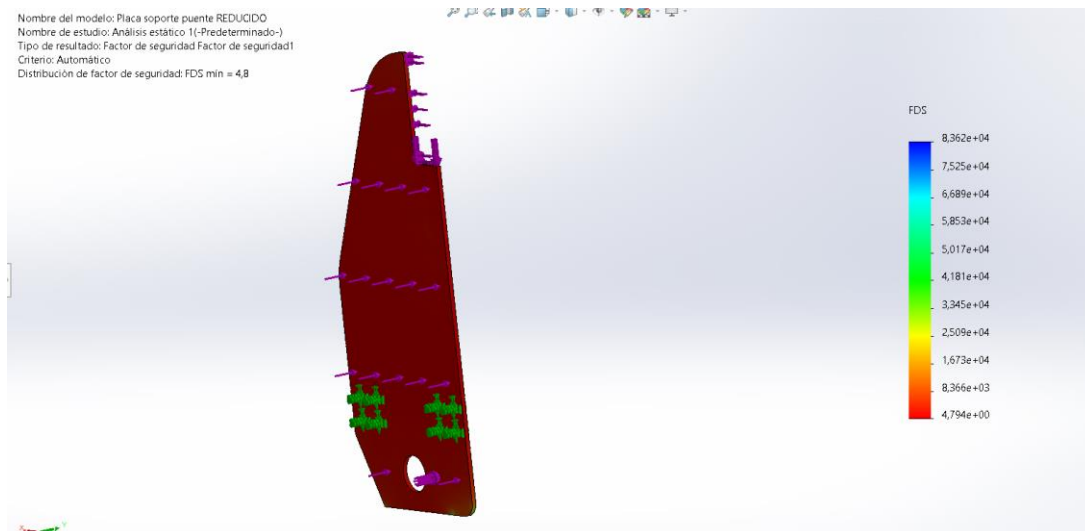
*Desplazamientos de la placa soporte del puente.*



*Nota.* El valor máximo de desplazamiento es de 0.511[mm].

**Figura 87**

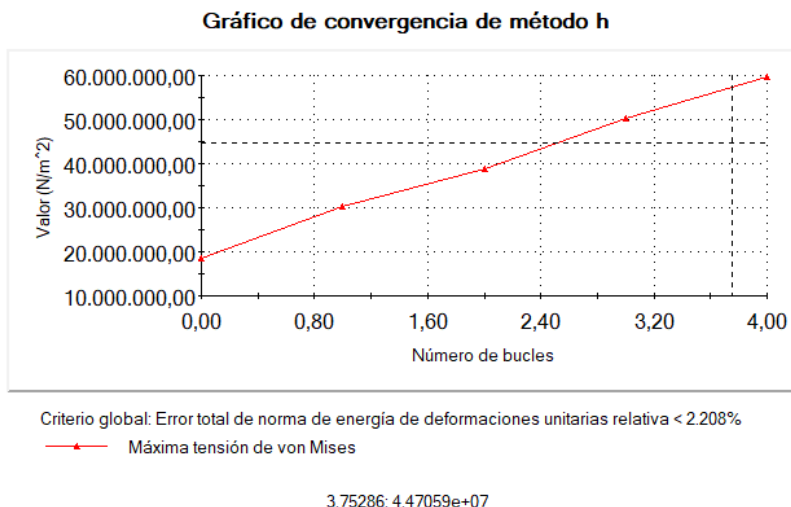
*Factor de seguridad de la placa soporte del puente*



*Nota.* El factor de seguridad presentado en la simulación es de 4.8.

## Figura 88

Gráfico de convergencia del método h de la placa soporte del puente



*Nota.* Se empleó un nivel de precisión del 99%.

El espesor de la placa seleccionada es de 6 [mm], mediante la simulación de distintos espesores se verificó que la geometría es capaz de soportar la carga a la cual estará sometida, donde no presentará problemas en tensión de von Mises, los desplazamientos provocados por la carga son mínimos y el factor de seguridad es tiene un valor de 4.8 lo cual es favorable para el tipo de funcionamiento del máquina ya que es un sistema de alta precisión, donde se busca reducir al mínimo las vibraciones producidas cuando el sistema se encuentre en movimiento.

### Diseño y simulación de la placa del soporte principal del eje Z

Esta placa se diseñará para soportar las cargas del eje Z presentes en la tabla 13 cuyo diseño CAD se puede ver en la figura 89, y el motor correspondiente al eje X y sus elementos de montaje los cuales se pueden observar en la tabla 14.

**Tabla 13***Cargas del eje Z*

No.	Elemento	Cantidad	Peso	Total
1	Mesa deslizante	1	3,37 Kgf	3,37 Kgf
2	Antorcha	1	0,6 Kgf	0,60 Kgf
3	Cabezal flotante	1	1 Kgf	1,00 Kgf
4	Placa de soporte 2	1	1,36 Kgf	1,36 Kgf
5	Tapa del eje z	1	2 Kgf	2,00 Kgf
6	Tapa del cabezal	1	0,5 Kgf	0,50 Kgf
Carga total				8.83 Kgf

*Nota.* Elementos del eje Z.

Sumando todas las cargas que actúan sobre la placa del soporte principal del eje Z:

$$m_{eZ} = 8.83 [Kg]$$

**Tabla 14***Cargas de los elementos para el montaje del motor del eje X*

No.	Elemento	Cantidad	Peso	Total
1	Motores nema	1	1,65 Kgf	1,65 Kgf
2	Tensores de motor	1	1.5 Kgf	1,5 Kgf
3	Ventiladores	2	0.15 Kgf	0,3 Kgf
Carga total				3,45 Kgf

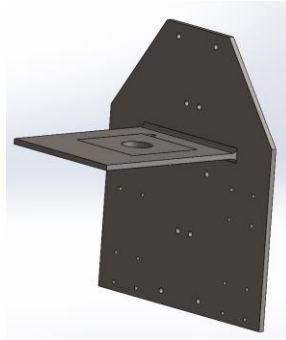
*Nota.* Elementos del eje X.

Sumando los elementos que estarán apoyados sobre la base del motor del eje X:

$$m_{eX} = 3.45 [Kg]$$

**Figura 89**

*Diseño CAD de la placa de soporte principal del eje Z.*

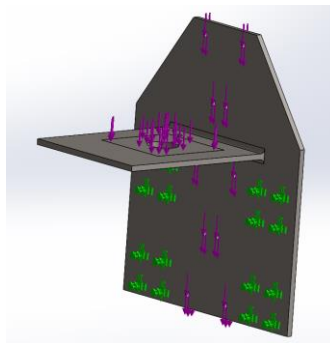


*Nota.* Se consideraron las dimensiones de montaje.

Para el análisis de la placa se consideró el material ASTM A36 y la colocación de sujeciones fijas a los agujeros y asignación de cargas del eje Z y del eje X, se puede observar en la figura 90.

**Figura 90**

*Condiciones de simulación para la placa de soporte principal del eje Z.*



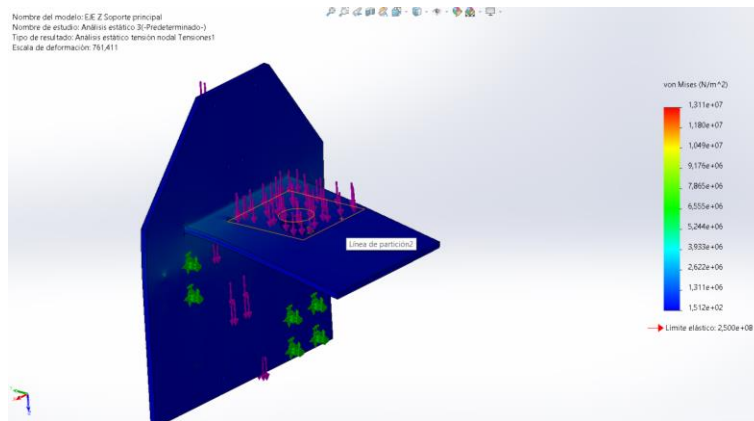
*Nota.* Las cargas se asignaron en la placa horizontal y en los agujeros de montaje del eje Z.



En los resultados de la simulación se analizará la tensión de von Mises, los desplazamientos, el factor de seguridad y gráfico de convergencia se pueden observar en las figuras 91, 92, 93 y 94.

### Figura 91

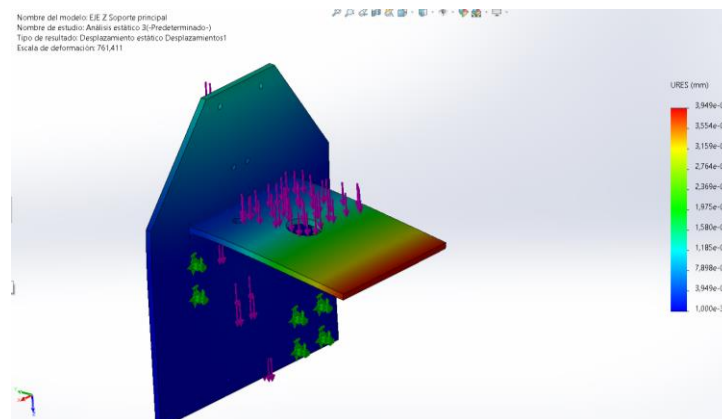
*Tensión de von Mises de la placa de soporte principal del eje Z.*



*Nota.* La mayor tensión presentada en la simulación es de 13.11 [MPa].

### Figura 92

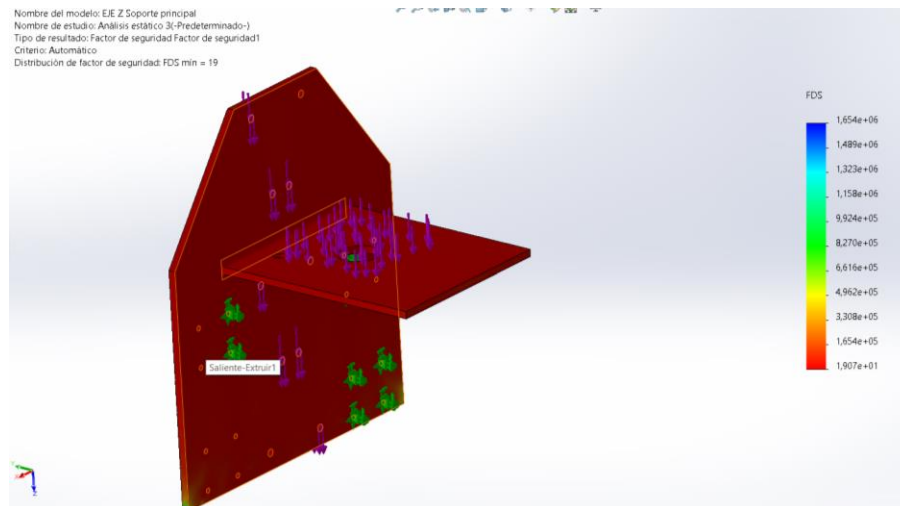
*Desplazamientos de la placa de soporte principal del eje Z.*



*Nota.* El valor máximo de desplazamiento es de 0.039 [mm].

## Figura 93

*Factor de seguridad de la placa de soporte principal del eje Z.*

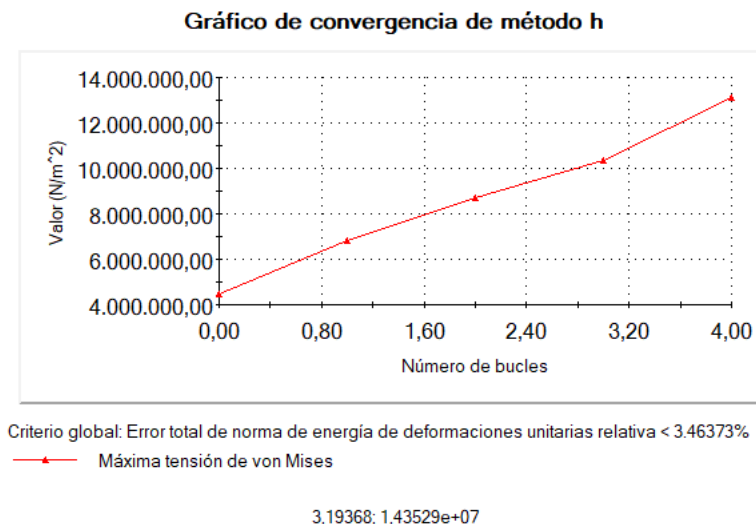


*Nota.* El factor de seguridad presentado en la simulación es de 19.

El espesor de la placa seleccionada es de 6 [mm], por rigidez y factor constructivo se designó el mismo espesor de la placa del soporte del puente, y se puede verificar que los resultados en von Mises, desplazamientos y factor de seguridad son óptimos para soportar las cargas, considerando el factor de seguridad es elevado a razón de la geometría y facilidad de montaje del resto de elementos, los desplazamientos producidos al seleccionar la placa de 6 [mm] son mínimos lo que permite que no exista un mayor desplazamiento del sistema en conjunto.

**Figura 94**

*Gráfico de convergencia del método h de la placa de soporte principal del eje Z.*



*Nota.* Se empleó un nivel de precisión del 99%.

### **Diseño y simulación de la placa del soporte secundario del eje Z**

Esta placa se diseñará para soportar las cargas de algunos elementos del eje Z y esta placa estará montada sobre el husillo del eje Z. Las cargas que necesita soportar se presentan en la tabla 15 y 16. El diseño CAD de la placa se puede observar en la figura 95.

**Tabla 15**

*Cargas sobre la placa del soporte secundario del eje Z*

No.	Elemento	Cantidad	Peso	Total
1	Antorcha	1	0,6 Kgf	0,60 Kgf
2	Cabezal flotante	1	1 Kgf	1,00 Kgf
			Carga total	1,6 Kgf

*Nota.* Elementos que se encuentran sobre la placa secundaria del eje Z.

$$m_{esZ} = 1.6 [Kg]$$

**Tabla 16**

*Cargas de los elementos para el montaje del motor del eje X*

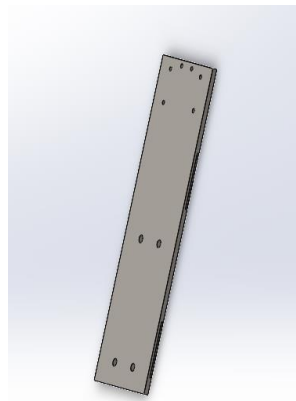
No.	Elemento	Cantidad	Peso	Total
1	Tapa del cabezal	1	0,5 Kgf	0,5 Kgf
			Carga total	0,5 Kgf

*Nota.* Esta carga será aplicada en uno de los extremos de la placa porque está montada con bisagras.

$$m_{eZt} = 0.5 [Kg]$$

**Figura 95**

*Diseño CAD de la placa de soporte secundario del eje Z.*

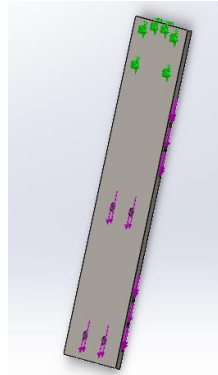


*Nota.* Se consideraron las dimensiones de montaje.

Para el análisis de la placa se consideró el material ASTM A36 y las sujeciones fijas están en los agujeros superiores y las cargas en los agujeros inferiores y extremo derecho. Se pueden observar en las figuras 96, 97, 98, 99 y 100 el análisis realizado en el software CAE.

**Figura 96**

Condiciones de simulación para la placa de soporte secundario del eje Z.

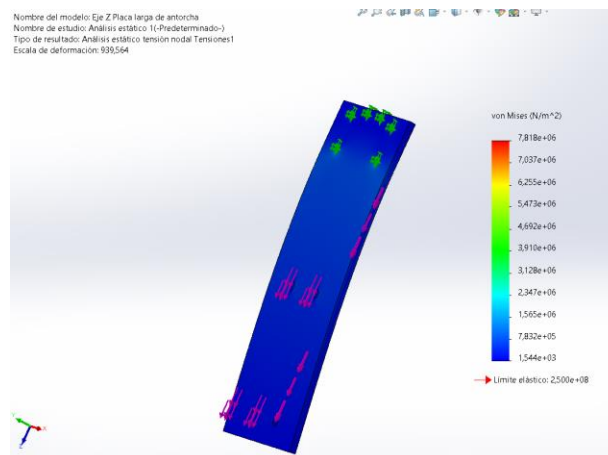


*Nota.* Las cargas se asignaron en sentido contrario de la dirección del eje Z.

En los resultados de la simulación se analizará la tensión de von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad.

**Figura 97**

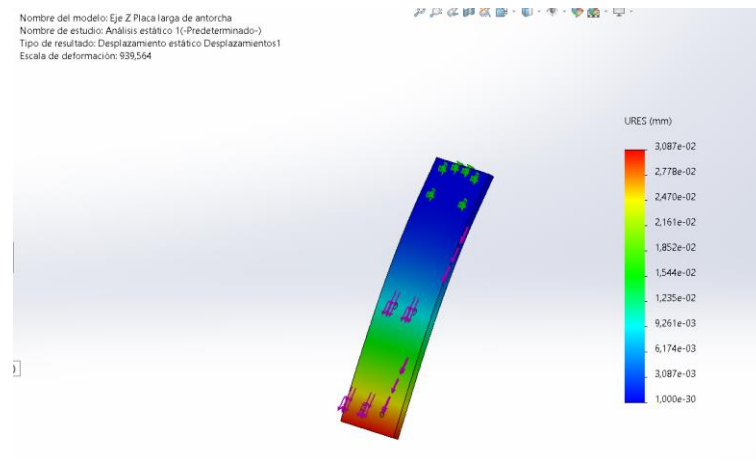
Tensión de von Mises de la placa de soporte secundario del eje Z.



*Nota.* La mayor tensión presentada en la simulación es de 7.8 [MPa].

## Figura 98

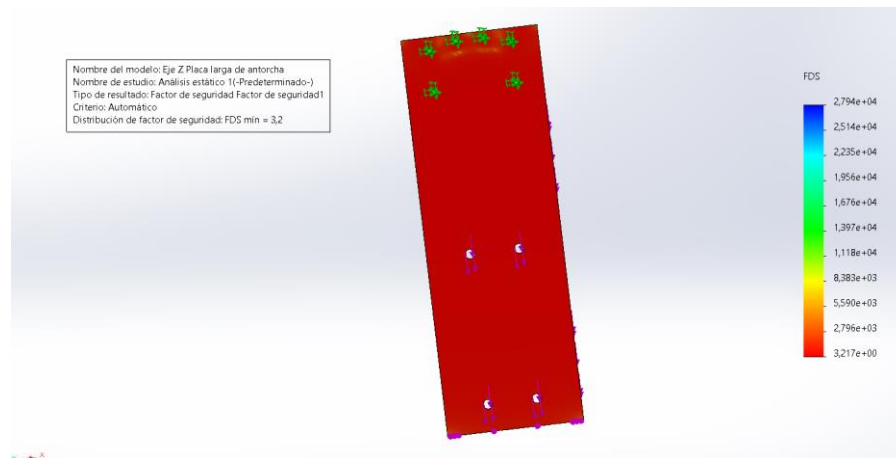
*Desplazamientos de la placa de soporte secundario del eje Z.*



*Nota.* El valor máximo de desplazamiento es de 0.03087 [mm].

## Figura 99

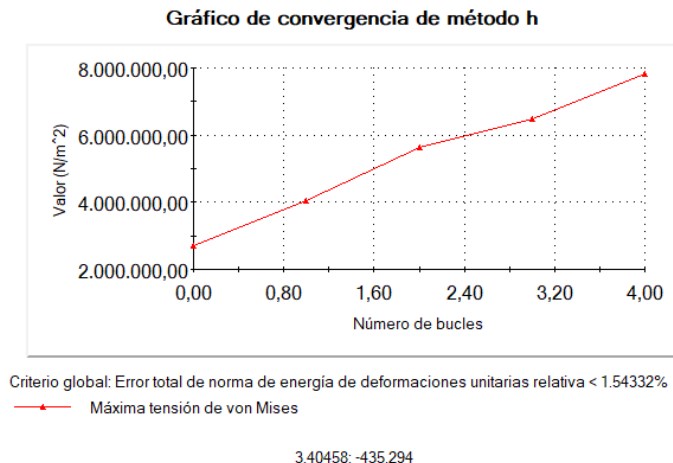
*Factor de seguridad de la placa de soporte secundario del eje Z.*



*Nota.* El factor de seguridad presentado en la simulación es de 3.2.

## Figura 100

Gráfico de convergencia del método h del soporte secundario del eje Z.



*Nota.* Se empleó un nivel de precisión del 99%.

De igual manera el espesor de la placa seleccionada es de 6 [mm], por rigidez y factor constructivo se designó el mismo espesor que en las anteriores placas y se puede observar en los resultados en von Mises, desplazamientos y factor de seguridad. Considerando el factor de seguridad es de 3.2 el cual es óptimo ya que este elemento está sometido a cargas laterales las cuales son el 20% de la carga máxima tal como menciona la ASCE para grúas, por otro lado, los desplazamientos no son muy elevados por lo cual es beneficioso por lo que el sistema necesita una alta precisión.

### Diseño y simulación zapatas para el bastidor

Las zapatas son elementos que se colocarán en cada una de las bases de las columnas para posteriormente colocar un tornillo de potencia y que permitirá la nivelación de la mesa cuando se encuentre en un piso o suelo que esté a diferente altura, el modelo de las zapatas se encuentra en la figura 101.

Las cargas soportadas por las zapatas del bastidor será la masa total de todo el sistema incluso cuando se encuentre cargada la masa de la cama de agua, la masa de la plancha de acero y cuyo valor total es de 2100 [Kg]. Como se tiene 6 columnas o patas el valor total de la masa se divide para 6 y el resultante es de:

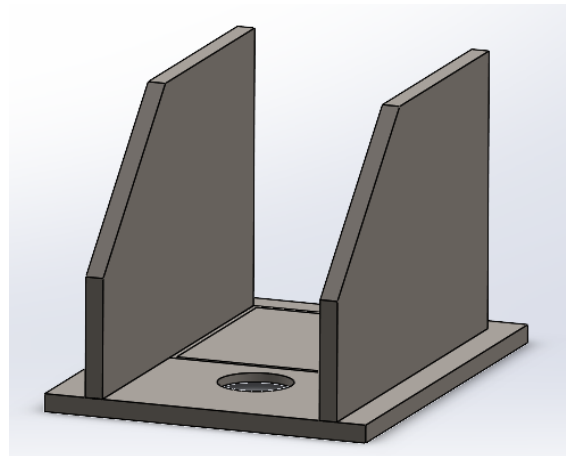
$$m_{za} = 350 \text{ [Kg]}$$

Tomando en cuenta una carga lateral cuyo valor sea el 10% de carga aplicada a cada columna.

$$m_{zla} = 350 * 0.1 = 35 \text{ [Kg]}$$

### Figura 101

*Diseño CAD de las zapatas para las columnas del bastidor.*



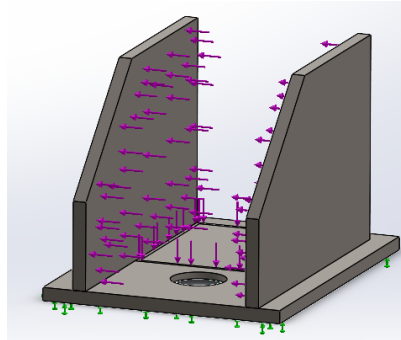
*Nota.* Se consideraron las dimensiones de las columnas.

Para el análisis de la placa se consideró el material ASTM A36 y las sujeciones fijas están en la base y cargas en la cara superior y la cara lateral de la zapata. Lo cual se puede confirmar en la figura 102.



## Figura 102

Condiciones de simulación para la zapata.

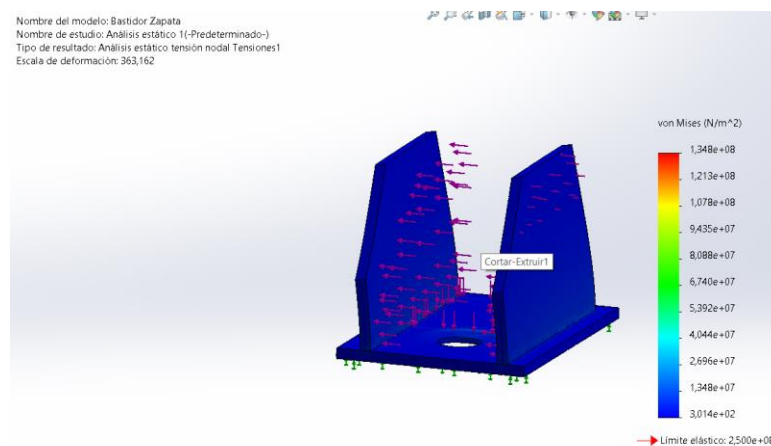


*Nota.* Las cargas se asignaron en sentido contrario de la dirección del eje Z y de forma lateral.

En los resultados de la simulación se analizará la tensión de von Mises, los desplazamientos, el factor de seguridad y gráfico de convergencia se pueden observar en la figura 103, 104, 105 y 106.

## Figura 103

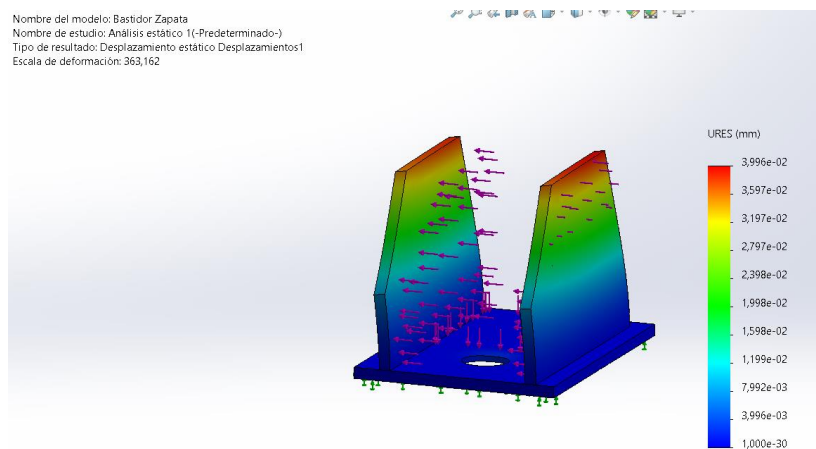
Tensión de von Mises de la zapata.



*Nota.* La mayor tensión presentada en la simulación es de 134,8 [MPa].

## Figura 104

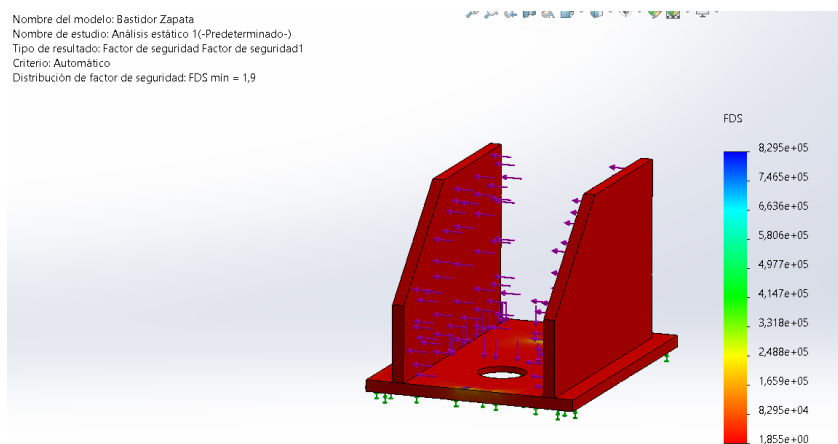
### Desplazamientos de la zapata.



*Nota.* El valor máximo de desplazamiento es de 0.039 [mm].

## Figura 105

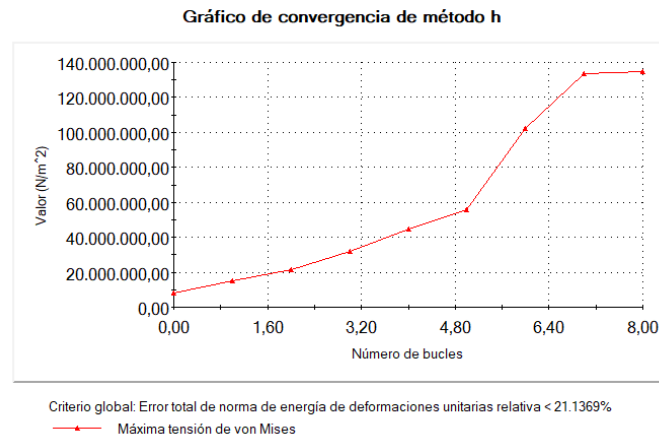
### Factor de seguridad de la zapata.



*Nota.* El factor de seguridad presentado en la simulación es de 1,9.

## Figura 106

Gráfico de convergencia del método h de la zapata.



*Nota.* Se empleó un nivel de precisión del 99% se puede observar que converge.

Todas las placas que conforman la zapata están diseñadas con placas de 6 [mm] de espesor, y cómo se pueden observar en los resultados tanto en von Mises, desplazamientos y factor de seguridad, todos son adecuados para soportar las cargas a las que estarán sometidas cuando la mesa CNC se encuentre en su máxima carga.

### Diseño y simulación cabezal deslizante

Es un conjunto de elementos de distintos materiales, donde se sujetará la antorcha de corte por arco de plasma y por medio del husillo del eje Z este cabezal deslizante permitirá el movimiento vertical de la antorcha para el corte de planchas de acero al carbono de distintos espesores o incluso poder cortar tubos rectangulares.

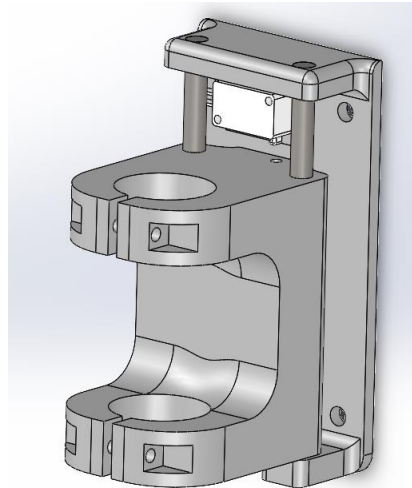
Este conjunto estará conformado por la base del bastidor del cabezal, el porta antorcha, los rieles y el fin de carrera, se puede observar en la figura 107.

La carga a la que estará sometido este conjunto netamente se basa en la masa de la antorcha para el corte por arco de plasma donde su valor es de:

$$m_{CD} = 0.6 [Kg]$$

### Figura 107

*Diseño CAD del cabezal deslizante.*

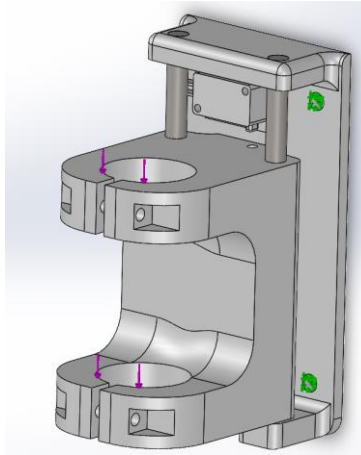


*Nota.* Se consideran las de las dimensiones de la antorcha.

Para el análisis de la placa se consideró el material ASTM A36 para los rieles y para la base y el porta antorcha se realizará el proceso de impresión 3D en cuyo material será PLA, y las sujeciones fijas se encuentran en los agujeros de la base y la carga en el interior de sujeción del porta antorcha, que se encuentran expuestas en la figura 108.

**Figura 108**

*Condiciones del cabezal deslizante.*

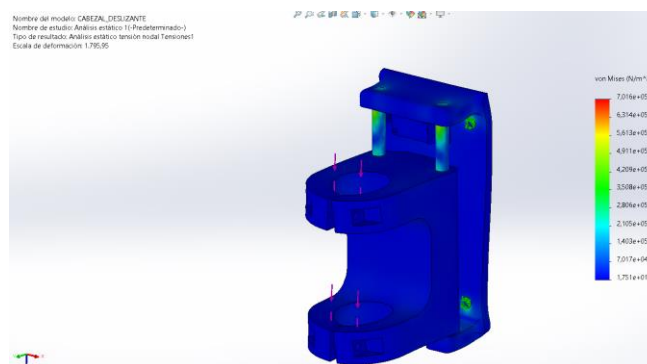


*Nota.* Las cargas se asignaron en sentido contrario de la dirección del eje Z.

En los resultados de la simulación se analizará la tensión de von Mises, los desplazamientos, el factor de seguridad y gráfico de convergencia se pueden observar en las figuras 109, 110, 111 y 112.

**Figura 109**

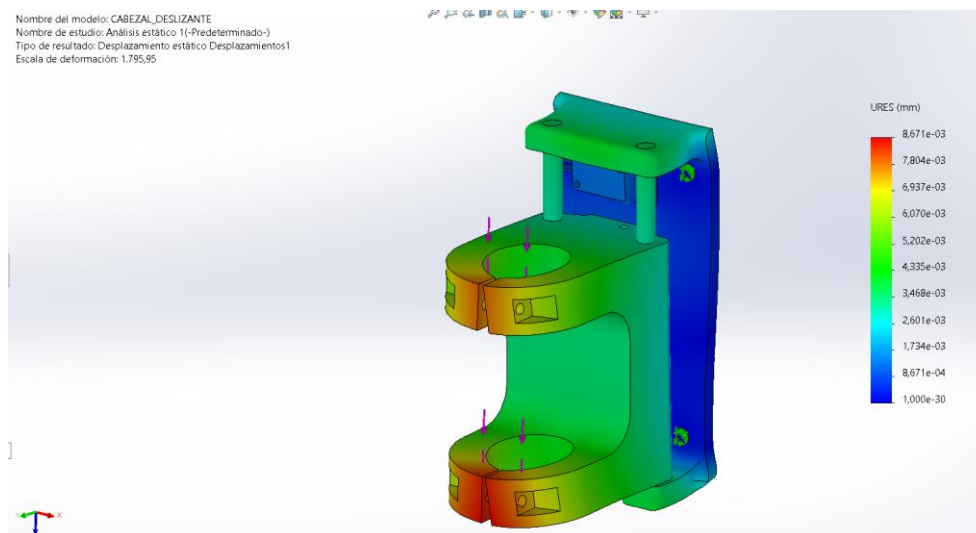
*Tensión del cabezal deslizante.*



*Nota.* La mayor tensión presentada en la simulación es de 0.701 [MPa].

## Figura 110

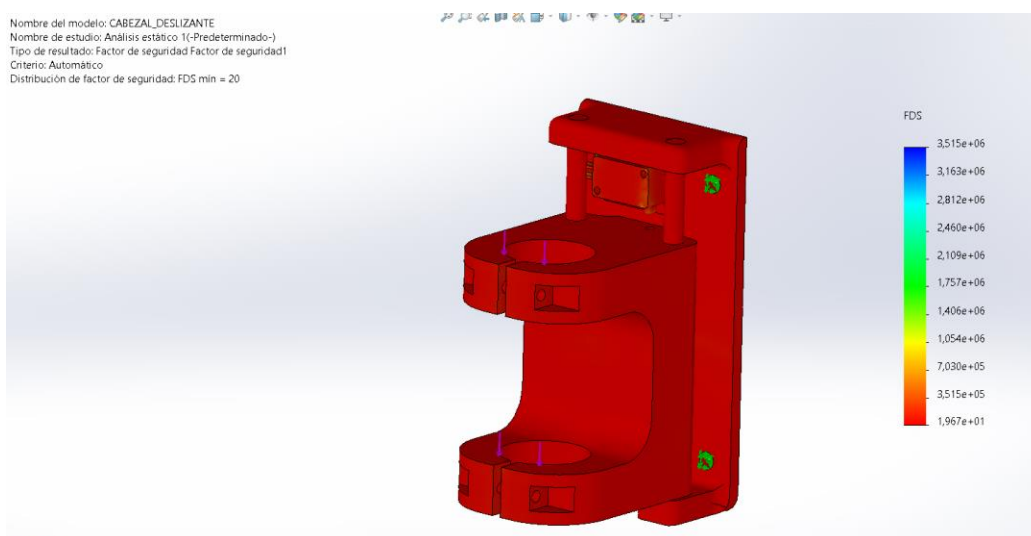
*Desplazamientos del cabezal deslizante.*



*Nota.* El valor máximo de desplazamiento es de 0.008 [mm].

## Figura 111

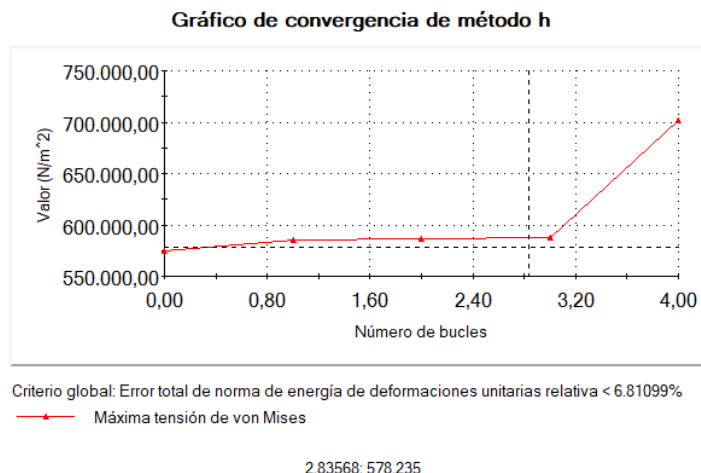
*Factor de seguridad del cabezal deslizante.*



*Nota.* El factor de seguridad presentado en la simulación es de 20.

## Figura 112

Gráfico de convergencia del método h del cabezal deslizante



*Nota.* Se empleó un nivel de precisión del 99%.

Además de los resultados presentados se debe considerar el espesor de impresión el cual será de 0.12 [mm], el cual es el valor mínimo que permite el equipo de impresión 3D y se debe considerar el factor térmico por el motivo que PLA es muy sensible a altas temperaturas, pero considerando que la antorcha no se sujetará del extremo sino un poco más distante a la zona afectada por calor sería mínima en el porta antorcha.

En muchos de los elementos simulados se puede observar en el gráfico de convergencia del método adaptativo h no convergen, pero eso puede ser justificado por la razón que se empleó un nivel de precisión del 99% y con un número de 5 bucles, por ese motivo los resultados presentados en tensiones de von Mises, desplazamientos y factor de seguridad son confiables.

### **Diseño del sistema de transmisión piñón-cremallera para los ejes X y Y**

Se partirá con los cálculos del sistema de transmisión piñón-cremallera del eje Y, dado que es el sistema que más carga soportara, además cabe mencionar que se colocara el sistema de transmisión a los dos lados de la mesa.

Para comenzar los cálculos para la selección de piñón-cremallera se debe conocer ciertas condiciones mecánicas como explica en el catálogo de transmisiones por cremallera piñón (KOOM, 2019), las cuales son la masa a desplazar, velocidad, aceleración y el coeficiente de seguridad para obtener las fuerzas corregidas y poder utilizar las tablas correspondientes para la selección del módulo más adecuado. También se debe definir el tipo de piñón que se desea el cual puede ser recto o helicoidal. Para el sistema de transmisión del proyecto se ha elegido un sistema de transmisión helicoidal tanto para el eje X y Y.

#### **Diseño del sistema de transmisión piñón-cremallera para el eje Y**

La masa que tendrá que soportar el sistema está presentada en la tabla 9, donde se establecen los elementos y masas de los mismos que estarán cargados sobre el piñón-cremallera.

$$m_{pb} = 96.78 [Kg]$$

Para la selección de velocidad y aceleración que se desea en el sistema se realizó una búsqueda externa de equipos similares al proyecto en desarrollo y se obtuvo los valores de velocidad y aceleración, para determinar una media de dichos valores que se presentan en la tabla 17 y establecerlos para el diseño del sistema de transmisión.



Tabla 17

Valores de velocidad y aceleración de máquinas plasma CNC

	Velocidad	Aceleración
Plasma CNC de STANSER	0,1185 m/s	
Plasma CNC de IPlasmaCNC	0,338 m/s	
Plasma CNC de BuyCNC	0,25 m/s	
Plasma CNC de UNREALCNC	0,333 m/s	
Plasma CNC de QustomCNC	0,133 m/s	
Plasma CNC de HUAFEI CNC	0,1 m/s	
Plasma CNC de Techmo CNC	0,15 m/s	0,5 m/s ^2
Corte por plasma manual	0,083 m/s	0,4 m/s ^2
Valores convencionales	0,333 m/s	0,2 m/s ^2
Planet CNC	0,04 m/s	0,025 m/s ^2
Tesis ESPE	0,025 m/s	0,4 m/s ^2
Tesis ESPEL	0,06667 m/s	0,4 m/s ^2
Tesis UIDE	0,25 m/s	0,6 m/s ^2
Resultados	0,17078231 m/s	0,36071429 m/s ^2

Nota. Búsqueda externa de diferentes fabricantes y proyectos de grado.

Como se puede observar la media de velocidad es 0,17 [m/s] y la media de aceleración es de 0,36 [m/s<sup>2</sup>]. Por lo tanto, para el proyecto se asignan los siguientes valores:

Para velocidad.

$$v = 0.2 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Para aceleración:

$$a = 0.4 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

Para el coeficiente de seguridad se obtendrá de la tabla 18.

**Tabla 18**

*Coeficiente de seguridad*

Tiempo de trabajo	Tipo de carga		
	Uniforme	Moderada	Pesada
Ocasional (1/2 hora)	1.5	1.8	2.3
Intermitente (3 horas)	1.8	2	2.5
8-10 horas	2	2.25	2.8
24 horas	2	2.5	3

*Nota.* Tabla obtenida de (KOOM, 2019).

Donde seleccionará un tipo de carga moderada y para un tiempo de trabajo intermitente, para lo cual el valor del coeficiente es de:

$$K = 2$$

Definido estos parámetros se considerará como actuara el sistema de transmisión piñón-cremallera como menciona (Tecnopower, 2020) se puede tener una manipulación horizontal o una elevación vertical donde las ecuaciones para los cálculos dependen de cómo se vaya a realizar el movimiento. Para el caso del proyecto se tiene que es un movimiento horizontal y está dado por la ecuación 7 que corresponde a la fuerza tangencial real horizontal.

$$F_{ht} = m * (9.81 * \mu + a) \quad (7)$$

Donde,  $F_{ht}$  es la fuerza tangencial horizontal teórica [N],  $m$  es la masa a trasladar [Kg],  $a$  es la aceleración lineal [ $m/s^2$ ] y  $\mu$  es el coeficiente de rozamiento.

Por el catálogos se obtiene el valor de:

$$\mu = 0.15$$

$$F_{ht} = 96.78 * (9.81 * 0.15 + 0.4) = 181.124 \text{ [N]}$$

Posteriormente se calcula la fuerza tangencial corregida dada por la ecuación 8.

$$F_{hc} = F_{ht} * K \quad (8)$$

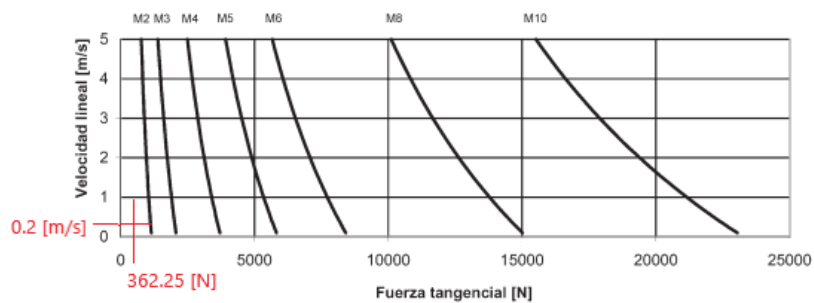
Donde,  $F_{hc}$  es la fuerza tangencial horizontal corregida [N] y K es el coeficiente de seguridad.

$$F_{hc} = 181.124 * 2 = 362.248 \text{ [N]}$$

Considerando la velocidad y la fuerza tangencial se verifica en la figura 113 para piñón helicoidal el módulo necesario para dichos valores.

### Figura 113

*Diagrama de selección del módulo del dentado helicoidal.*



*Nota.* Tabla obtenida de (KOOM, 2019).

En la figura 113 se puede observar que no existe un cruce de los valores obtenidos con las curvas de módulos establecidos, pero se puede asignar un de 1,5 [mm].

A continuación, se desarrollan los cálculos correspondientes a los datos del piñón. Donde  $m_n$  es módulo normal [mm],  $\Psi$  es el ángulo de hélice [°],  $\phi_n$  es el ángulo de presión [°],  $m$  es el módulo [mm],  $d_e$  es el diámetro exterior [mm],  $a$  es el adendum [mm],  $b$  es el dedendum [mm],  $d_p$  es el diámetro de paso [mm],  $p_n$  es el paso circular normal [mm],  $p_a$  es el paso axial [mm],  $z$  es el número de dientes [dientes] y  $B_p$  es el ancho del piñón [mm].

$$\Psi = 19.52 [^\circ]$$

$$\phi_n = 20 [^\circ]$$

$$m = \frac{m_n}{\cos(\Psi)} = \frac{1.5}{\cos(19.52)} = 1.591 \text{ mm}$$

El diámetro exterior está restringido por un espacio máximo de 35 mm. Por lo tanto, se determinarán los valores para este diámetro.

$$d_e = 34 [mm]$$

$$a = m_n = 1.5 [mm]$$

$$b = 1.25 * m_n = 1.875 [mm]$$

$$d_p = d_e - 2 * a = 34 - 2 * 1.5 = 31 [mm]$$

$$z = \frac{d_p}{m} = 19.484 \approx 20 [\text{dientes}]$$

$$d_p = z * m = 20 * 1.591 = 31.822 [mm]$$

$$de = dp + 2 * a = 31.822 + 2 * 1.5 = 34.822 \text{ [mm]}$$

Con módulo normal de 1,5 [mm] y 20 dientes se cumple el diámetro máximo permitido por espacio disponible de 35 [mm].

$$pn = \pi * mn = \pi * 1.5 = 4.712 \text{ [mm]}$$

$$pa = \frac{pn}{\sin(\Psi)} = \frac{4.712}{\sin(19.52)} = 14.131 \text{ [mm]}$$

$$Bp = 1.25 * pa = 1.25 * 14.131 = 17.663 \text{ [mm]}$$

$$Pd = \frac{1}{m} = 0.629$$

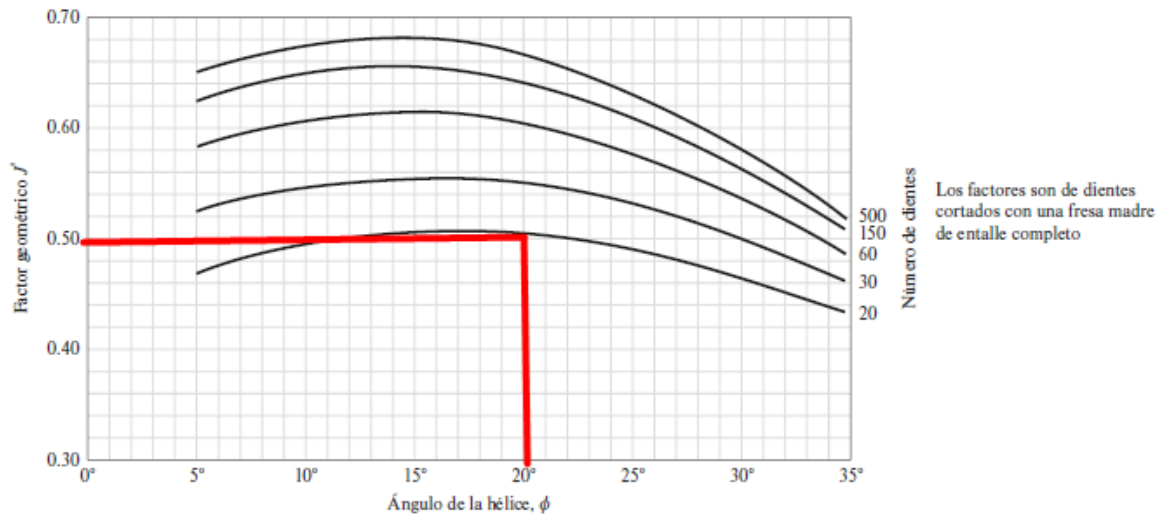
Se verificará la resistencia del piñón a la flexión AGMA, la cual está dada por la ecuación 9. Y donde sus factores se presentan en las figuras 114, 115 y en las tablas 19 y 20.

$$\sigma_b = \frac{F_t * P}{Bp * J} * Ko * Kv * Ks * Km * KB \quad (9)$$

Donde  $F_t$  es la fuerza tangencial,  $P$  es el paso diametral transversal,  $Bp$  es el ancho del piñón,  $Ko$  factor de sobrecarga,  $Kv$  factor dinámico,  $Ks$  es el factor de tamaño,  $Km$  es el factor de distribución de carga,  $KB$  es el factor de arco y  $J$  es el factor geométrico para engranajes helicoidales.

Figura 114

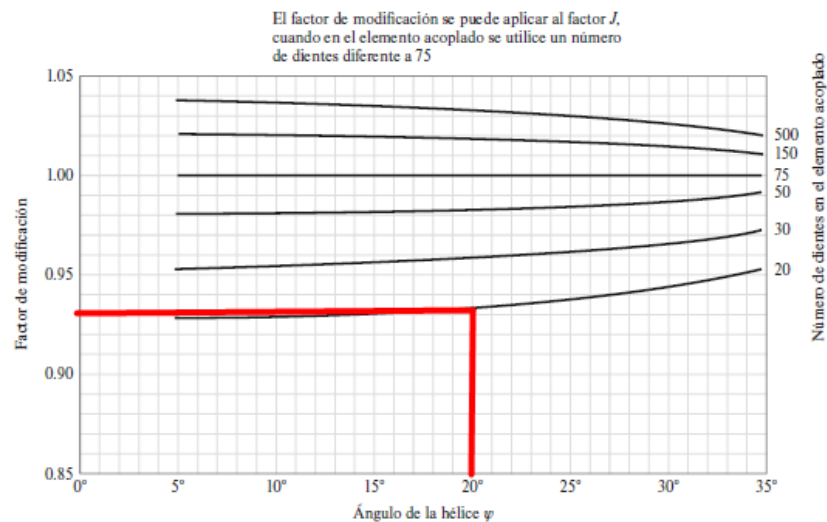
Factor Geométrico para engranajes helicoidal



Nota. Gráfica obtenida de (Budynas, 2018).

Figura 115

Corrección del factor geométrico para engranajes helicoidales



Nota. Gráfica obtenida de (Budynas, 2018).

$$J = 0.5 * 0.93 = 0.465$$

Para el factor  $K_o$  se obtiene mediante la siguiente tabla

**Tabla 19**

*Tabla de factores de sobrecarga  $K_o$ .*

<b>Máquina impulsada</b>			
Fuente de potencia	Uniforme	Impacto moderado	Impacto pesado
Uniforme	1.00	1.25	1.75
Impacto ligero	1.25	1.50	2.00
Impacto medio	1.5	1.75	2.25

*Nota.* Tabla obtenida de (Budynas, 2018).

$$K_o = 1.5$$

El factor dinámico se calcula por medio de la ecuaciones

$$B = 0.25 * (A_v - 5)^{0.665} \quad (10)$$

Donde B es factor numérico, y  $A_v$  es la calidad de fabricación.

$$A_v = 10$$

$$B = 0.25 * (10 - 5)^{0.665} = 0.729$$

$$A = 3.5637 + 3.9914 * (1 - B) \quad (11)$$

Donde A es un factor numérico.

$$A = 3.5637 + 3.9914 * (1 - 0.729) = 4.645$$

$$Kv = \left( \frac{A + \sqrt{v}}{A} \right) \quad (12)$$

$$Kv = \left( \frac{4.645 + \sqrt{0.2}}{4.645} \right) = 1.069$$

**Tabla 20**

Factor de tamaño  $K_s$

Paso diametral, Pd	Módulo métrico, m	Factor de tamaño, $K_s$
$\geq 5$	$\leq 5$	1
4	6	1,05
3	8	1,15
2	12	1,25
1,25	20	1,4

Nota. Tabla obtenida de (Budynas, 2018).

$$K_s = 1$$

Factor de distribución de carga

$$K_m = 1 + C_{mc} * (C_{pf} * C_{pm} + C_{ma} * C_e) \quad (13)$$

$$C_{mc} = 1$$

Para dientes sin coronar.

$$F = \frac{Bp}{25.4} = 0.695 [in]$$



Para el factor  $C_{pf}$  .

$$C_{pf} = \frac{F}{10 * dp} - 0.0375 + 0.0125 * F = -0.027$$

$$C_{pm} = 1$$

Para el factor  $C_{ma}$  se considera como engranajes abiertos y se aplica la fórmula.

$$C_{ma} = 0.247 + 0.0167 * F - 0.765 * 10^{-4} * F = 0.259$$

$$C_e = 1$$

Reemplazando los valores en la ecuación 13.

$$K_m = 1 + 1 * (-0.027 * 1 + 0.259 * 1) = 1.232$$

Para el factor de arco se necesita conocer, el diámetro interno del piñón, diámetro del eje.

$$d_i = dp - 2 * b = 28.072 [mm]$$

$$d_{eje} = 8 [mm]$$

$$mb = \frac{tr}{ht} \quad (14)$$

Donde  $mb$  es la relación entre  $tr$  que es el espesor del aro [mm] y  $ht$  la altura total del diente [mm].

$$tr = \frac{d_i - d_{eje}}{2} = \frac{28.072 - 8}{2} = 10.036 [mm]$$

$$ht = 3.25 * mn = 3.25 * 1.5 = 4.875 [mm]$$

$$mb = \frac{10.036}{4.875} = 2.059$$

El valor de  $mb$  es mayor a 1.2 por lo tanto.

$$Kb = 1$$

Reemplazando todos los valores:

$$\sigma_b = \frac{362.25 * 0.629}{17.66 * 0.465} * 1.5 * 1.069 * 1 * 1.232 * 1 = 149.411 [MPa]$$

Para verificar el factor de seguridad se emplea el esfuerzo admisible a flexión presentado en la ecuación 15 y en donde se emplearán las figuras 116, 117, 118 y 119, además de la tabla 21.

$$\sigma_{ta} = S_t * \frac{Y_N}{SF_b * K_R * K_T} \quad (15)$$

Donde  $\sigma_{ta}$  es el esfuerzo admisible para el material del engranaje,  $S_t$  resistencia a la flexión del material asignada por la AGMA,  $Y_N$  es el factor por ciclos de esfuerzo,  $K_R$  factor de confiabilidad,  $K_T$  factor de temperatura y  $SF_b$  factor de seguridad por flexión.

Factor por ciclos de esfuerzo se establece las condiciones de trabajo de 8 horas diarias, 5 días a la semana, 50 semanas al año y 10 años.

$$t = 8 * 5 * 50 * 10 = 2 * 10^4 [h]$$

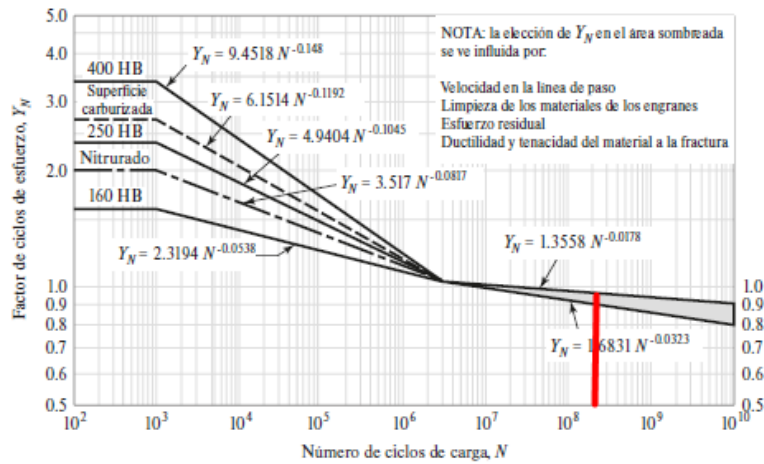
$$N = 60 * np * t$$

$$np = \frac{v * 6000}{dp * \pi} = \frac{0.2 * 6000}{31.82 * \pi} = 120.03 [rpm]$$

$$N = 60 * 120.03 * 2 * 10^4 = 1.44 * 10^8 [ciclos]$$

**Figura 116**

*Factor de ciclos de esfuerzo*



*Nota.* Gráfica obtenida de (Budynas, 2018).

$$Y_N = 1.6831 * N^{-0.0323} = 0.917$$

Factor de confiabilidad

**Tabla 21**

*Factor de confiabilidad*

Confiabilidad	K <sub>R</sub>
0.9999	1.50
0.999	1.25
0.99	1.00

0.90	0.85
0.50	0.70

*Nota.* Tabla obtenida de (Budynas, 2018).

$$K_R = 1$$

Para el factor de temperatura se considera que no se superan los 120 grados centígrados y el valor del factor corresponde:

$$K_T = 1$$

Se asigna un factor de seguridad de:

$$SF_b = 1.5$$

La solución debe cumplir la condición de:

$$\sigma_{ta} = \sigma_b = 149.41 \text{ [MPa]}$$

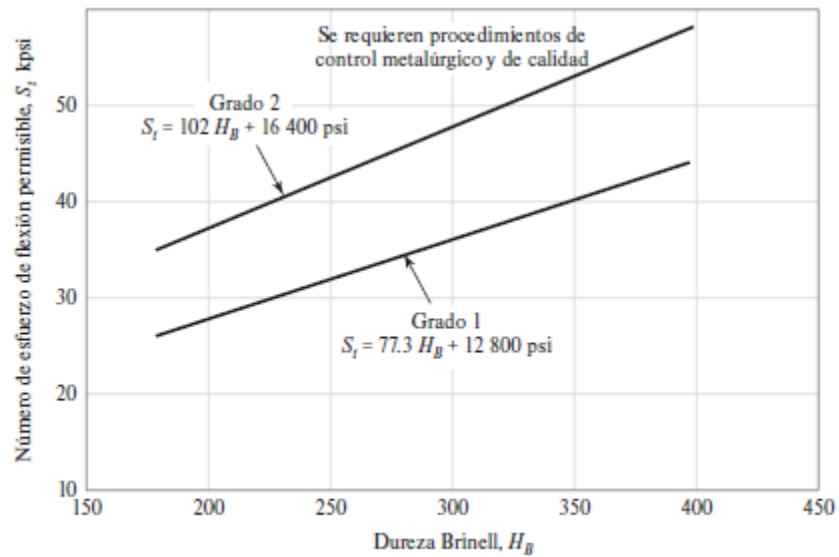
Despejando  $S_t$  y reemplazando los valores:

$$S_t = \frac{\sigma_{ta} * SF_b * K_R * K_T}{Y_N}$$

$$S_t = \frac{149.41 * 1.5 * 1 * 1}{0.917} = 244.27 \text{ [MPa]}$$

**Figura 117**

Número de esfuerzo de flexión permisible de aceros



Nota. Gráfica obtenida de (Budynas, 2018).

Las ecuaciones en unidades SI son:

Grado 1

$$S_t = 0.533 * HB * +88.3 \text{ [MPa]}$$

Grado 2

$$S_t = 0.703 * HB * +113 \text{ [MPa]}$$

Se considera que el material es de grado 1 y busca la dureza para seleccionar el material del piñón.

$$HB = \frac{S_t - 88.3}{0.533} = 292.64$$

**Figura 118**

*Propiedades mecánicas medias de algunos aceros tratados térmicamente*

1	2	3	4	5	6	7	8
AISI núm.	Tratamiento	Temperatura °C (°F)	Resistencia a la tensión MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación, %	Reducción en el área, %	Dureza Brinell
1030	TyR*	205 (400)	848 (123)	648 (94)	17	47	495
	TyR*	315 (600)	800 (116)	621 (90)	19	53	401
	TyR*	425 (800)	731 (106)	579 (84)	23	60	302
	TyR*	540 (1000)	669 (97)	517 (75)	28	65	255
	TyR*	650 (1200)	586 (85)	441 (64)	32	70	207
	Normalizado	925 (1700)	521 (75)	345 (50)	32	61	149
	Recocido	870 (1600)	430 (62)	317 (46)	35	64	137

*Nota.* Gráfica obtenida de (Budynas, 2018).

Seleccionando el AISI 1030 con un tratamiento TyR a 800 [°C] se tiene una dureza de 302.

Factor de seguridad final

$$S_{tf} = 0.533 * HB * +88.3 = 0.533 * 302 + 88.3 = 249.266 [MPa]$$

$$SF_{bf} = \frac{S_{tf} * Y_N}{\sigma_{ta} * K_R * K_T} = 1.531$$

Una vez verificada la resistencia del piñón se considera la selección de la cremallera dependiendo del paso de los dientes y el ancho que tiene el piñón y de acuerdo a longitud necesaria la cual es de 3 [m] por cada lado.

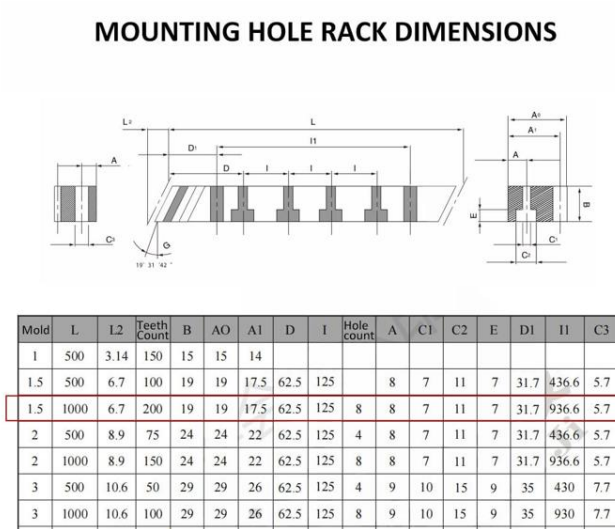
$$Pt = mn * \frac{\pi}{\cos(\Psi)} = 5$$

$$Bp = 17.66 [mm] \approx 19 [mm]$$

$$L = 1000 \text{ [mm]}$$

**Figura 119**

*Catálogo de cremalleras.*



*Nota.* Catálogo brindado por el proveedor local.

Se seleccionó la cremallera helicoidal de módulo 1.5 de longitud de 1000 [mm] y un ancho de 19 [mm] que es el mayor que el ancho del piñón diseñado.

### Diseño del sistema de transmisión piñón-cremallera para el eje X

La masa que tendrá que soportar el sistema está presentada en la tabla 8, donde se establecen los elementos y masas de los mismos que estarán cargados sobre el piñón-cremallera.

$$m_{pb} = 21.39 \text{ [Kg]}$$

Para la selección de velocidad y aceleración se consideran los mismos valores que se tiene en el eje Y.

Para velocidad.

$$v = 0.2 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Para aceleración:

$$a = 0.4 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

Para el coeficiente de seguridad se obtendrá de la tabla 17.

Donde seleccionará un tipo de carga moderada y para un tiempo de trabajo intermitente, para lo cual el valor del coeficiente es de:

$$K = 2$$

El movimiento del eje X es un movimiento horizontal por lo que se aplican las fuerzas tangenciales horizontales para los cálculos

Por el catálogos se obtiene el valor de:

$$F_{htx} = 21.39 * (9.81 * 0.15 + 0.4) = 40.03[N]$$

Posteriormente se calcula la fuerza tangencial corregida dada por la ecuación 8.

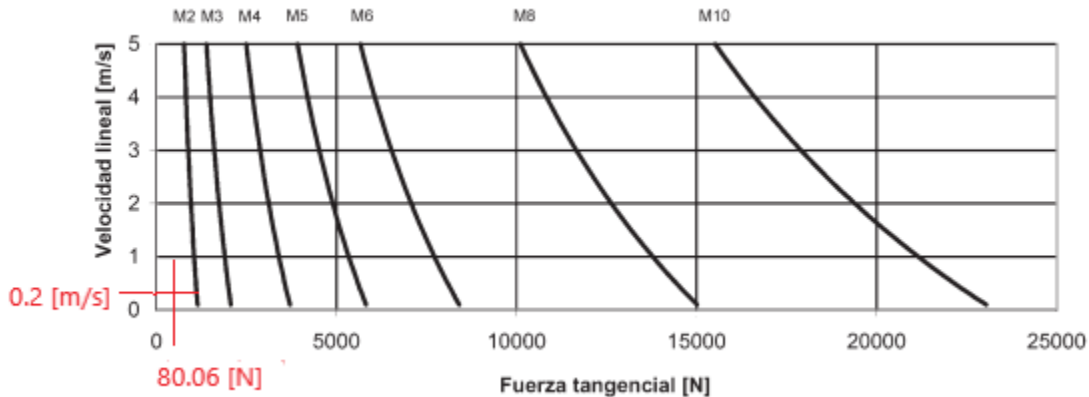
$$F_{hcX} = 40.03 * 2 = 80.06[N]$$

Considerando la velocidad y la fuerza tangencial se verifica en la figura 120 para piñón helicoidal el módulo necesario para dichos valores.



**Figura 120**

Diagrama de selección del módulo del dentado helicoidal.



Nota. Tabla obtenida de (KOOM, 2019).

Como en el caso del eje Y no se obtiene un cruce con las curvas ya existentes, pero con ese motivo por facilidad de compra y adquisición se seleccionará el módulo 1.5 y además con la condición del espacio máximo de 35 [mm] los valores del piñón son los mismo que el eje Y, por ese motivo no se verifica nuevamente su resistencia ya que se obtendría los resultados iguales y como se verificó el factor de seguridad de 1.5 es adecuado para el funcionamiento de los dos ejes, aunque en el eje X sea de menor carga, para la cremallera de igual manera se seleccionará la misma del caso del eje Y con la variación de que se seleccionará una de longitud de 1000 [mm] y una de 500 [mm] para completar la longitud de 1500 [mm].

### **Diseño y selección del tornillo sin fin para el eje Z**

Para el diseño del sistema de transmisión por tornillo sin fin se considerará el diseño del tornillo como un tornillo de potencia el cual estará sometido a las cargas de la tabla 22.

**Tabla 22***Cargas para el tornillo sin fin del eje Z*

No.	Elemento	Cantidad	Peso	Total
1	Antorcha	1	0,6 Kgf	0,60 Kgf
2	Cabezal flotante	1	1 Kgf	1,00 Kgf
3	Placa de soporte 2	1	1,36 Kgf	1,36 Kgf
4	Tapa del cabezal	1	0,5 Kgf	0,50 Kgf
			Carga total	3.46 Kgf

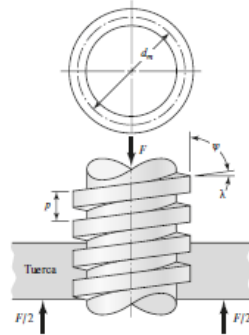
*Nota.* Elementos que influyen en la carga del eje Z.

Para el diseño y selección se considera el torque necesario para elevar y bajar la carga cuando es un tornillo de potencia, se seleccionará dimensiones de tornillos ya fabricados y con mecanismo completo para evitar complicaciones, el cual consiste en un motor a pasos, el tornillo con dos cojines en los extremos, la base de soporte para el tornillo y ejes guías, lo que se busca es verificar que el torque generado por la carga sea fácilmente elevado o bajo por el motor que el sistema incluye.

Las partes de un tornillo de potencia se representan en la figura 121 y la distribución de fuerzas en un tornillo para elevar o bajar una carga de se pueden expresar como en la figura 122.

### Figura 121

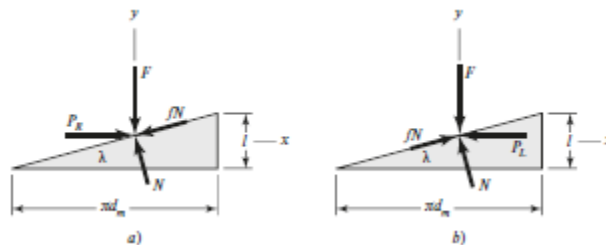
Parte de un tornillo de potencia.



Nota. Figura obtenida de (Budynas, 2018).

### Figura 122

Diagramas de fuerza: a) al subir la carga; b) al bajar la carga.



Nota. Figura obtenida de (Budynas, 2018).

Con los diagramas presentados en la figura 122 se puede deducir las ecuaciones correspondientes al torque necesario para poder elevar o bajar una carga, además de se debe considerar que la rosca a tiene un ángulo de rosca, por lo tanto, la ecuación del torque para elevar una carga se presenta en la ecuación 16.

$$T_R = \frac{F * dm}{2} * \left( \frac{l + \pi * f * dm * \sec(\alpha)}{\pi * dm - f * l * \sec(\alpha)} \right) \quad (16)$$

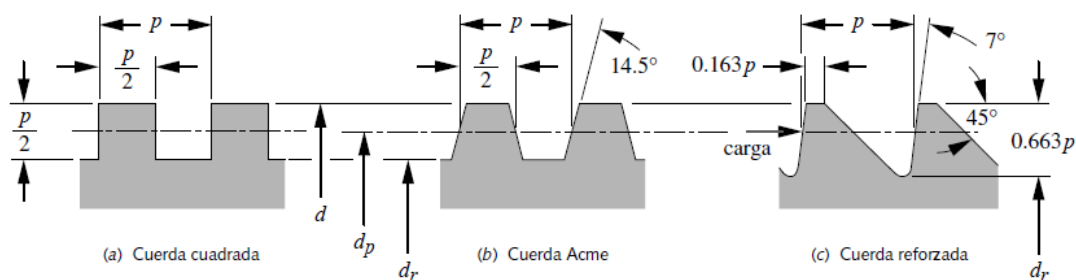
Donde:  $T_R$  es el torque para elevar una carga,  $F$  es la fuerza de la carga,  $dm$  es el diámetro medio,  $l$  es el avance,  $f$  es el coeficiente de rozamiento y  $\alpha$  es el ángulo de rosca.

La ecuación 17 representa el torque para bajar una carga.

$$T_L = \frac{F * dm}{2} * \left( \frac{-l + \pi * f * dm * \sec(\alpha)}{\pi * dm + f * l * \sec(\alpha)} \right) \quad (17)$$

**Figura 123**

*Tipos de roscas*



*Nota.* Figura obtenida de (Norton, 2011).

El tipo de rosca para el tornillo de potencia es la rosca ACME como se muestra en la figura 123, la cual tiene un ángulo de rosca de:

$$\alpha = 14.5 [^\circ]$$

Con las tablas de roscas ACME y los datos del mecanismo de tornillo sin fin que se pueden adquirir en el mercado, se puede obtener los datos necesarios para los cálculos del torque para elevar y bajar la carga.

$$dm = 16 [mm]$$

$$p = 5 [mm]$$

$$de = dm + \frac{p}{2} = 18.5 [mm]$$

$$dr = dm - \frac{p}{2} = 13.5 [mm]$$

$$l = 1 * p = 5 [mm]$$

$$f = 0.08$$

Con la finalidad de que el tornillo tenga una carga axial se utiliza un cojinete de empuje o collarín y estos producen un torque por la fricción generada por el collarín y el tornillo. Este torque se le debe sumar tanto al torque para elevar y bajar. El torque presentado por la fricción se presenta en la ecuación 18.

$$T_c = \frac{F * f_c * dc}{2} \quad ( 18)$$

Donde:  $f_c$  es el coeficiente de fricción entre el collarín y el tornillo y  $dc$  es el diámetro del collarín.

$$f_c = 0.08$$

$$dc = 18 [mm]$$

Reemplazan los valores para obtener los torque necesarios para elevar, bajar y el del collarín. Obteniendo la carga de la masa.

$$F = m * 9.81 * K$$

Donde: m es la masa y K es el coeficiente de seguridad.

$$F = 3.46 * 9.81 * 2 = 67.885 [N]$$

$$T_R = \frac{67.885 * 16}{2} * \left( \frac{5 + \pi * 0.08 * 16 * \sec(14.5)}{\pi * 16 - 0.08 * 5 * \sec(14.5)} \right) + \frac{67.885 * 0.08 * 18}{2} = 197.47 [N - mm]$$

$$T_R = 0.197 [N - m]$$

$$T_L = \frac{67.885 * 16}{2} * \left( \frac{-5 + \pi * 0.08 * 16 * \sec(14.5)}{\pi * 16 + 0.08 * 5 * \sec(14.5)} \right) + \frac{67.885 * 0.08 * 18}{2} = 88.64 [N - mm]$$

$$T_L = 0.089 [N - m]$$

### **Selección del motor para el eje Z**

Como se puede observar el torque máximo que se necesita para elevar o bajar la carga es de aproximadamente de 0.2 [N-m]. Se seleccionará el motor nema 23 Bipolar el cual tiene un torque de 1.26 [N-m], el cual se puede observar en la figura 124 y cuyas características están en las tablas 23 y 24. El nema 23 es uno de los motores a pasos más utilizados en la industria del sistema CNC para corte plasma y el anterior a este el cual es el nema 17 tiene un gran problema de eficacia cuando se trata de aplicaciones de gran tamaño.

**Figura 124**

*Motor NEMA 23 de 1.26 [N-m]*



*Nota.* Figura obtenida de (SystéAI, 2022).

**Tabla 23**

*Especificaciones generales del motor NEMA23 de 1.26 [N-m]*

<b>Especificaciones Generales</b>	
<b>Ángulo de paso</b>	$1.8^\circ \pm 5\%$
<b>Número de fase</b>	2
<b>Resistencia de aislamiento</b>	100 $M\Omega$ min. (500V DC)
<b>Clase de aislamiento</b>	Clase B
<b>Inercia del motor</b>	280 g * $cm^2$
<b>Masa</b>	0.72 Kg

*Nota.* Datos obtenidos del datasheet del motor NEMA 23.

**Tabla 24**

*Especificaciones eléctricas del motor NEMA23 de 1.26 [N-m]*

<b>Especificaciones eléctricas</b>	
<b>Tensión nominal</b>	3.36 V
<b>Corriente nominal</b>	2.8 A
<b>Resistencia por fase</b>	1.2 $\Omega \pm 10\%$
<b>Inductancia por fase</b>	2.3 mH $\pm 20\%$
<b>Par de retención</b>	1.26 N – m
<b>Par de detención</b>	45 mN – m

*Nota.* Datos obtenidos del datasheet del motor NEMA 23.

### **Selección del motor para el eje Y**

Se desarrollarán los cálculos para el dimensionamiento de los motores del eje Y, por el motivo que estos soportan mayor carga que el motor del eje, la carga que deben desplazar estos motores se presenta en la tabla 25.

**Tabla 25**

*Carga para el dimensionamiento de los motores del eje Y*

<b>No.</b>	<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Peso</b>	<b>Total</b>
1	Motores nema	1	1,65 Kgf	1,65 Kgf
2	Mesa deslizante	1	3,37 Kgf	3,37 Kgf
3	Antorcha	1	0,6 Kgf	0,6 Kgf
4	Cabezal flotante	1	1 Kgf	1 Kgf
5	Placa de soporte 1	1	2,71 Kgf	2,71 Kgf
6	Placa de soporte 2	1	1,36 Kgf	1,36 Kgf



<b>7</b>	EGH 15	4	0,332	Kgf	1,328	Kgf
<b>8</b>	Tensores de motor	1	2	Kgf	2	Kgf
<b>9</b>	Tapa del eje z	1	2	Kgf	2	Kgf
<b>10</b>	Tapa del cabezal	1	0,5	Kgf	0,5	Kgf
<b>11</b>	Luz indicadora	1	0,5	Kgf	0,5	Kgf
<b>12</b>	Perno y tuerca	93	0,04	Kgf	3,72	Kgf
<b>13</b>	Arandela	93	0,007	Kgf	0,651	Kgf
<b>14</b>	Puente	1	18,32	Kgf	18,32	Kgf
<b>15</b>	Placa soporte puente	2	11,42	Kgf	22,84	Kgf
<b>16</b>	Riel	1,55	2,29	Kgf/m	3,55	Kgf
<b>17</b>	Cremallera	1,55	2,21	Kgf/m	3,43	Kgf
<b>18</b>	Placa de montaje del motor x	1	1,6	Kgf	1,6	Kgf
					Masa total	71,12 Kgf

*Nota.* Masa de los elementos que deberán mover los motores del eje Y.

Se consideran los siguientes datos para los cálculos.

$$m_{my} = 71,12[Kg]$$

$$U_k = 0.04$$

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

$$\theta_s = 1.8 [^\circ/\text{paso}]$$

Donde:  $m_{my}$  es la masa total a desplazar del eje Y,  $U_k$  es el coeficiente de rozamiento de las guías lineales,  $l$  es el paso del motor,  $\theta_s$  es el número de grados que avanza el motor por cada paso.

Se calcula el incremento de posición por pulso que está representado por la ecuación

19.

$$\Delta l = \frac{\pi * Dp * \theta_s}{360} \quad (19)$$

Reemplazando los valores.

$$\Delta l = \frac{\pi * 31 * 1.8}{360} = 0.487 \left[ \frac{mm}{paso} \right]$$

Calculando el número de pulsos y frecuencia para el incremento de posición por las ecuaciones.

$$\#p = \frac{l}{\Delta l} \quad (20)$$

$$fp = \frac{\#p}{to} \quad (21)$$

$$fa = \frac{\#p}{to - tf} \quad (22)$$

Donde: #p es el número de pulsos, to es el tiempo de posicionamiento que es igual a 1 [s] y tf tiempo de aceleración y desaceleración que en este caso es 0.25 [s], fp es la frecuencia del pulso y fa es la frecuencia de pulsos media.

Calculando el número de pulsos y las frecuencias:

$$\#p = \frac{1}{0.487} = 2.054 [pulsos]$$

$$fp = \frac{2.054}{1} = 2.054 \left[ \frac{\text{pulsos}}{s} \right]$$

$$fa = \frac{2.054}{1 - 0.25} = 2.738 \left[ \frac{\text{pulsos}}{s} \right]$$

Calculando los momentos de inercia de la piñón y cremallera.

$$Ip = \frac{1}{2} * mp * r^2 \quad (23)$$

Donde:  $I_p$  es el momento de inercia del piñón,  $m_p$  es la masa del piñón y  $r$  es el radio del piñón.

Por medio del software CAD se obtuvo el valor de la masa del piñón.

$$m_p = 0.073 \text{ [Kg]}$$

$$I_p = \frac{1}{2} * 0.073 * 15.5^2 = 8.769 \text{ [Kg} - \text{mm}^2]$$

El momento de inercia de la cremallera está dado por la ecuación 24.

$$I_w = W * r^2 \quad (24)$$

Obteniendo la masa de la cremallera por los catálogos de los fabricantes.

$$I_w = 9.9 * 9.5^2 = 893.475 \text{ [Kg} - \text{mm}^2]$$

$$I_{total} = I_p + I_w = 8.769 + 893.475 = 902.244 \text{ [Kg} - \text{mm}^2]$$

Para obtener el torque necesario se partirá de la fuerza tangencial entre el piñón y cremallera y la fuerza de fricción que tendrán las guías lineales. La fuerza tangencial está dada por la ecuación 7.

$$F_{ht} = m_{my} * (9.81 * \mu + a)$$

$$F_{ht} = 71.12 * (9.81 * 0.15 + 0.4) = 133.10 [N]$$

La fuerza de fricción de las guías lineales.

$$F_r = m_{my} * uk * 9.81$$

$$F_r = 71.12 * 0.04 * 9.81 = 27.907 [N]$$

La fuerza total es la suma de las fuerzas calculadas.

$$F = F_{ht} + F_r$$

$$F = 133.10 + 27.907 = 161 [N]$$

El número de revoluciones sobre el piñón está dado por la ecuación

$$np = \frac{v * 6000}{dp * \pi} \quad (25)$$

Donde: v es la velocidad lineal del sistema, y dp es el diámetro del piñón.

$$np = \frac{0.2 * 6000}{31 * \pi} = 123.21 [rpm]$$

El torque resultante por la fuerza total es:

$$T = \frac{dp * F}{2000 * ef} \quad (26)$$

Donde: ef es la eficiencia que va a tener el sistema en esta caso es del 90%.

$$T = \frac{31 * 161}{2000 * 0.9} = 2.77 [N - m]$$

El par de aceleración correspondiente para vencer la inercia del piñón y cremallera, además de la inercia del motor.

$$T_A = \frac{J_o + I_{total}}{9.81} * \frac{\pi * \theta_s * fa}{180 * tf} \quad (27)$$

Donde: Ta es el torque de aceleración y Jo es la inercia del motor considerando un motor a pasos Nema 23.

$$J_o = 800 [g - cm^2]$$

$$J_o = 80 [Kg - mm^2]$$

$$T_A = \frac{80 + 902.24}{9.81} * \frac{\pi * 1.8 * 2.738}{180 * 0.25} = 0.034 [Kg - mm]$$

$$T_A = 3.381 * 10^{-4} [N - m]$$

$$T_{total} = T + T_A = 2.77 [N - m]$$

### Selección del motor para el eje X

Se desarrollarán los cálculos para el dimensionamiento del motor del eje X, la carga que debe desplazar este motor se presenta en la tabla 26.

**Tabla 26**

*Carga para el dimensionamiento de los motores del eje X*

No.	Elemento	Cantidad	Peso	Total
1	Mesa deslizante	1	3,37 Kgf	3,37 Kgf
2	Antorcha	1	0,6 Kgf	0,60 Kgf
3	Cabezal flotante	1	1 Kgf	1,00 Kgf
4	Placa de soporte 1	1	2,71 Kgf	2,71 Kgf
5	Placa de soporte 2	1	1,36 Kgf	1,36 Kgf
6	Tensores de motor	1	1,5 Kgf	1,5 Kgf
7	Tapa del eje z	1	2 Kgf	2,00 Kgf
8	Tapa del cabezal	1	0,5 Kgf	0,50 Kgf
9	Perno y tuerca	93	0,04 Kgf	3,72 Kgf
10	Arandela	93	0,007 Kgf	0,65 Kgf
			Carga total	20,89 Kgf

*Nota.* Masa de los elementos que deberán mover los motores del eje X.

Se consideran los siguientes datos para los cálculos.

$$m_{mx} = 20.89 [Kg]$$

$$U_k = 0.04$$

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

$$\theta_s = 1.8 [^\circ/\text{paso}]$$

Donde:  $m_{my}$  es la masa total a desplazar del eje X.

El incremento de posición por pulso es el mismo valor que del eje Y ya que se tiene el mismo diámetro del piñón.

$$\Delta l = 0.487 \left[ \frac{mm}{paso} \right]$$

El número de pulsos y frecuencia para el incremento de posición de igual manera se tiene los mismos resultados que el eje Y por motivo de diseño en el tiempo de posicionamiento y el tiempo de aceleración y desaceleración.

$$\#p = 2.054 \text{ [pulsos]}$$

$$fp = 2.054 \left[ \frac{pulsos}{s} \right]$$

$$fa == 2.738 \left[ \frac{pulsos}{s} \right]$$

El momento de inercia del piñón es el mismo del eje Y pero la inercia de la cremallera ya cambia porque su masa es menor ya que se emplea una menor longitud.

$$Ip = 8.769 \text{ [Kg} - \text{mm}^2]$$

El momento de inercia de la cremallera está dado por la ecuación 24.

Obteniendo la masa de la cremallera por los catálogos de los fabricantes.

$$Iw = 6.6 * 9.5^2 = 595.65 \text{ [Kg} - \text{mm}^2]$$

$$I_{total} = Ip + Iw = 8.769 + 595.65 = 604.41 \text{ [Kg} - \text{mm}^2]$$

Se calculan las fuerza tangencial entre el piñón y cremallera y la fuerza de fricción que tendrán las guías lineales. La fuerza tangencial está dada por la ecuación 7.

$$F_{ht} = m_{mx} * (9.81 * \mu + a)$$

$$F_{ht} = 20.89 * (9.81 * 0.15 + 0.4) = 39.096 [N]$$

La fuerza de fricción de las guías lineales.

$$F_r = m_{mx} * uk * 9.81$$

$$F_r = 20.89 * 0.04 * 9.81 = 8.19[N]$$

La fuerza total es la suma de las fuerzas calculadas.

$$F = F_{ht} + F_r$$

$$F = 39.096 + 8.19 = 47.293 [N]$$

El número de revolución es el mismo del eje Y.

$$np = 123.21 [rpm]$$

El torque resultante por la fuerza total es:

$$T = \frac{31 * 47.29}{2000 * 0.9} = 0.814 [N - m]$$

El par de aceleración correspondiente para vencer la inercia del piñón y cremallera, además de la inercia del motor.

$$J_o = 80 [Kg - mm^2]$$



$$T_A = \frac{80 + 604.42}{9.81} * \frac{\pi * 1.8 * 2.738}{180 * 0.25} = 0.024 [Kg - mm]$$

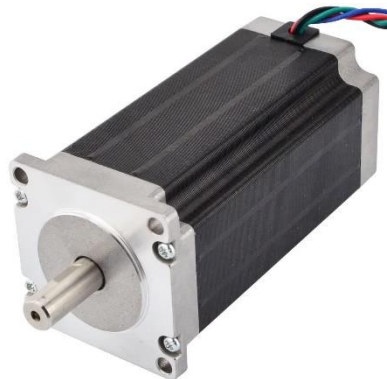
$$T_A = 2.36 * 10^{-4} [N - m]$$

$$T_{total} = T + T_A = 0.815 [N - m]$$

Como se puede observar el torque máximo que se necesita para para el eje Y es de 2,77 [N-m] y para el eje X se necesita 0.815 [N-m], tomando en cuenta la adquisición de los motores y analizando los valores se seleccionará el motor nema 23 Bipolar el cual tiene un torque de 3 [N-m] y se puede observar en la figura 125 y donde las características se presentan en las tablas 27 y 28, cabe mencionar que se adquirirá 3 motores y dos correspondientes al eje Y y uno correspondiente al eje X, se selecciona un torque mayor para el eje X por la facilidad de comprar el kit de tres motores que resulta mucho más conveniente económica de comprar individualmente.

### Figura 125

*Motor NEMA 23 de 3 [N-m]*



*Nota.* Figura obtenida de (Tettsa, 2020).

**Tabla 27**

*Especificaciones generales del motor NEMA23 de 3 [N-m]*

<b>Especificaciones Generales</b>	
<b>Ángulo de paso</b>	$1.8^\circ \pm 5\%$
<b>Número de fase</b>	2
<b>Resistencia de aislamiento</b>	100 $M\Omega$ min. (500V DC)
<b>Clase de aislamiento</b>	Clase B
<b>Inercia del motor</b>	800 $g * cm^2$
<b>Masa</b>	1.6 Kg

*Nota.* Datos obtenidos del datasheet del motor NEMA 23.

**Tabla 28**

*Especificaciones eléctricas del motor NEMA23 de 3 [N-m]*

<b>Especificaciones eléctricas</b>	
<b>Tensión nominal</b>	8.4 V
<b>Corriente nominal</b>	4.2 A
<b>Resistencia por fase</b>	$0.9 \Omega \pm 10\%$
<b>Inductancia por fase</b>	$3.8 mH \pm 20\%$
<b>Par de retención</b>	3 N – m
<b>Par de detención</b>	45 mN – m

*Nota.* Datos obtenidos del datasheet del motor NEMA 23.

### **Selección de guías y rodamientos lineales**

Para la selección de las guías lineales se compararán entre las guías perfiladas o las guías redondas en la tabla 29, para proceder con los cálculos de dimensionamiento de los rodamientos y selección de las guías lineales.

**Tabla 29**

*Comparación HGR (guía perfilada) vs SBR (guía redonda)*

<b>Características</b>	<b>Guías HGR</b>	<b>Guías SBR</b>
<b>Capacidad de carga</b>	x	
<b>Rigidez</b>	x	
<b>Precisión</b>	x	
<b>Velocidad</b>	x	
<b>Montaje</b>		x
<b>Entornos Hostiles</b>		x
<b>Mantenimiento</b>		x

*Nota.* Tabla comparativa de algunas características de las guías lineales.

#### **Capacidad de carga**

Por el contacto entre las bolas y las pistas de rodadura, los sistemas de rieles perfilados tienen un área de contacto más grande y, por lo tanto, una mayor capacidad de carga para un tamaño determinado, que los sistemas de ejes redondos. Como menciona (Collins, 2015) los rieles perfilados también son más adecuados para cargas de momento que los ejes redondos, y generalmente tienen las mismas capacidades de carga en las cuatro direcciones. Por el

contrario, la capacidad de carga para ejes redondos depende de la dirección de carga, que es la orientación de la carga al casquillo de bolas.

### **Rigidez**

El área de contacto más grande entre las bolas y las pistas de rodadura produce menos deflexión para un sistema de rieles perfilados que para un eje redondo. Y mientras que las guías de eje redondo se pueden precargar ligeramente, los sistemas de rieles perfilados a menudo se suministran con una precarga que oscila entre el 2 y el 8 por ciento, lo que proporciona una mayor rigidez al sistema de guía.

### **Precisión**

Con pistas de rodadura y bordes de referencia, los rieles perfilados comúnmente logran precisiones de viaje que son un orden de magnitud mejor que las guías de eje redondo. En este criterio, los ejes redondos se valoran más comúnmente por su capacidad para manejar imprecisiones que por su precisión de recorrido.

### **Velocidad**

Las guías de eje redondo generalmente pueden alcanzar una velocidad máxima de 2 m/s, estando limitadas por la capacidad de controlar las bolas a medida que entran y salen de la zona de carga. Los rodamientos de carril perfilados, con un método de recirculación más sofisticado, pueden alcanzar velocidades de 5 m/s.

### **Montaje**

Cuando las guías de carril perfiladas deben estar completamente soportadas y montadas a lo largo de su longitud, las guías de eje redondo solo pueden apoyarse en sus extremos, para longitudes de hasta 20 veces el diámetro del eje. Los ejes redondos tampoco

requieren superficies mecanizadas para el montaje, ya que los bujes de bolas compensan inherentemente cierta desalineación, reduciendo el costo y el tiempo para diseñar y preparar las superficies de montaje.

### **Robustez de la guía lineal en entornos hostiles**

Los ejes redondos son generalmente menos sensibles a los escombros que los rieles perfilados y están disponibles en una variedad de materiales, recubrimientos y opciones de sellado para soportar la contaminación cáustica o abrasiva.

### **Mantenimiento de guías lineales**

Debido a la menor área de contacto entre las bolas de transporte de carga y las pistas de rodadura, los ejes redondos tienen requisitos de lubricación menos exigentes que los rieles perfilados.

Analizando cada una de las características de las guías perfiladas y las guías redondas se seleccionan las guías perfiladas por su mayor rigidez y precisión que son fundamentales para el tipo de aplicación para lo cual van a ser empleadas.

Considerando la carga para el eje Y que se presenta en la tabla 25, se realizará un análisis de carga estática y dinámica para seleccionar los rodamientos lineales que soporten la carga.

$$m_{my} = 71,12[Kg]$$

Se consideran las ecuaciones para carga estática y dinámica que menciona HIWIN en su catálogo de guías lineales. Donde se tiene la ecuación 28.

$$a_s = fc * \frac{Co}{P} \quad (28)$$

Donde:  $a_s$  es el coeficiente de seguridad estático,  $f_c$  es el factor de contacto,  $C_o$  es la capacidad de carga estática y  $P$  es la carga máxima aplicada.

El factor de contacto depende del número de rodamientos que se colocan en las guías por cada eje y se selecciona de la tabla 30, en el caso del eje Y se tiene un total de 4 rodamientos.

### Tabla 30

*Factor de contacto*

Número de patines por cada guía	$f_c$
1	1.0
2	0.81
3	0.72
4	0.66
5	0.61

*Nota.* Tabla obtenida del catálogo de (HIWIN, 2016).

$$f_c = 0.66$$

$$P = K * m_{my} * 9.81 = 2 * 71.12 * 9.81 = 1395 [N]$$

Seleccionado la guías lineales serie EG que corresponden para cargas ligeras y tomando en cuenta que estas son para carga pesada y carga media. Se tomará el rodamiento con menor capacidad de carga estática que se presenta en el catálogo de HIWIN de la figura 126.



El valor obtenido para el coeficiente de seguridad está dentro del rango de impactos y vibraciones lo cual es adecuado para el sistema ya que puede llegar a tener impactos al momento de colocar las placas.

Analizando la carga dinámica para determinar la vida útil de los rodamientos ya sea por recorrido o en horas para una velocidad variable.

La vida útil del rodamiento en su recorrido está dada por la ecuación 29.

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^3 * 50 \quad (29)$$

Donde: L es la vida útil del rodamiento en su recorrido y C es la capacidad de carga dinámica.

Observando en la figura 126 se tiene el valor de C.

$$C = 5350 [N]$$

$$L = \left(\frac{5350}{1395}\right)^3 * 50 = 2818 [Km]$$

La vida útil del rodamiento en horas con una velocidad variable está representada por la ecuación 30.

$$L_h = \frac{L * 10^3}{v * 60 * 60} \quad (30)$$

Donde:  $L_h$  es la vida útil en horas.

$$L_h = \frac{2818 * 10^3}{0.2 * 60 * 60} = 3914 [h]$$

$$L_h = 5.018 [años]$$

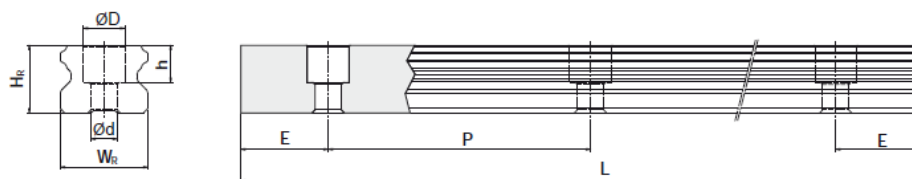


La vida útil en años está considerada para un trabajo intermitente de 3 horas al día, además de considerar los días de trabajo de lunes a viernes.

Con estos parámetros se selecciona el riel para el rodamiento lineal que se presenta en la figura 127.

**Figura 127**

*Dimensiones del Rail EGR-U*



Modelo N°.	Tornillo de Montaje (mm)	Dimensiones del Rail (mm)							Peso Rail (kg/m)
		W <sub>R</sub>	H <sub>R</sub>	D	n	d	P	E	
EGR15U	M4x16	15	12.5	7.5	5.3	4.5	60	20	1.23
EGR30U	M8x25	28	23	14	12	9	80	20	4.23

*Nota.* Datos obtenidos del catálogo de (HIWIN, 2016).

Como resultados para los rodamientos lineales del eje Y se tiene EGH15SA y con su correspondiente riel de EGR15U.

Considerando la carga para el eje X que se presenta en la tabla 26, se realizará un análisis de carga estática y dinámica.

$$m_{mx} = 20.89[Kg]$$

El factor de contacto para el caso del eje X se tiene un total de 2 rodamientos.

De acuerdo a la tabla 30 el factor de contacto es de:

$$f_c = 0.81$$

$$P = K * m_{mx} * 9.81 = 2 * 71.12 * 9.81 = 409.86 [N]$$

Seleccionado la guías lineales serie EG y el de menor capacidad nominal que es el mismo seleccionado para el eje Y que se presenta en la figura 126.

$$C_o = 9400 [N]$$

$$a_s = 0.81 * \frac{9400}{409.86} = 18.57$$

El coeficiente de seguridad estático cumple con las condiciones para un sistema dinámico con impactos y vibraciones, el rodamiento seleccionado es el de menor capacidad por lo que no se puede disminuir el resultado del coeficiente de seguridad.

Analizando la carga dinámica.

La vida útil del rodamiento en su recorrido está dada por la ecuación 29. Observando en la figura 126 se tiene el valor de C.

$$C = 5350 [N]$$

$$L = \left( \frac{5350}{409.86} \right)^3 * 50 = 111200 [Km]$$

La vida útil del rodamiento en horas con una velocidad variable está representada por la ecuación 30 que se encuentra en los cálculos de las guías del eje Y.

$$L_h = \frac{111200 * 10^3}{0.2 * 60 * 60} = 154400 [h]$$

Con estos parámetros se selecciona el riel para el rodamiento lineal que se presenta en la figura 127.

Como resultados para los rodamientos lineales del eje X se selecciona los mismos que del eje Y porque son los de menor capacidad nominal se obtiene en el catálogo y para su adquisición en el factor económico resulta mejor, se tiene EGH15SA y con su correspondiente riel de EGR15U.

### **Diseño de tornillos de potencia para nivelar la mesa CNC**

Para el diseño de los tornillos de potencia se considerará la presión por aplastamiento la cual según (Aaron, 1975) es el esfuerzo que se obtiene por el aplastamiento entre la superficie de contacto de la tuerca y la superficie de la rosca.

$$\sigma_B = \frac{W}{\pi * d_m * h * n} \quad (31)$$

Donde:  $\sigma_B$  es el esfuerzo por aplastamiento, W es la carga,  $d_m$  es el diámetro medio de la rosca, h la altura de la rosca y n es el número de cuerdas de contacto.

Por la tabla 32 se puede obtener las presiones de diseño por aplastamiento para tornillos, dependiendo del tipo de servicio y el material del tornillo y tuerca.

**Tabla 32**

*Presiones de diseño por aplastamiento para tornillos*

Tipo de servicio	Material		Presión de diseño por aplastamiento lb/plg <sup>2</sup>	Velocidad de rozamiento en el diámetro medio de la rosca
	Tornillo	Tuerca		
<b>Prensa manual</b>	Acero	Bronce	2500-3500	Vel. Baja bien lubricado

<b>Tornillo de gato</b>	Acero	Hierro vaciado	1800-2500	Vel. Baja no mayor a 8 pies/min
<b>Tornillo de gato</b>	Acero	Bronce	1600-2500	Vel. Baja no mayor a 10 pies/min
<b>Tornillo para elevación</b>	Acero	Hierro vaciado	600-1000	Vel. Media 20 a 40 pies/min
<b>Tornillo para elevación</b>	Acero	Bronce	800-1400	Vel. Media 20 a 40 pies/min
<b>Tornillo de avance</b>	Acero	Bronce	150-240	Vel. alta 50 pies/min y mayor

---

*Nota.* Tabla obtenida de (Aaron, 1975).

Para el esfuerzo de aplastamiento se toma el valor medio de un servicio de gato para los materiales de acero y hierro vaciado:

$$\theta_B = 2150 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

La carga soportada por los tornillos para nivelar la mesa será la masa total de todo el sistema incluso cuando se encuentre cargada la masa de la cama de agua, la masa de la plancha de acero y cuyo valor total es de 2100 [Kg]. Como se tiene las columnas esa carga será dividida para cada una de ellas y con el coeficiente de seguridad K.

$$m_t = 2100 [Kg]$$

$$W = K * \frac{m_t}{6} = 2 * \frac{2100}{6} = 700 [Kg]$$

$$W = 1544 [lb]$$

Donde  $h$  y  $n$  equivalen a:

$$h = 0.5 * p$$

El espesor de la tuerca está dado por la relación.

$$dm = 1.25 * H$$

$$H = n * p$$

Reemplazando estas fórmulas en la ecuación 31.

$$\sigma_B = \frac{2.5 * W}{\pi * d_m^2}$$

Despejando y calculando  $dm$ .

$$d_m = \sqrt{\frac{2.5 * W}{\pi * \sigma_B}}$$

$$d_m = \sqrt{\frac{2.5 * 1544}{\pi * 2150}} = 0.756 [plg]$$

Por la tabla 33 para roscas de Acme se obtiene el paso para el diámetro calculado.

**Tabla 33**

*Series de dimensiones básicas de roscas Acme*

Diámetro mayor (in)	Cuerdas por pulgada	Paso de la cuerda (in)	Diámetro de paso (in)	Diámetro menor (in)	Área de esfuerzo por tensión (in <sup>2</sup> )
0.250	16	0.063	0.219	0.188	0.032
0.313	14	0.071	0.277	0.241	0.053
0.375	12	0.083	0.333	0.292	0.077
0.438	12	0.083	0.396	0.354	0.110
0.500	10	0.100	0.450	0.400	0.142
0.625	8	0.125	0.563	0.500	0.222
0.750	6	0.167	0.667	0.583	0.307
0.875	6	0.167	0.792	0.708	0.442
1.000	5	0.200	0.900	0.800	0.568

*Nota.* Tabla obtenida de (Norton, 2011).

Datos del tornillo de potencia.

$$p = \frac{1}{6} [plg]$$

$$h = 0.5 * p = 0.083 [plg]$$

$$H = \frac{dm}{1.25} = 0.6 [plg]$$

$$n = \frac{H}{p} = 3.6$$

$$d_r = d_m - \frac{p}{2} = 0.75 - 0.083 = 0.667 [plg]$$

$$d_e = d_m + \frac{p}{2} = 0.75 + 0.083 = 0.833 [plg]$$

Para verificar el factor de seguridad del tornillo se calcularán el esfuerzo flexionante, el esfuerzo axial, y el esfuerzo cortante nominal en torsión, para aplicar la teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles y obtener el factor de seguridad del tornillo de potencia.

El esfuerzo flexionante en la raíz de la rosca está dado por la ecuación 32.

$$\sigma_b = \frac{6 * W}{\pi * d_r * n * p} \quad (32)$$

Donde:  $d_r$  es el diámetro de raíz y  $p$  es el paso de la rosca.

$$\sigma_b = \frac{6 * 1544}{\pi * 0.667 * 3.6 * 0.167} = 7370 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

El esfuerzo axial en el cuerpo del tornillo debido a la carga está dado por la ecuación 33.

$$\sigma_y = \frac{4 * W}{\pi * d_r^2} \quad (33)$$

$$\sigma_y = \frac{4 * 1544}{\pi * 0.667^2} = 4422 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

El esfuerzo cortante nominal en torsión del cuerpo del tornillo puede expresarse como en la ecuación 34.

$$\tau_{yz} = \frac{16 * T}{\pi * d_r^3} \quad (34)$$

Donde:  $T$  es el torque que se puede obtener por la ecuación 17.

$$T = \frac{W * dm}{2} * \left( \frac{-l + \pi * f * dm * \sec(\alpha)}{\pi * dm + f * l * \sec(\alpha)} \right)$$

Para obtener el torque necesario se necesita determinar el avance  $l$ , el coeficiente de fricción, el cual se selecciona de la tabla 34.

**Tabla 34**

*Coefficientes de fricción*

Material del tornillo	Acero	Latón	Bronce	Hierro vaciado
<b>Acero (seco)</b>	0.15 – 0.25	0.15 – 0.23	0.15 – 0.19	0.15 – 0.25
<b>Acero (lubricado)</b>	0.11 – 0.17	0.10 – 0.16	0.10 – 0.15	0.11 – 0.17
<b>Bronce</b>	0.08 – 0.12	0.04 – 0.60	-	0.06 – 0.09

Nota. Tabla obtenida de (Aaron, 1975).

$$f = 0.11$$

Las roscas Acme tienen un ángulo de rosca de 14.5 [°].

$$\alpha = 14.5 [^\circ]$$

$$l = 1 * p = 0.167$$

$$T = \frac{1544 * 0.75}{2} * \left( \frac{-0.167 + \pi * 0.11 * 0.75 * \sec(14.5)}{\pi * 0.75 + 0.11 * 0.167 * \sec(14.5)} \right) = 24.64 [lb - plg]$$

$$\tau_{yz} = \frac{16 * 24.64}{\pi * 0.667^3} = 423.25 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$



La teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles se emplea usando las componentes XYZ, el esfuerzo de von Mises puede escribirse como:

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} * [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2} \quad (35)$$

$$\sigma' = \frac{S_y}{FS}$$

Donde:

$$\sigma_x = \sigma_b = 7370 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

$$\sigma_y = \sigma_y = 4422 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

$$\sigma_z = 0$$

$$\tau_{xy} = 0$$

$$\tau_{yz} = \tau_{yz} = 423.25 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

$$\tau_{zx} = 0$$

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} * [(7370 - 4422)^2 + (4422 - 0)^2 + (0 - 7370)^2 + 6(0 + 423.25 + 0)]^{1/2}$$

$$\sigma' = 6466 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

El  $S_y$  para hierro fundido obtenido de matweb.

$$S_y = 33000 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

$$FS = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{33000}{6466} = 5.1$$

Se obtiene un factor de seguridad aceptable ya que por recomendación se establece que el factor de seguridad para tornillo de potencia debe estar entre 4 y 6.

### ***Diseño y simulación de brazos para elevar y movilizar la mesa CNC.***

Para poder movilizar la mesa CNC se diseñará un sistema de brazo con tornillo de potencia y garruchas para las cuales estarán ubicadas en 4 de las columnas de la mesa.

### **Diseño de tornillos de potencia para movilizar la mesa CNC.**

Considerando el diseño de tornillos de potencia para la elevación de la mesa CNC se seguirá la misma metodología y criterios de diseño para el diseño del tornillo de potencia para movilizar la mesa CNC.

Por tablas se puede obtener las presiones de diseño por aplastamiento y observando la tabla 32 se tiene:

$$\theta_B = 2150 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

La carga soportada por los tornillos para movilizar la mesa CNC es la misma masa que se emplea en el diseño del tornillo para nivelar cuyo valor total es de 2100 [Kg]. Como se colocará sólo en 4 columnas esa carga será dividida para cada una de ellas y con el coeficiente de seguridad K.

$$m_t = 2100 [Kg]$$

$$W = K * \frac{m_t}{4} = 2 * \frac{2100}{4} = 1050 [Kg]$$

$$W = 2315 \text{ [lb]}$$

Despejando y calculando  $d_m$ .

$$d_m = \sqrt{\frac{2.5 * W}{\pi * \sigma_B}}$$

$$d_m = \sqrt{\frac{2.5 * 2315}{\pi * 2150}} = 0.926 \text{ [plg]}$$

$$d_m = 1 \text{ [plg]}$$

Por la tabla 33 se obtiene el paso para el diámetro calculado.

Datos del tornillo de potencia.

$$p = \frac{1}{5} \text{ [plg]}$$

$$h = 0.5 * p = 0.1 \text{ [plg]}$$

$$H = \frac{d_m}{1.25} = 0.8 \text{ [plg]}$$

$$n = \frac{H}{p} = 4$$

$$d_r = d_m - \frac{p}{2} = 1 - 0.1 = 0.9 \text{ [plg]}$$

$$d_e = d_m + \frac{p}{2} = 1 + 0.1 = 1.1 \text{ [plg]}$$

Calculando el esfuerzo flexionante, el esfuerzo axial, y el esfuerzo cortante nominal en torsión, para aplicar la teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles y obtener el factor de seguridad del tornillo de potencia.

El esfuerzo flexionante en la raíz de la rosca está dado por la ecuación 32.

$$\sigma_b = \frac{6 * 2315}{\pi * 0.9 * 4 * 0.2} = 6141 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

El esfuerzo axial en el cuerpo del tornillo debido a la carga está dado por la ecuación 33.

$$\sigma_y = \frac{4 * 2315}{\pi * 0.9^2} = 3639 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

El esfuerzo cortante nominal en torsión del cuerpo del tornillo puede expresarse como en la ecuación 34.

$$f = 0.11$$

Las roscas Acme tienen un ángulo de rosca de 14.5 [°].

$$\alpha = 14.5 [^\circ]$$

$$l = 1 * p = 0.2$$

$$T = \frac{2315 * 1}{2} * \left( \frac{-0.2 + \pi * 0.11 * 1 * \sec(14.5)}{\pi * 1 + 0.11 * 0.2 * \sec(14.5)} \right) = 57.42 [lb - plg]$$

$$\tau_{yz} = \frac{16 * 57.42}{\pi * 0.9^3} = 401.12 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

Utilizando la teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles.

Donde:

$$\sigma_x = \sigma_b = 6141 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

$$\sigma_y = \sigma_y = 3639 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

$$\sigma_z = 0$$

$$\tau_{xy} = 0$$

$$\tau_{yz} = \tau_{yz} = 401.12 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

$$\tau_{zx} = 0$$

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} * [(6141 - 3639)^2 + (3639 - 0)^2 + (0 - 6141)^2 + 6(0 + 401.12 + 0)]^{1/2}$$

$$\sigma' = 5394 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

$$S_y = 33000 \left[ \frac{lb}{plg^2} \right]$$

$$FS = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{33000}{5394} = 6.1$$

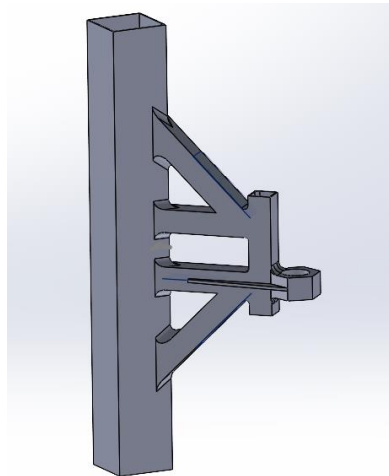
Se obtiene un factor de seguridad se encuentra cerca del rango recomendado para tornillos de potencia que es de un valor entre 4 y 6.

### **Diseño CAD y CAE de los miembros estructurales del brazo.**

Para el diseño CAD y CAE se empleó el software CAD y CAE el cual se realizó una geometría que se muestra en la figura 128, se utilizó miembros estructurales de tubos cuadrados de 30x1.5 [mm] y de acuerdo al tornillo se seleccionó una tuerca para lograr una mejor simulación.

#### **Figura 128**

*Diseño CAD del brazo para movilizar la mesa CNC*

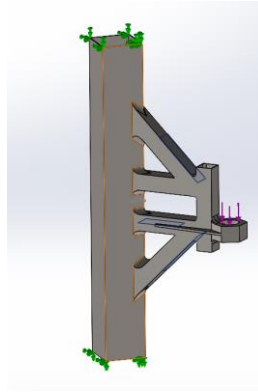


*Nota.* Se consideraron las dimensiones de la columna.

Para el análisis se consideró el material ASTM A36 para los miembros estructurales y las sujeciones fijas se encuentran en los extremos de la columna y la carga aplicada se encuentra sobre el agujero de la tuerca, los cuales se pueden verificar en la figura 129.

**Figura 129**

*Condiciones de simulación del brazo para movilizar la mesa CNC.*

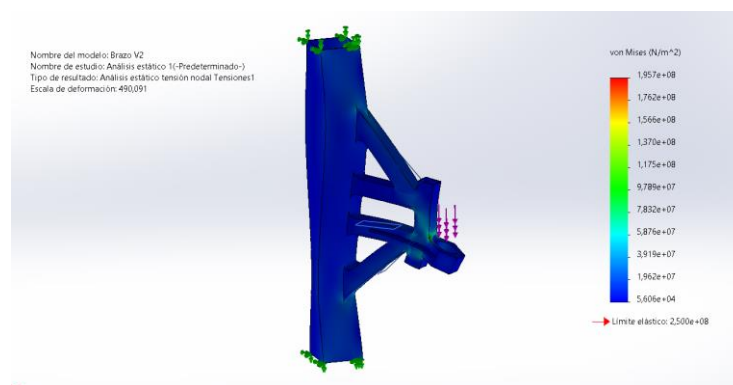


*Nota.* Las cargas se asignaron en sentido contrario de la dirección del eje Z.

En los resultados de la simulación se analizará la tensión de von Mises, los desplazamientos, el factor de seguridad y gráfico de convergencia se presentan en las figuras 130, 131, 132 y 133.

**Figura 130**

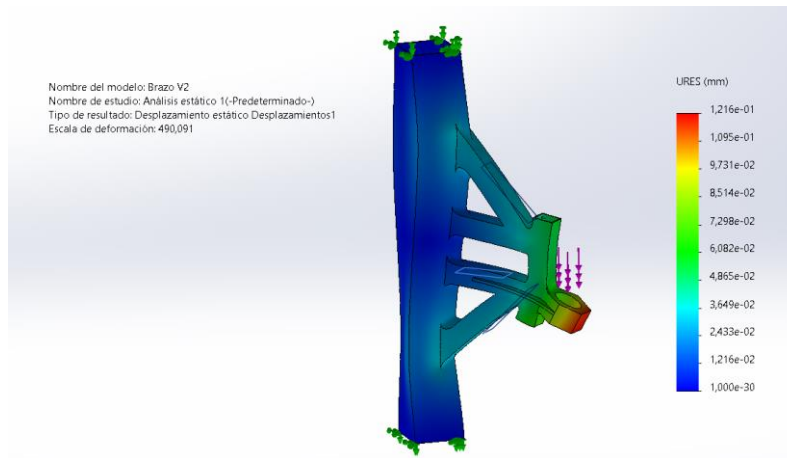
*Tensión de von Mises del brazo para movilizar la mesa CNC.*



*Nota.* La mayor tensión presentada en la simulación es de 195.7 [MPa].

**Figura 131**

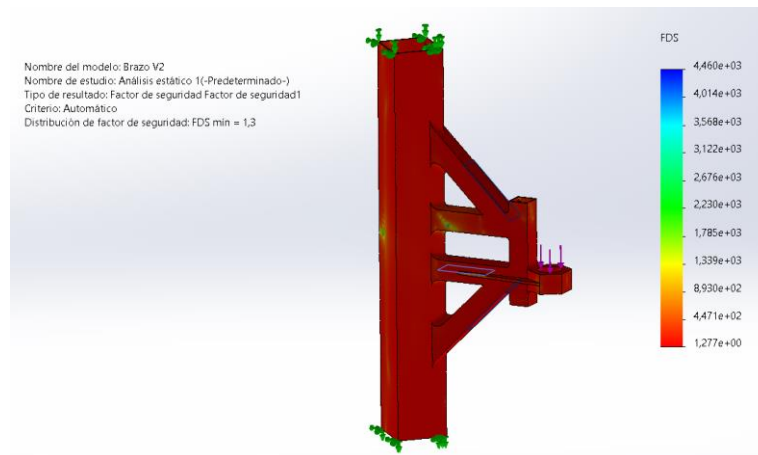
*Desplazamientos del brazo para movilizar la mesa CNC.*



*Nota.* El valor máximo de desplazamiento es de 0.012 [mm].

**Figura 132**

*Factor de seguridad del brazo para movilizar la mesa CNC.*

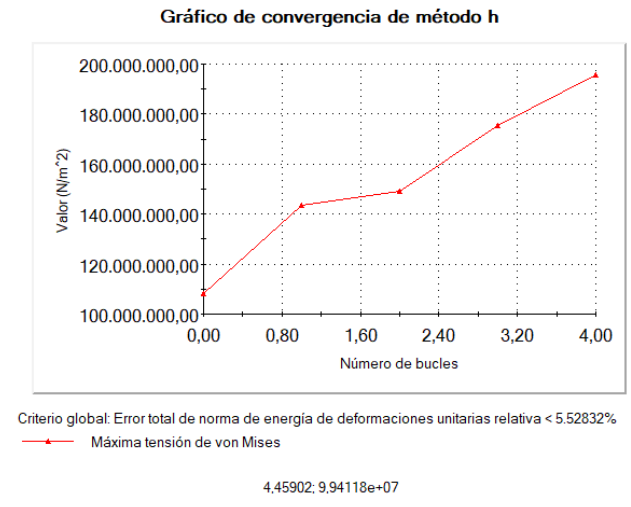


*Nota.* El factor de seguridad presentado en la simulación es de 1.3.



**Figura 133**

*Gráfico de convergencia del método h del brazo para movilizar la mesa CNC.*



*Nota.* Se empleó un nivel de precisión del 99%.

Se puede observar en los resultados de la simulación que en tensión de von Mises no se supera el límite elástico, los desplazamientos son valores pequeños lo cual no existirán problemas al momento de movilizar las mesa CNC, el factor de seguridad es aceptable debido a que en la simulación se tiene muchas aristas vivas lo que produce que las tensiones aumentan y el valor del factor de seguridad disminuya, y por otro lado el gráfico de convergía se puede observar que no converge pero se realiza un método adaptativo -h con una precisión del 99% y con un número de bucles igual a 5, los resultados presentados son confiables.

### **Verificación y simulación por pandeo elástico del tornillo de potencia.**

Para verificar si el tornillo de potencia soporta la carga se simuló el tornillo de potencia en un análisis de pandeo elástico.

Considerando los datos del tornillo de potencia, la carga que va a soportar, la longitud del tornillo y el módulo elástico del material.

$$d = 25.4 [mm]$$

$$m = 525 [Kg]$$

$$L = 0.17 [m]$$

$$E = 200 * 10^9 [Pa]$$

Calculando el área y la inercia del tornillo.

$$A = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi * \left(\frac{25.4}{2}\right)^2 = 506.71 [mm^2]$$

$$I = \frac{1}{4} * \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} * \pi * \left(\frac{25.4}{2 * 1000}\right)^2 = 2.043 * 10^{-8} [m^4]$$

La carga por pandeo está dada por la ecuación 36.

$$P = \frac{\pi^2 * E * I}{L^2} \quad (36)$$

Donde: P es la carga por pandeo, E es el módulo de elasticidad del material, I es la inercia de la sección y L la longitud del elemento.

$$P = \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 2.043 * 10^{-8}}{0.17^2} = 1.396 * 10^6 [N]$$

$$P = 1423000 [Kg]$$

Es el valor de carga para que el elemento sufra de pandeo. Se puede observar el diseño CAD en la figura 134.

**Figura 134**

*Diseño CAD del tornillo de potencia*

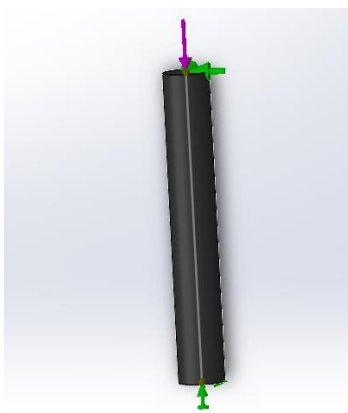


*Nota.* Elaborado en CAD.

Para el análisis se consideró que las sujeciones fijas se encuentran en los extremos del tornillo y la carga aplicada se encuentra sobre uno de los extremos, se encuentran en la figura 135.

**Figura 135**

*Condiciones de simulación para el pandeo elástico.*

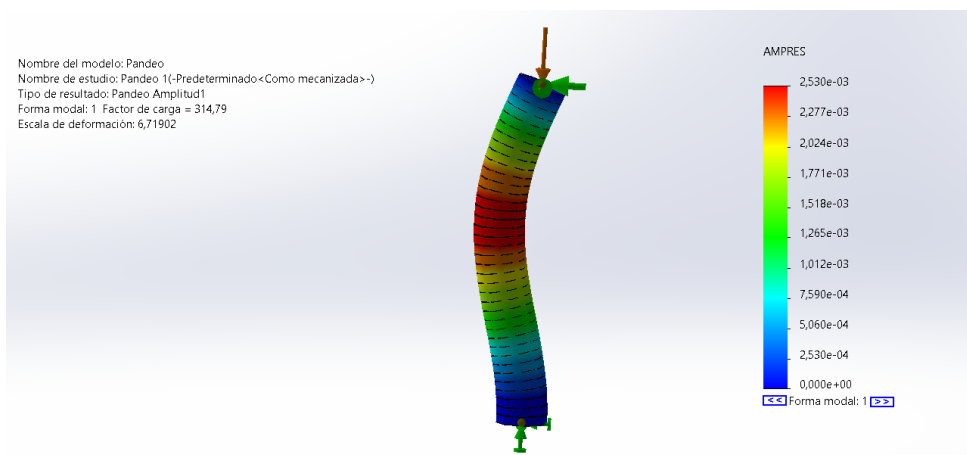


*Nota.* Las cargas se asignaron en sentido contrario de la dirección del eje Z.

En los resultados se analizará los factores de carga en tipos de pandeo se presentan en las figuras 136 y 137.

### Figura 136

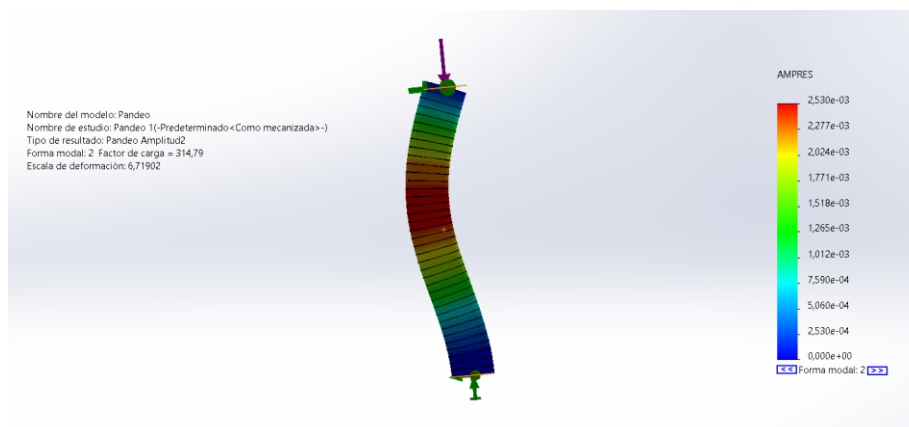
*Factor de carga del pandeo 1.*



*Nota.* El factor de carga es de 314.79.

### Figura 137

*Factor de carga del pandeo 2.*



*Nota.* El factor de carga es de 314.79.

Multiplicando el factor de carga que en el caso 1 y caso 2 es el mismo por la carga aplicada se tiene un resultado de:

$$P = 314.79 * 525 = 165264.75 [Kg]$$

Se tiene un valor parecido al calculado analíticamente, claro que una simulación es algo más aproximado a lo que vendría ser la realidad y considerando que la carga aplicada a los tornillos de potencia para movilizar la mesa CNC es esta dentro del rango máximo para evitar el pandeo en elemento.

### **Selección de las garruchas**

Para seleccionar las garruchas se consideró la carga que estas van a tener que soportar la cual es de 2100 [Kg] dividido para 4. Un ejemplo de garruchas se encuentra en la figura 138.

$$m = 525 [Kg]$$

### **Figura 138**

*Garruchas industriales*



*Nota.* Obtenido de (Garruchas y Equipos, 2022).

Seleccionó una garrucha la cual su carga nominal máxima es de 600 [Kg], lo cual cumple para soportar la masa total a la que estarán sometidas.

### ***Diseño de la estructura del gabinete***

Para el diseño del gabinete donde se colocarán los tableros de potencia y control, además del CPU, pantalla y pulsadores de control y luces indicadores, primero se realizó un modelo CAD de cómo se deseaba el gabinete estéticamente y se elaboró la estructura con miembros estructurales como se puede observar en las figuras 139 y 140 y para verificar si soportara las carga se simuló en el software de análisis estructural como se observa en la figura 141.

### **Figura 139**

*Modelo CAD del gabinete*



*Nota.* Modelo elaborado en CAD.

**Figura 140**

*Creación de la estructura del gabinete*

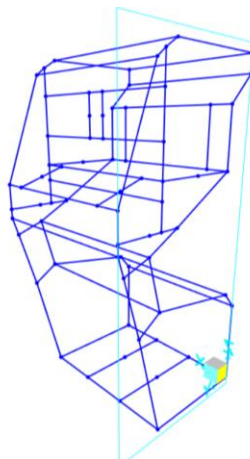


*Nota.* Elaborado con miembros estructurales de tubo cuadrado de 20x1 [mm].

Se obtuvieron las medidas de los puntos para poder realizar el modelo en el software de análisis estructural.

**Figura 141**

*Estructura del gabinete en el software de análisis estructural*



*Nota.* Modelo en el software de análisis estructural para análisis de desplazamientos.

La estructura va a soportar cargas en diferentes puntos y distinto valor, las cuales se presentan en las tablas 35, 36, 37 y 38.

**Tabla 35**

*Cargas sobre la bandeja de elementos*

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Peso</b>	<b>Total, en [gf]</b>	<b>Total, en [Kgf]</b>
<b>Mouse</b>	1	140	140	0,14
<b>Teclado</b>	1	430	430	0,43
<b>Gamepad</b>	1	175	175	0,175
			Masa total	0,745

*Nota.* Masas obtenidas de los datasheet de cada elemento.

**Tabla 36**

*Cargas del posterior y anterior del gabinete*

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Peso</b>	<b>Total, en [gf]</b>	<b>Total, en [Kgf]</b>
<b>CPU</b>	1	6000	6000	6
<b>Monitor</b>	1	3628,74	3628,74	3,63
			Masa total	9,63

*Nota.* Masas obtenidas de los datasheet de cada elemento.

**Tabla 37**

*Elementos de control e indicadores*

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Peso</b>	<b>Total, en [gf]</b>	<b>Total, en [Kgf]</b>
<b>Int con llave</b>	1	100	100	0,1
<b>Int</b>	2	65	130	0,13
<b>Stop</b>	1	51	51	0,051



<b>Luz</b>	2	16	32	0,032
			<b>Masa total</b>	<b>0,313</b>

*Nota.* Masas obtenidas de los datasheet de cada elemento.

**Tabla 38**

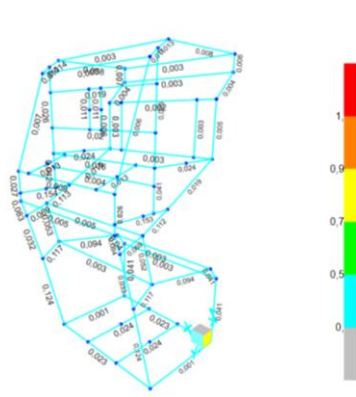
*Elementos del tablero de control y potencia*

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Peso</b>	<b>Total, en [gf]</b>	<b>Total, en [Kgf]</b>
<b>Porta fusible</b>	2	67	134	0,134
<b>Breaker</b>	1	120	120	0,12
<b>Fuente de 36 V</b>	2	860	1720	1,72
<b>Fuente de 24</b>	1	425	425	0,425
<b>Fuente de 12</b>	1	375	375	0,375
<b>Driver</b>	4	236	944	0,944
<b>Myplasm</b>	1	140	140	0,14
			<b>Masa total</b>	<b>3,86</b>

*Nota.* Masas obtenidas de los datasheet de cada elemento.

**Figura 142**

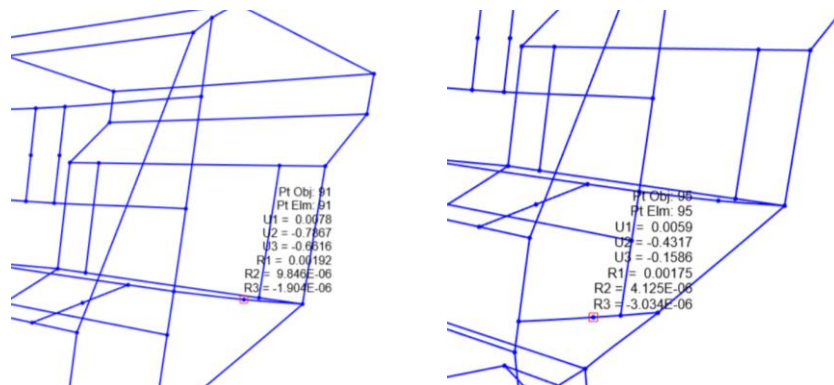
*Análisis de servicialidad de la estructura del gabinete*



*Nota.* Valor máximo de 0.117.

### Figura 143

*Desplazamientos en puntos críticos de la armadura del gabinete*



*Nota.* El valor máximo en los desplazamientos es de 0.7 [mm].

Tomando en cuenta los resultados de las simulaciones presentes en las figuras 142 y 143. Por el criterio de servicialidad se observa que ningún miembro estructural se encuentra en estado crítico y por el criterio de desplazamiento se obtiene un valor muy bajo y como esta parte no influye en la precisión del sistema CNC el desplazamiento resultante por la acción de las cargas que soporta el gabinete es admisible un desplazamiento de 0.7 [mm].

### Selección de drivers para los motores

Para la selección de los drivers de los motores se toma en cuenta los motores tanto de los ejes X y Y los cuales son los mismos y por otro lado el motor que corresponde al eje Z, ya que presentan distintas características de funcionamiento como se pueden observar en las tablas 24 y 28 que corresponden a las especificaciones eléctricas de los motores a emplearse. En la tabla 39 se especifica algunos modelos de drivers para Nema 23.

**Tabla 39***Comparativa de drivers para motores Nema 23*

	<b>A4988</b>	<b>DM542A</b>	<b>DM 860H</b>
<b>Voltaje de alimentación</b>	8-35VDC	18-50 VDC	24-80 VDC
<b>Corriente de entrada</b>	2 A	0-4 A	6 A
<b>Corriente de salida</b>	1A	1-4.2A	2.8-7.8 A
<b>Señales de control</b>	3.3-5VDC	3.3-24 VDC	3.3-24 VDC
<b>Potencia máxima</b>	< 80 W	80 W	160 W
<b>Micro Step</b>	1, 2, 4, 8, 16	1, 2, 4, 8, 16, 32	1, 2, 4, 8, 16, 32
<b>Motor a pasos recomendado</b>	Nema 17	Nema 23	Nema 34

*Nota.* Datos obtenidos de los datasheet

Para el caso de los motores correspondientes a los ejes X y Y se empleará el driver DM542A el cual se puede observar en la figura 144.

**Figura 144****STEPPER MOTOR DRIVER-DM542A**

*Nota.* Figura obtenida de (Longs Motor, 2018)

Este driver es un controlador de motor paso a paso, el cual permite que el motor funcione suavemente y casi sin ruido y ni vibración, tiene un alta precisión de posicionamiento y se lo emplea en su gran mayoría en equipos o dispositivos de control numérico de dimensiones medianas o grandes. Otras características relevantes del driver son: un bajo costo y con un alto rendimiento, protección contra sobretensión. En la tabla 40 se especifican las características eléctricas.

**Tabla 40**

*Especificaciones eléctricas del Driver DM542A.*

<b>Especificaciones eléctricas</b>	
<b>Tensión de entrada</b>	18 – 50 VDC
<b>Corriente de entrada</b>	< 4 A
<b>Corriente de salida</b>	1 A ~4.2 A

<b>Consumo</b>	80 W
<b>Seguro interno</b>	6 A
<b>Temperatura de trabajo</b>	10 ~ 45 °C
<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-40 ~ 70 °C

*Nota.* Tabla obtenida de (Longs Motor, 2018).

Para el motor del eje Z se seleccionó el driver DM542T como se puede observar en la figura 145, tomando en cuenta las especificaciones eléctricas presentadas en la tabla 24, este driver está dentro de sus características permite la auto identificación del motor y autoconfiguración, y el accionamiento del motor es con mucho menor ruido, y es muy recomendado para trabajar con motores paso a paso Nema 23. Y en la tabla 41 se presentan las especificaciones eléctricas.

**Figura 145**

*STEPPER MOTOR DRIVER-DM542T*



*Nota.* Figura obtenida de (STEPPERONLINE, 2019).

**Tabla 41**

*Especificaciones eléctricas del Driver DM542T.*

<b>Especificaciones eléctricas</b>	
<b>Tensión de entrada</b>	20 – 50 <i>VDC</i>
<b>Corriente de señal lógica</b>	7 ~ 16 <i>mA</i>
<b>Corriente de salida</b>	1 <i>A</i> ~ 4.2 <i>A</i>
<b>Frecuencia de entrada de pulsos</b>	0 ~ 200 <i>kHz</i>
<b>Resistencia de aislamiento</b>	500 <i>MΩ</i>
<b>Temperatura de trabajo</b>	-10 ~ 45 °C
<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-20 ~ 65 °C

*Nota.* Tabla obtenida de (STEPPERONLINE, 2019).

### **Selección del sistema de control**

**Tabla 42**

*Comparación de tarjetas controladoras*

<b>Características</b>	<b>CNC NVEM Ethernet de Novusun</b>	<b>MACH3 5 Axis CNC</b>	<b>MyPlasmCNC</b>
<b>Número de ejes</b>	3/4/5/6 ejes	5 ejes	3 o 4
<b>Entradas</b>	12 canales programables	5 canales	8 canales
<b>Salidas</b>	10 canales programables	17 canales	10 canales
<b>Soporte</b>	Windows XP, Windows 7 32/64bit, Windows8, and Windows10	Windows XP, Windows 7 32/64bit, Windows8,	Windows 7,8,10 32/64 bit

---

			and
		Windows10	
<b>Software</b>	Mach 3	MACH3 5	MyplasmCNC
<b>Conexión</b>	Ethernet	Ethernet	USB 2.0 Port
<b>Pulso de salida</b>	200 KHz	100KHz	350 KHz
		Tarjeta	Tarjeta
<b>Incluye</b>	Tarjeta controladora y cable	controladora y cable	controladora, THC
<b>Sistema de detección de material</b>	NO	NO	SI
<b>Tipo de archivos soportados</b>	G-codes	G-codes	DXF, PLT (hpgl), G-Codes (.tap)
<b>Módulo de diseño</b>	NO	NO	MyMini CAM
<b>Sensor de colisión</b>	NO	NO	SI
<b>Base de datos de parámetros corte</b>	NO	NO	SI
<b>Soporte de Gamepad</b>	NO	NO	SI

---

*Nota.* Datos obtenidos de los proveedores de las tarjetas controladoras.

Como se mencionó en el capítulo 2 existen muchos fabricantes y comparando lo presentado en la tabla 42, se seleccionó la tarjeta controladora MyPlasmCNC.

El motivo de selección de este sistema es que específico para el control de máquinas de corte por plasma, además que permite una fácil manipulación e interacción del usuario porque no se necesita de conocimientos avanzados en programación, y en el kit con el que se vende la tarjeta controladora incluye el controlador de movimiento, el controlador THC o de

altura y el software de control el cual se basa en dibujos 2D y no se basa en códigos G, y contiene un módulo de MyMiniCad para la creación de dibujos sencillos para evitar la compra e instalación de softwares externos cuando se trata de figuras sencillas, pero en el caso de geometrías más complejas se puede emplear una herramienta CAD/CAM e importar la trayectoria deseada. En la tabla 43 se verifican las especificaciones técnicas de la tarjeta.

**Tabla 43**

*Especificaciones técnicas de la tarjeta controladora MyPlasmCNC.*

<b>Especificaciones técnicas</b>	
<b>Alimentación</b>	<i>24 V DC / 0.6 A</i>
<b>Comunicación</b>	<i>USB 2.0 Port</i>
<b>Sistema de funcionamiento</b>	<i>Windows 7,8,10 32/64 bit</i>
<b>Archivos de importación soportados</b>	<i>dxg, g – code(convert to draw), plt (hppl), 2d</i>
<b>Ejes soportados</b>	<i>3 X,Y,Z + X'/Y'</i>
<b>Señales de los ejes</b>	<i>Step / Dir</i>
<b>Entradas de sensores (8)</b>	<i>NPN NO o Contactos : NO</i>
<b>Salidas opcionales</b>	<i>Out1 / Out2 : NPN 0,5A</i>
<b>Comunicación de la interfaz de plasma</b>	<i>RS485</i>
<b>THC + OHMI integrado</b>	<i>Sí</i>
<b>Divisor de tensión integrado</b>	<i>Sí</i>
<b>Rango de tensión THC</b>	<i>20 – 300 VDC</i>
<b>Resistencias a las interferencias</b>	<i>10kV/1MHz</i>
<b>Optoaislamiento</b>	<i>Doble</i>

*Nota.* Tabla obtenida de (Proma, 2018).

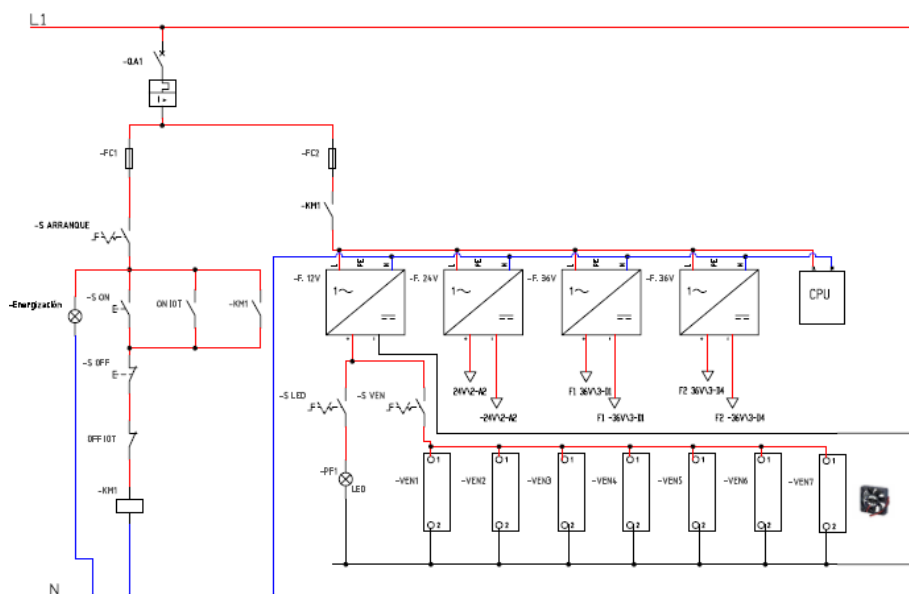


## Esquema del circuito eléctrico

Tomando en cuenta los equipos seleccionados y las fuentes de alimentación necesarias para la alimentación tanto de drivers, tarjeta controladora y otros equipos se desarrolló el esquema del circuito presentado en la figura 146 cuya esquema no se encuentra completo y se recomienda verificar los apéndices 1,2 y 3, para ver de forma completa el esquema.

### Figura 146

Parte del circuito esquemático



Nota. Elaborado en AutoCAD Electrical.

## Elementos de protección

Considerando que la alimentación del sistema se realiza por medio de 110 [V] se considera equipos de protección como interruptor automático (breaker) y fusibles en caso de cualquier emergencia y poder evitar daños en los equipos.

Para los fusibles se seleccionó fusibles cilíndricos de tipo gG para lo cual se considerará la corriente que los equipos consumirán cuando se encuentren en operación y se pueden observar en la tabla 44 y además los fusibles deben cumplir con la norma IEC 292-2 la cual garantiza la seguridad en el diseño de máquinas y menciona las siguientes especificaciones.

- Proteger contra cortocircuitos y sobrecargas cuando se tenga picos elevados de corriente.
- El valor nominal de su capacidad puede ir entre 0 a 60 [A].
- Deben soportar el 110% de la capacidad nominal.

**Tabla 44**

*Consumo de corriente de los equipos*

<b>Elementos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Corriente</b>	<b>Total, de corriente</b>	
<b>Luces piloto</b>	3	0,02	0,06	A
<b>Ventiladores</b>	3	0,4	1,2	A
<b>Ventiladores</b>	2	0,7	1,4	A
<b>Ventiladores</b>	2	0,21	0,42	A
<b>Fuente de 36V</b>	2	3,5	7	A
<b>Fuente de 12V</b>	1	3	3	A
<b>Fuente de 24V</b>	1	3	3	A
<b>MyplasmCNC</b>	1	0,6	0,6	A
<b>CPU</b>	1	1,5	1,5	A
<b>Monitor</b>	1	0,25	0,25	A
		<b>Total</b>	<b>18,43</b>	<b>A</b>

*Nota.* Valores obtenidos de los datasheet de cada uno de los equipos.

Para el dimensionamiento de los equipos se debe tomar en cuenta las dos condiciones que menciona la UNE 20460, las cuales consisten:

Condición 1 para el dimensionamiento de fusibles.

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \quad (37)$$

Donde:  $I_B$  es la corriente nominal del circuito,  $I_N$  es la corriente admisible por el conector,  $I_Z$  corriente nominal del dispositivo de protección.

Para el caso el valor del corriente nominal del circuito es la corriente total que se puede observar en la tabla 44.

$$I_B = 18.43 [A]$$

Tomando en cuenta que se empleará un conductor de calibre AWG 12 y cuya corriente admisible es de 25 [A].

$$I_Z = 25 [A]$$

Observando la figura 147 se selecciona un fusible con capacidad nominal de:

$$I_N = 20 [A]$$

Figura 147

*Intensidades nominales de los fusibles*

Intensidades nominales (A)	Clase	Tipo	Fusible cilíndrico	Fusible de cartucho
		gl	00	2, 4, 6, 10, 16, 20, 25
aM	gl	0	2, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32	32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200
		1	2, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50	63, 80, 100, 125, 160, 200, 250
		2	20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100	160, 200, 250, 315, 350, 400
		3	---	400, 500, 630
		4	---	630, 800, 1.000
		00	---	10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160
aM	gl	0	10, 16, 20, 25, 32	32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200
		1	10, 16, 20, 25, 32, 40, 50	63, 80, 100, 125, 160, 200, 250
		2	32, 40, 50, 63, 80, 100	160, 200, 250, 315, 350, 400
		3	---	400, 500, 630
		4	---	630, 800, 1.000
		00	---	10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160

*Nota.* Especificar el tipo y clase de fusible a utilizar.

Analizando la condición 1 para el dimensionamiento de los fusibles para protección:

$$18.43 \leq 20 \leq 25$$

Se puede verificar que esta primera condición se cumple para el fusible de capacidad nominal de 20 [A].

Condición 2 para el dimensionamiento de fusibles. En esta condición se debe verificar el cumplimiento de la ecuación 38.

$$I_F \leq 1.45 I_Z \quad (38)$$

Donde:  $I_F$  es la corriente que garantiza el funcionamiento correcto de equipo de protección. Y se obtiene por medio de la figura 148 la cual depende de la corriente nominal.

**Figura 148**

*Corriente convencional de fusión fusibles*

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

*Nota.* Especificar el tipo y clase de fusible a utilizar.

El rango seleccionado estará entre  $16 \leq I_N < 63$  lo cual el valor para  $I_F$  es de:

$$I_F = 1.6 * I_N = 1.6 * 20 = 32 \text{ [A]}$$

Tomando en cuenta la condición.

$$I_F \leq 1.45 I_Z$$

$$32 \leq 1.45 * 25$$

$$32 \leq 36.25$$

Considerando el criterio de la condición se puede verificar que se cumple con el fusible seleccionado y por lo tanto verificando que las dos condiciones se cumplen se empleará el fusible de 20 [A] de capacidad nominal.

### ***Dimensionamiento del calibre de los cables***

Para el dimensionamiento del calibre necesario para el alambre es necesario emplear la ecuación 39.

$$S = \frac{\rho * 2 * L}{\mu} * I * \cos\varphi \quad (39)$$

Donde: S es la sección transversal del conductor,  $\rho$  es resistividad del conductor, L es la longitud del conductor,  $\mu$  es la caída de tensión máxima admisible en el conductor, I es la corriente que pasará por el conductor y  $\cos\varphi$  es el factor de potencia.

La resistividad del conductor cuando el material es de cobre es de:

$$\rho = 0.0172 \left[ \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \right]$$

$$\cos\varphi = 0.65$$

La caída de tensión se saca con respecto a la tensión de suministro y depende del tipo de aplicación, la cual puede ser:

- 3% para alumbrado.
- 3% para viviendas.
- 5% para circuitos de potencia o fuerza.

Para el caso de la alimentación del sistema los datos para poder aplicar la fórmula y calcular la sección transversal.

$$S = \frac{\rho * 2 * L}{\mu} * I * \cos\varphi$$

$$L = 6 \text{ [m]}$$

El tensión de suministro es de 110 [V].

$$S = \frac{0.0172 * 2 * 6}{110 * 0.05} * 18.43 * 0.65$$

$$S = 0.45 \text{ mm}^2$$

Para la selección correcta del calibre del conductor se debe tomar en cuenta los dos parámetros los cuales son la corriente y la sección mínima, y verificar los valores en las figura 149 que presenta la AWG para la selección.

### Figura 149

*Tabla del calibre de alambres según la AWG*

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm <sup>2</sup> ]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz

*Nota.* Adaptado de (Solaris, 2017).

De acuerdo a la sección calculada el calibre sería un 20 AWG, pero para soportar la corriente necesaria se tiene el calibre 12 el cual se menciona el máximo de amperios soportado por el conductor 12 AWG es de 25 [A].

Como se puede observar en el circuito esquemático el cable 12 AWG se empleará desde la toma hasta el gabinete, y a su vez se utilizará en la alimentación de las fuentes de tensión.

Para el caso desde las fuentes hasta los drivers de los motores se tiene los siguientes datos.

$$I = 15 [A]$$

$$L = 2 [m]$$

La tensión de suministro es de 110 [V].

$$S = \frac{0.0172 * 2 * 2}{110 * 0.05} * 15 * 0.65$$

$$S = 0.12 \text{ mm}^2$$

Observando la figura 149 el calibre necesario para sección calculada debería ser de 26 AWG, pero para soportar la corriente por la cual va a estar sometido este conductor se selecciona el calibre 14 AWG el cual soportará a una corriente de 20 [A].

Para el caso desde drivers de los motores a los motores se tiene los siguientes datos.

$$I = 4.5 [A]$$

$$L = 7 [m]$$



La tensión de suministro es de 110 [V].

$$S = \frac{0.0172 * 2 * 7}{110 * 0.05} * 4.5 * 0.65$$

$$S = 0.13 \text{ mm}^2$$

La sección calculada nos recomienda tomar un calibre 25 AWG, pero la corriente a la que va a estar sometida es necesario tomar un calibre de 18 AWG donde la máxima corriente permitida por este conductor es de 7.7 [A].

Para el caso de elementos de señales, luces piloto y ventiladores se tiene los siguientes datos.

$$I = 0.7 \text{ [A]}$$

$$L = 7 \text{ [m]}$$

La tensión de suministro es de 110 [V].

$$S = \frac{0.0172 * 2 * 7}{110 * 0.05} * 0.7 * 0.65$$

$$S = 0.02 \text{ mm}^2$$

Para este caso se seleccionó el calibre 22 AWG que es el calibre más pequeño que se consiguió en el mercado y se tiene que el conductor soporta una corriente máxima de 3 [A].

Cabe mencionar que al seleccionar cada uno de los conductores la tabla menciona un valor menor que lo establecido en la selección esto se debe a que la corriente presentada utiliza una regla de 1 amperio por 700 milésimas circulares que es un factor muy conservador y

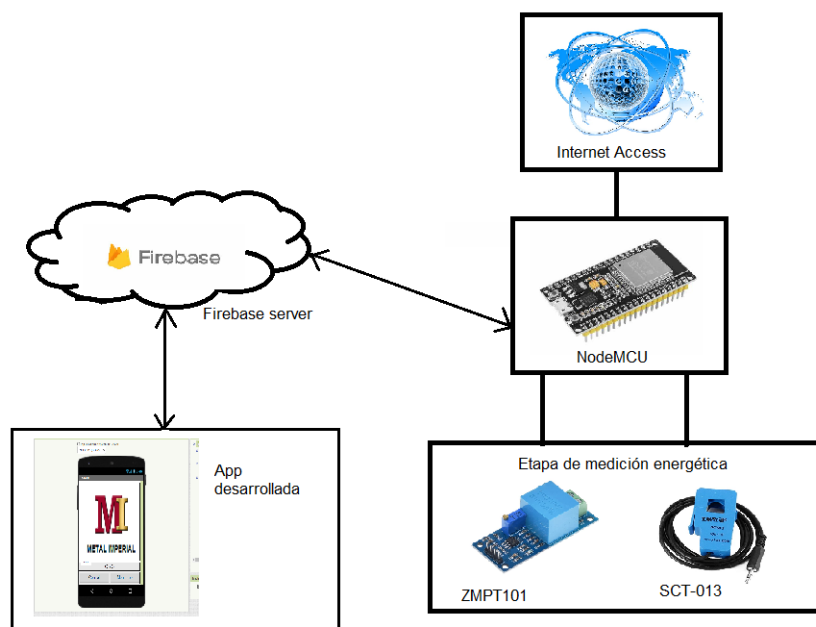
tomando el valor presentado por el código eléctrico NEC se indica la capacidad de corriente máxima para el alambre de cobre a 30 Celsius. Por lo tanto, se multiplica al factor de la tabla por un valor de 3.38 para obtener su capacidad máxima.

### Arquitectura del sistema IoT

Para poder entender de mejor manera el circuito a implementar se presenta la arquitectura en la figura 150.

#### Figura 150

*Arquitectura del medidor energético basado en IoT*



*Nota.* Arquitectura a implementarse.

## **Programación de la tarjeta IoT ESP32**

Para realizar la programación de la tarjeta se tiene dos alternativas las cuales son utilizar micropython o el IDE de arduino. Se realizará la programación con el lenguaje C++, se emplea el entorno IDE de arduino para su programación. Se debe descargar las librerías necesarias para el funcionamiento de la tarjeta ESP32, la librería de conexión con la base de datos FireBase, la librería Emonlib la cual permite la recepción de los sensores y transformar los valores a tensión y corriente, la librería Wifi.h. para la creación del cliente wifi y poder tener conexión a la red, todas estas librerías se pueden observar en la figura 151.

### **Figura 151**

*Librerías necesarias para la programación*

```
#include <FirebaseESP32.h>
#include <WiFi.h>
#include "EmonLib.h"
```

*Nota.* El código de programación completo se puede observar en el apéndice 4.

### **Creación de la base de datos en Firebase**

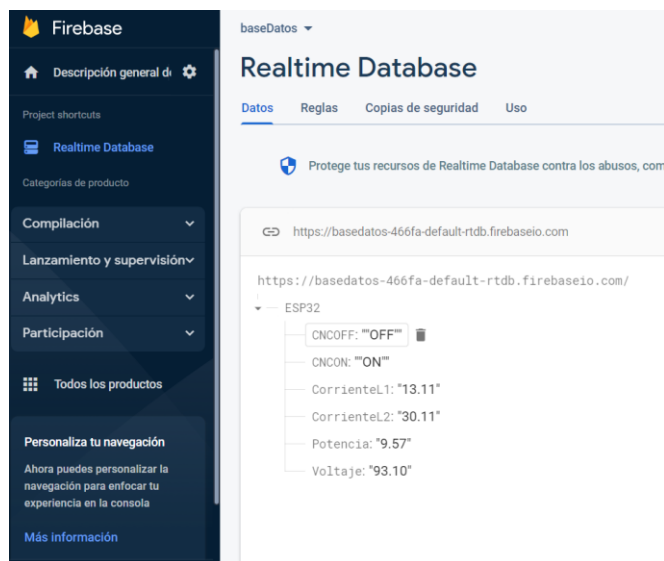
Firebase es una plataforma ubicada en la nube, que emplea un conjunto muy amplio de herramientas para la creación de proyectos, como es el caso se puede utilizar la herramienta de base de datos. Cuyo entorno se presenta en la figura 152.

Para lo cual se escogerá la herramienta de base de datos se creará un nuevo proyecto y se obtiene la dirección de la base de datos la cual se obtiene en el Realtime Database, y en

su consola se creará las etiquetas con su tipo de valor, para guardar los datos ya sea desde la app o desde el NodeMCU.

## Figura 152

### Entorno de Firebase



*Nota.* Etiquetas creadas para envío y recepción de datos.

### Desarrollo de la App en App Inventor

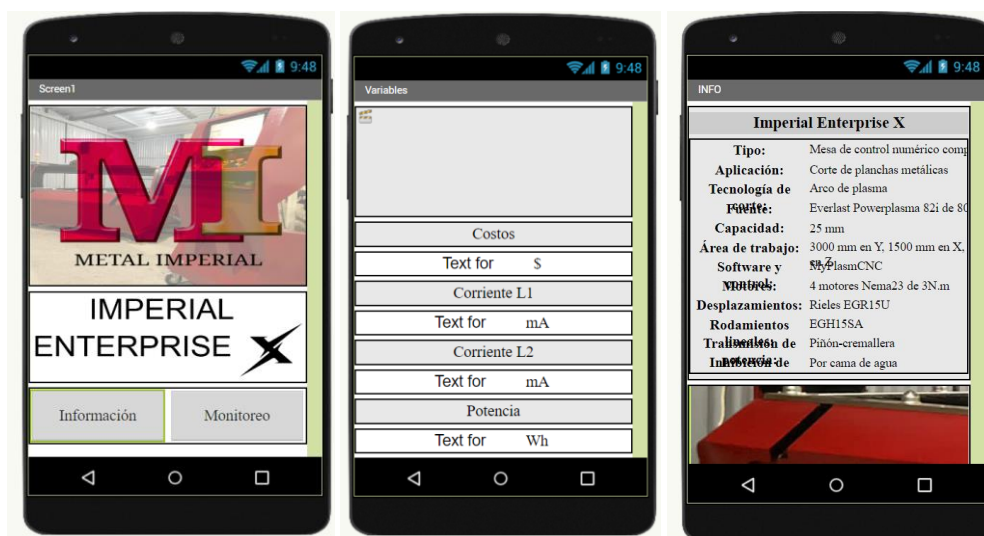
Para el desarrollo de la aplicación para el control y monitoreo de las variables necesarias se empleó el software App Inventor el cual permite el desarrollo de aplicaciones destinadas para el sistema operativo Android, es un entorno de programación gráfico o visual que emplea un conjunto de herramientas que cumplen con muchas necesidades.

Se escogió el software web App Inventor ya que cuenta con una herramienta directa para facilitar la conexión con FireBase.

La App desarrollada se presenta en la figura 153 y cuenta con tres pantallas las cuales son, una principal para la selección de información de la máquina o monitoreo, en la información se puede encontrar las características del sistema CNC con dos botones y en la pantalla de monitoreo cuenta con la visualización de las variables de costos, corriente y consumo energético.

**Figura 153**

*Pantallas para la aplicación de IoT*

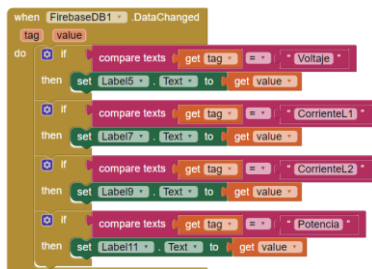


*Nota.* Aplicación para el sistema operativo Android.

Para la programación se presenta en la figura 154 en la cual se empleó los bloques de acciones que se crean cada vez se agrega un label o un botón, donde se recibe y envía datos desde la aplicación que se encuentra vinculada con FireBase.

**Figura 154**

*Programación por bloques en App Inventor*



*Nota.* Programación en bloques de la pantalla de monitoreo.

### ***Esquema eléctrico para el circuito IoT***

Para el circuito eléctrico se utilizarán componentes presentes en la tabla 45 y figuras 155 y 156.

**Tabla 45**

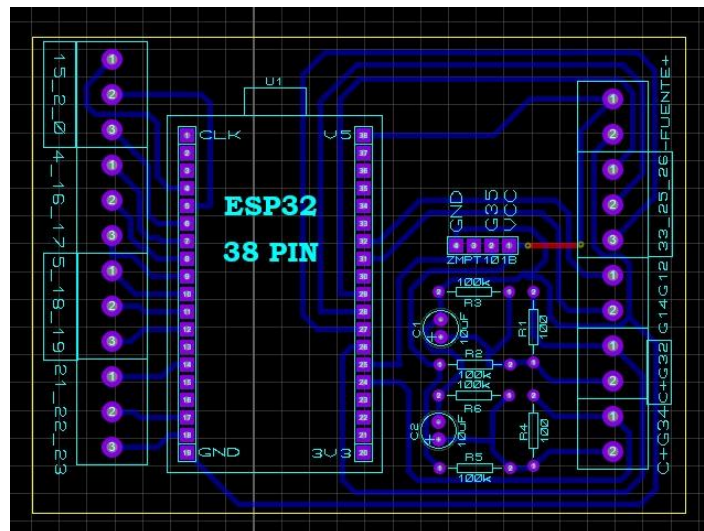
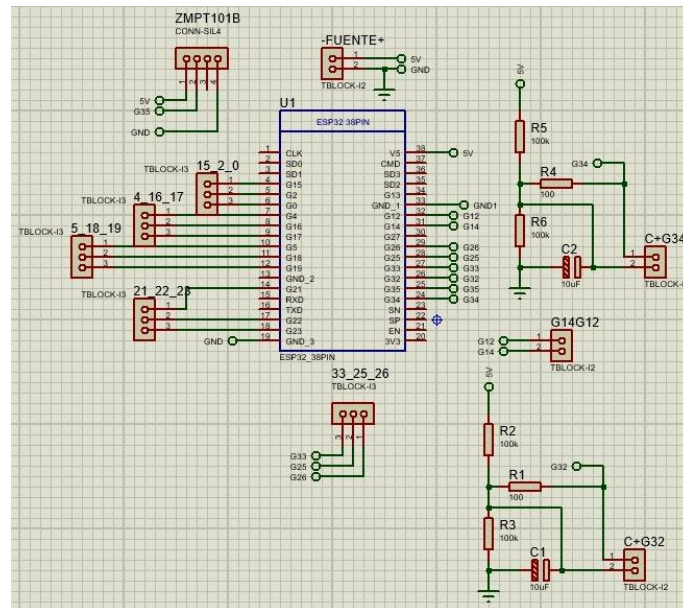
*Componentes para el circuito IoT*

<b>Componentes</b>	<b>Cantidad</b>
Placa ESP32	1
Sensor de tensión AC ZMPT101B	1
Sensor de corriente SCT-013	2
Resistencias 10K	4
Resistencias 100 ohm	2
Capacitor 10 uF	2

*Nota.* Componentes y cantidad para la elaboración del circuito.

Figura 155

Esquema eléctrico y diseño PCB para sistema IoT



*Nota.* Desarrollado en software de diseño electrónico, se reemplazaron las conexiones por borneras para trabajos futuros.

## Capítulo IV

### Construcción, Implementación y Pruebas del sistema

Para la construcción de la mesa CNC y los distintos elementos que la conforman se tomará en cuenta los planos de construcción presentes en apéndice 5, donde se presentan dimensiones y especificaciones para construcción e implementación.

#### Construcción e Implementación

##### *Mesa CNC*

Es el batidor del sistema la cual soportará todas las cargas a cuál estará sometida la mesa como se puede observar en la figura 156, en esta figura se puede ver la unión de las columnas al marco y la colocación de los refuerzos inferiores. En la figura 157 se puede ver la construcción mediante el plegado de chapa, la realización de cortes para las vigas principales y la colocación de las bandejas para la cama de agua.

#### Figura 156

*Construcción de la mesa CNC*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.



**Figura 157**

*Construcción de la cama de agua*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

Se realiza el anclaje de la bandeja de agua al marco y los cortes de las vigas principales y ángulos de la rejilla como se puede observar en la figura 158 y además la construcción y soldadura de las zapatas para las columnas.

**Figura 158**

*Montaje ángulos de la rejilla y zapatas*



*Nota.* Imágenes tomadas de la construcción.

### ***Mecanismo de elevación***

Se realizan los cortes de los miembros estructurales, para su posterior armado de los soporte para las ruedas, armado del mecanismo de elevación y su fijación del mecanismo de elevación al bastidor, como se puede observar en la figura 159.

### **Figura 159**

#### *Mecanismo de elevación*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

### ***Construcción del gabinete***

Construcción de los marcos del centro de control como se puede observar en la figura 160, en la figura 161 se tiene el recubrimiento del centro de control con chapa y colocación de ruedas para su movilización. Para finalizar la construcción del centro de control se colocó un refuerzo en la parte inferior, se pintó el cubrimiento y se realizó el montaje de la bandeja para el teclado y mouse, el montaje de indicadores y pulsadores de control, montaje de la pantalla y CPU, esto se puede observar en la figura 162.

**Figura 160**

*Estructura del centro de control*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

**Figura 161**

*Recubrimiento del centro de control*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

**Figura 162**

*Montaje final del centro de control*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

***Construcción y montaje de los tableros eléctricos.***

Una vez terminada la estructura del centro de control se construye los tableros de control y potencia siguiendo los esquemas eléctricos presentados en los apéndices se coloca los equipos y componentes necesarios como se puede observar en la figura 163, armados los tableros se realiza el montaje de los mismos dentro del centro de control como se puede verificar en la figura 164.

**Figura 163**

*Construcción de los tableros de control y potencia*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

**Figura 164**

*Montaje de los tableros en el centro de control*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

### ***Corte de elementos para el sistema CNC***

Se realiza los cortes de placas de acero para la obtener las placas de soporte del puente, placa del soporte principal del eje Z, placa del soporte secundario del eje Z y las placas correspondientes a las zapatas las cuales se pueden observar en la figura 165, además se realizó la impresión 3D de los elementos necesarios como lo son el bastidor del cabezal y el porta antorcha como se pueden observar en la figura 166.

### **Figura 165**

*Corte de placas para los elementos del sistema CNC*

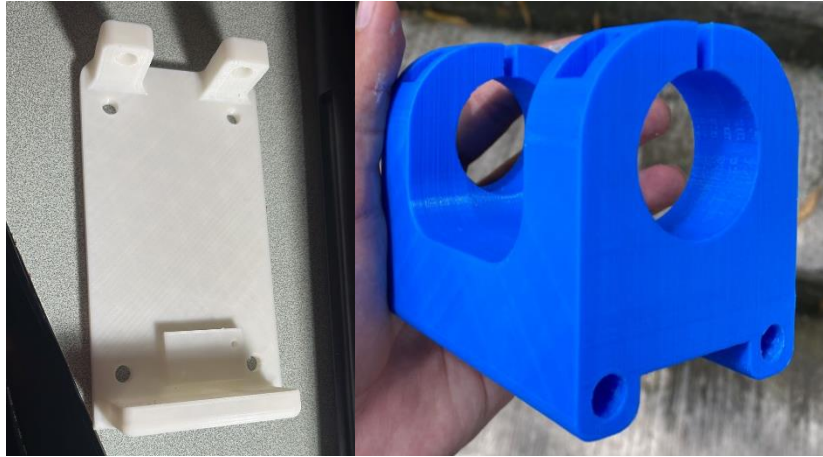


*Nota.* Imagen tomada de la construcción.



**Figura 166**

*Piezas impresas para el porta antorcha*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

### ***Construcción del puente y anclaje de guías lineales y cremalleras***

De acuerdo al diseño realizado en software de análisis estructural se compró el perfil seleccionado y para facilidad de montaje y anclaje de las guías líneas y cremallera para el eje X se soldó dos placas de acero a lo largo del perfil como se puede observar en la figura 167, el motivo de este proceso es para obtener una mayor área de contacto del perfil y los pernos de anclaje que se deben montar para las guías lineales y cremallera. En la figura 168 se puede observar el anclaje de las guías líneas y cremallera que corresponden al eje Y.

**Figura 167**

*Construcción del puente*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

**Figura 168**

*Anclaje de guías lineales y cremalleras*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.



### ***Latonería de la máquina***

Con la finalidad de dar una protección a los elementos del eje Z, a los soportes del puente y motores del eje Y, a la estructura del bastidor y tener una mejor presentación de la máquina se realizó trabajos en planchas de tool de 0.9 mm, se tiene el casco que corresponde a la protección del eje Z, 2 góndolas que corresponden a cada una de los soportes del puente y todo el recubrimiento del bastidor como se puede observar en la figura 169, a estos elementos de los trató con varios procesos antes de su ensamble, primero se le aplicó batepiedra para tener una mayor protección a impactos y un acabado rugoso de los elementos como se puede verificar en la figura 170, a continuación se aplicó pintura anticorrosiva para prevenir la corrosión y tener una mejor adherencia del acabado final como se puede observar en la figura 171 y finalmente se realizó el acabado final el cual consta de que a los elementos se les aplicó el color que deseaba la empresa, además de un recubrimiento de pintura transparente para facilitar limpieza de las piezas como se puede observar en la figura 172.

### **Figura 169**

*Elementos de protección*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

**Figura 170**

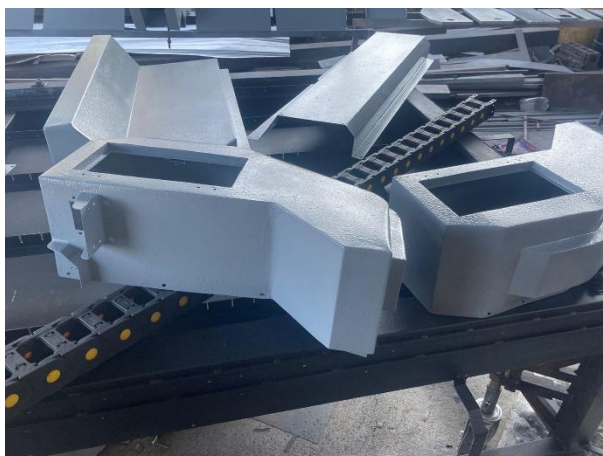
*Aplicación de batepiedra*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

**Figura 171**

*Aplicación de anticorrosivo*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

**Figura 172**

*Acabado final*



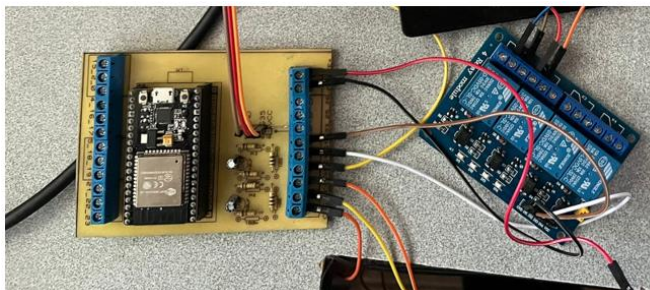
*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

***Construcción de la placa del sistema IOT***

Luego del diseño de la PCB necesaria para el sistema IOT, se realizó la impresión del circuito, quema en baquelita y a continuación se procedió a realizar la perforación para soldar los elementos necesarios el resultado se puede observar en la figura 173.

**Figura 173**

*Placa IOT*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

### ***Ensamble final***

Una vez adquirido y comprado todos los elementos se procede al realizar el montaje final el cual consta del montaje del puente sobre los soporte del mismo, posterior se realizó el montaje del eje Z que se puede verificar en la figura 174, a continuación se realizó e montaje de motor del eje X y los dos motores del eje Y cómo se puede observar en la figura 175, lo siguiente fue la colocación de los sensores en puntos estratégicos de la máquina para cada uno de los ejes y el cabezal flotante como se puede observar en la figuras 176, además se colocó ventiladores en los motores para evitar sobrecalentamientos y dos torres de luces para seguridad como se puede ver en la figura 177, finalmente se colocó el portaantorcha y antorcha sobre el eje Z que se observa en la figura 178, a su vez se realizó las conexiones eléctricas en la mesa CNC que corresponden a las señales de los motores y sensores que llegan del gabinete de control por medio de tomas rápidas y que se distribuyen por medio de borneras se verifica en la figura 179 y por último se colocó las placas que corresponden a la rejilla donde se asentará las placas para realizar los cortes que se encuentra en la figura 180, en la figura 190 se tiene el resultado final de la construcción.

**Figura 174**

*Montaje del puente y del eje Z*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

**Figura 175**

*Montaje de los motores*

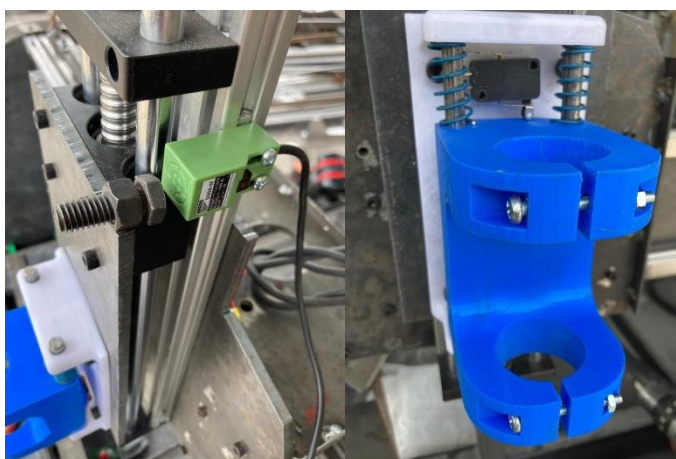
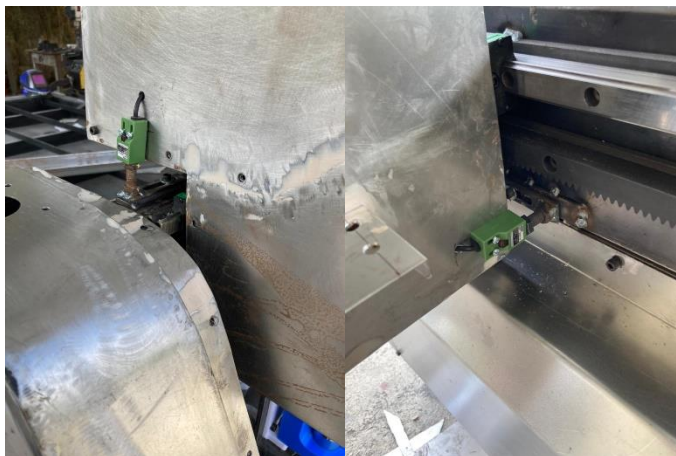


*Nota.* Imagen tomada de la construcción, el motor de izquierda corresponde al del eje X y el de la derecha a uno del eje Y.



**Figura 176**

*Colocación de sensores*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción, el primer sensor corresponde al del eje X el siguiente al del eje Y, el primero de la parte inferior corresponde al del eje Z y finalmente se tiene el que es para el cabezal flotante.

**Figura 177**

*Ventiladores y torre de luces*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

**Figura 178**

*Colocación de la antorcha para corte*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

**Figura 179**

*Conexiones eléctricas en la mesa CNC*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

**Figura 180**

*Montaje de las rejillas*



*Nota.* Imagen tomada de la construcción.



**Figura 181***Ensamble final*

*Nota.* Imagen tomada de la construcción.

### **Pruebas y análisis de resultados del sistema CNC**

Para determinar la fiabilidad y el correcto funcionamiento de la mesa de control numérico computarizado (CNC) para el corte por arco de plasma de planchas de acero al carbono se realizará un conjunto de pruebas que servirán para verificar la precisión, exactitud, repetibilidad y confiabilidad. Dichas pruebas consisten en realizar cortes de figuras geométricas básicas como lo son los cuadrados y círculos, para la realización de las pruebas se

considerarán distintos escenarios donde se ponga a prueba todo el funcionamiento de la máquina.

Antes de realizar cualquier prueba y respectivo análisis de resultados, se debe probar y establecer los parámetros de corte necesarios para las características de nuestra máquina lo cual se parte de una guía de la marca (Hypertherm, 2016) que menciona algunos consejos para el corte por plasma donde se toma la tabla 46 como punto de partida para establecer nuestros propios parámetros.

**Tabla 46**

*Recomendación de parámetros de corte dependiendo del espesor de placa*

<b>Espesor del material</b>	<b>Altura de la antorcha</b>	<b>Inicio de la pieza</b>	<b>Velocidad de corte</b>	<b>Tensión</b>
mm	mm	mm	mm/min	V
3			5200	125
4		3,8	4250	125
6			2550	127
8			1700	129
10	1,5	4,5	1100	131
12			850	134
16		6	560	138
20		Inicio de borde	350	142
25			210	145

*Nota.* La corriente se mantiene constante en 65 A. para cualquiera de los espesores.

A partir de cortes de prueba para determinar lo más adecuado para nuestro sistema se puede establecer los siguientes parámetros los cuales se presentan en la tabla 47.

Tabla 47

Parámetros de corte dependiendo del espesor de placa

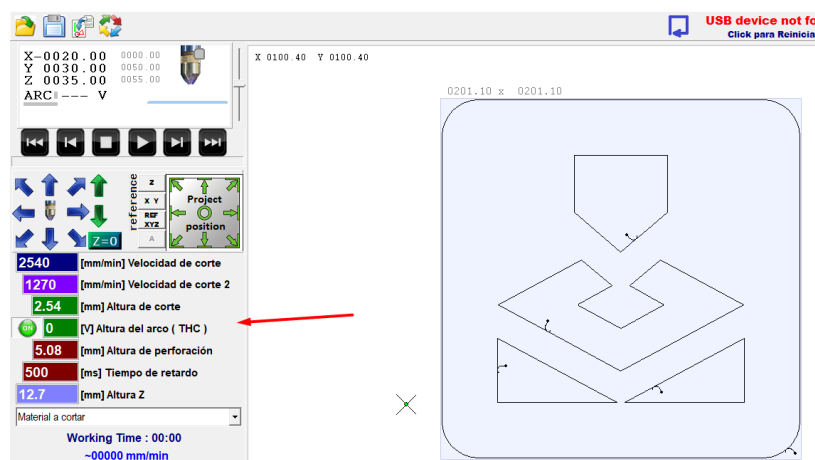
Espesor del material mm	Altura de la antorcha mm	Inicio de la pieza mm	Velocidad de corte mm/min	Tensión V
4	1,5	3,8	3500	110
6			2550	107
10		4,5	1000	107
12			750	107
25		Inicio de borde	108	120

Nota. La corriente se mantiene constante en 65 A. para cualquiera de los espesores.

Estos parámetros se colocan en el software de MyplasmCNC que se muestra en la figura 182.

Figura 182

Configuración de parámetros en el Software MYplasmCNC

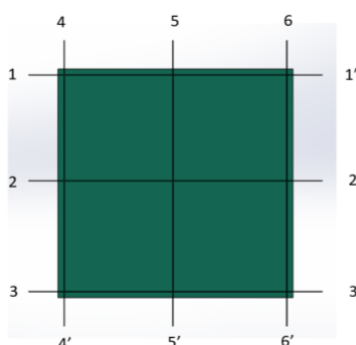


Nota. Tomado de MyplasmCNC

Para la medición de los resultados de las figuras geométricas se tomarán medidas a la geometría del corte, en el caso de los cuadrados las medidas serán tomadas como se puede observar en la figura 183 de igual forma los círculos se tomarán las medidas de acuerdo a la figura 184, se toman en distintos puntos de la pieza para ver si esta mantiene una simetría adecuada.

### Figura 183

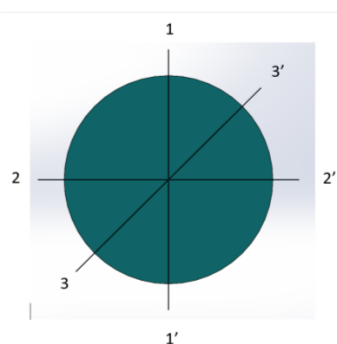
*Medición de cuadrados*



*Nota.* Tomado de (Molina, 2017)

### Figura 184

*Medición de círculos*



*Nota.* Tomado de (Molina, 2017)

### Prueba 1

Esta prueba consiste en realizar cortes de cuadrados de 50 mm en placas de espesor de 10 mm, donde la antorcha se situará en la misma posición de inicio, además el espesor se mantiene igual en cada uno de los cortes, los resultados se presentan en la tabla 48 en la cual se tomará para realizar el análisis de precisión y exactitud.

**Tabla 48**

*Datos de la prueba 1*

Corte Nro.	Dimensión [mm]	Medición [mm]					
		1	2	3	4	5	6
1	50	50.2	50.2	50.3	50.25	50.2	50.2
2		49.9	50.0	50.05	50.1	49.9	49.9
3		50.1	50.2	50.2	50.1	50.1	50.15
4		50.15	50.1	50.2	50.15	50.0	49.9

*Nota.* Datos tomados con calibrador vernier

Para este caso se analizarán todos los datos porque todas las piezas son de la misma dimensión en las próximas pruebas se analizan de forma individual cuando se varíe el tamaño, por motivos de dar un resultado de confiabilidad y repetibilidad cuando se tiene un conjunto de piezas de la misma dimensión.

### Precisión

Se calcula la media aritmética de los valores obtenidos con la fórmula 40:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (40)$$

Donde N es el número de datos.

$$\bar{X} = \frac{1}{24} (50.2 + 50.2 + 50.3 + 50.25 + 50.2 + 50.2 + 49.9 + 50.0 + 50.05 + 50.1 + 49.9 + 49.9 + 50.1 + 50.2 + 50.2 + 50.1 + 50.15 + 50.15 + 50.1 + 50.2 + 50.15 + 50.0 + 49.9)$$

$$\bar{X} = 50.106$$

A continuación, se calcula la desviación estándar con la fórmula 41.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (41)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{24-1} [(50.2 - 50.106)^2 + (50.2 - 50.106)^2 + \dots]}$$

$$\sigma = 0.118$$

Por lo tanto, la precisión que se tiene es de:

$$\text{Precisión} = \pm 0.118 \text{ [mm]}$$

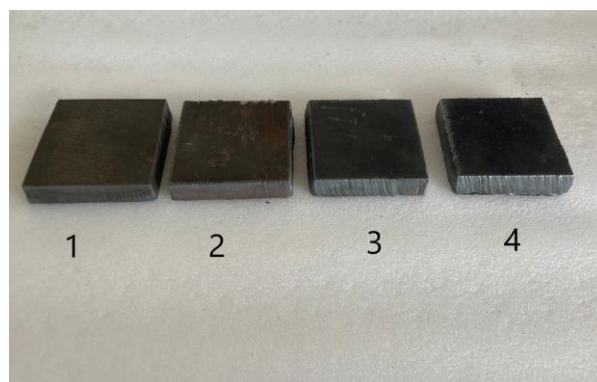
### **Exactitud**

Se toma la media aritmética y el valor deseado en el corte

$$\text{Exactitud} = 50.106 - 50.00$$

$$\text{Exactitud} = 0.106$$

Se puede deducir que el sistema es confiable ya que en los valores de precisión y exactitud son muy pequeños y las geometrías generadas en el corte no se ven afectadas en una gran magnitud como se puede observar en la figura 185 además que se garantiza una repetibilidad de los cortes cuando la antorcha se encuentra en un punto fijo tomando en cuenta que la precisión resultante es de una magnitud muy pequeña como lo es de 0.118 [mm].

**Figura 185***Resultados de la Prueba 1*

*Nota.* Cortes en el mismo espesor 10 [mm]

**Prueba 2**

Se realizará cortes de cuadrados de 50 mm en placa de espesor de 10 mm, donde la antorcha se situará en distintas posiciones (extremos de la máquina) de inicio, de igual manera se mantiene el espesor en cada uno de los cortes, los resultados se presentan en la tabla 49.

**Tabla 49***Datos de la prueba 2*

Corte Nro.	Dimensión [mm]	Medición [mm]					
		1	2	3	4	5	6
1	50	50.05	50.00	50.1	50.15	50.05	49.9
2		50.1	50.1	50.15	50.05	49.95	49.0
3		50.3	50.25	50.3	50.15	50.2	50.3
4		50.05	50.15	50.10	49.9	50.3	50.2

*Nota.* Datos tomados con calibrador vernier

De igual forma se analizarán todos los datos porque todas las piezas son de la misma dimensión.

### **Precisión**

Se calcula la media aritmética de los valores obtenidos con la fórmula 40:

$$\bar{X} = 50.075$$

Calculando la desviación estándar con la fórmula 41.

$$\sigma = 0.25$$

Por lo tanto, la precisión que se tiene es de:

$$\text{Precisión} = \pm 0.25 \text{ [mm]}$$

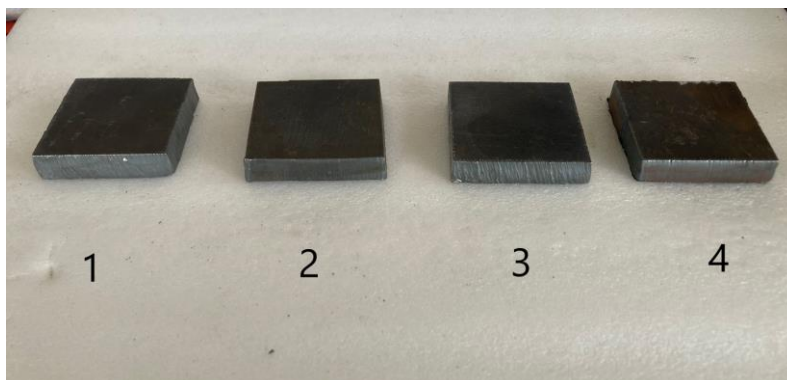
### **Exactitud**

$$\text{Exactitud} = 50.075 - 50.00$$

$$\text{Exactitud} = 0.075$$

Aunque la precisión del sistema aumenta en cierta cantidad el sistema sigue siendo confiable ya que al realizar esta prueba en distintos puntos de la máquina se garantiza una la repetibilidad de resultados ya que la variación sigue siendo un valor muy pequeño en el corte ya sea en la misma pieza o en distintas piezas con la misma dimensión en otro punto, como se puede observar la figura 186 la geometría final deseada no es alterada gracias a la precisión y exactitud que tiene la máquina.



**Figura 186***Resultados de la Prueba 2*

*Nota.* Cortes en el mismo espesor 10 [mm]

**Prueba 3**

Se realizará cortes de cuadrados y círculos de 25, 50, 75 y 100 [mm] cuyo espesor será de 10 mm, donde la antorcha se situará en la misma posición y como se puede notar en este caso se variará la dimensión final de la geometría de corte, a su vez se mantiene el espesor en cada uno de los cortes, los resultados se presentan en la tabla 50.

**Tabla 50**

*Datos de la prueba 3 en cuadrados*

Corte Nro.	Dimensión [mm]	Medición [mm]					
		1	2	3	4	5	6
1	25	25.2	25.2	25.3	25.25	25.2	25.3
2	50	50.4	50.25	50.3	50.2	50.2	50.4
3	75	74.8	74.8	74.85	75.1	75.1	75.2
4	100	100.2	100.1	99.9	100.1	100.2	99.8

*Nota.* Datos tomados con calibrador vernier

De igual forma se analizará la precisión y exactitud de cada uno de los cortes de acuerdo a la dimensión donde aplicarán la fórmula 40 y 41, con esos datos se llenará la tabla 49.

**Tabla 51**

*Resultados de precisión y exactitud en cuadrados de la prueba 3*

<b>Corte Nro.</b>	<b>Dimensión [mm]</b>	<b>Precisión</b>	<b>Exactitud</b>
<b>1</b>	25	$\pm 0.049$	0.2416
<b>2</b>	50	$\pm 0.091$	0.2916
<b>3</b>	75	$\pm 0.1781$	0.025
<b>4</b>	100	$\pm 0.164$	0.05

*Nota.* Resultados de la tabla 50

Se puede observar en la tabla 51 los valores de precisión y exactitud que corresponde a cada una de las piezas cortadas en estos valores se pueden observar que los valores son muy pequeños. En la tabla 52 se presentan las medidas tomadas para la prueba 3 en círculos.

**Tabla 52**

*Datos de la prueba 3 en círculos*

<b>Corte Nro.</b>	<b>Dimensión [mm]</b>	<b>Medición [mm]</b>		
		1	2	3
<b>1</b>	25	24.8	24.7	24.9
<b>2</b>	50	50.1	50.1	50.3
<b>3</b>	75	74.6	74.7	74.7
<b>4</b>	100	99.7	99.8	99.75

*Nota.* Datos tomados con calibrador vernier

Se analizará la precisión y exactitud de cada uno de los cortes donde aplicarán la fórmula 40 y 41, con esos datos se llenará la tabla 53.

**Tabla 53**

*Resultados de precisión y exactitud en círculos de la prueba 3*

<b>Corte Nro.</b>	<b>Dimensión [mm]</b>	<b>Precisión</b>	<b>Exactitud</b>
<b>1</b>	25	$\pm 0.1$	0.2
<b>2</b>	50	$\pm 0.11$	0.16
<b>3</b>	75	$\pm 0.057$	0.33
<b>4</b>	100	$\pm 0.05$	0.25

*Nota.* Resultados de la tabla 51

De igual manera se observa que los valores cálculos en precisión y exactitud son muy pequeños cuando se varía la geometría en el corte, en general la prueba 3 nos brinda una validación información donde la confiabilidad que se puede tener con el sistema CNC es muy alto cuando se cambia de dimensiones o incluso se cambia la geometría a cortar ya que se garantiza una excelente precisión y exactitud en resultados.

**Figura 187***Resultados de la Prueba 3*

*Nota.* Cortes en el mismo espesor 10 [mm]

***Prueba 4***

Se realizará cortes de cuadrados de 50 mm, donde la antorcha se situará en la misma posición de inicio para los 4 cortes, a su diferencia con las otras pruebas se variará el espesor de la placa en cada uno de los cortes, los resultados se presentan en la tabla 54.

**Tabla 54**

*Datos de la prueba 4*

Corte Nro.	Espesor [mm]	Medición [mm]					
		1	2	3	4	5	6
1	4	50.2	50.1	50.15	50.05	50.1	50.2
2	6	50.3	50.3	50.2	50.15	50.3	50.2
3	12	50.2	50.1	50.2	50.15	50.15	50.2
4	25	50.35	50.05	50.2	50.1	49.9	50.05

*Nota.* Datos tomados con calibrador

Se analizarán todos los datos pieza por pieza ya que son de distinto espesor y no se las compara entre ellas. Y los resultados se presentan en la tabla 55.

### Tabla 55

*Resultados de precisión y exactitud en círculos de la prueba 4*

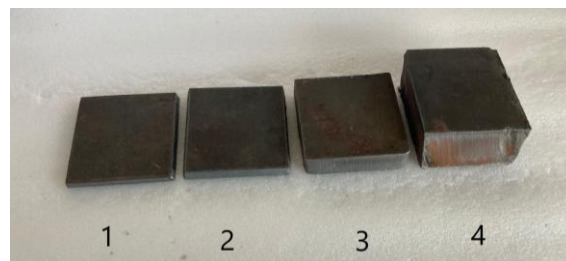
Corte Nro.	Espesor [mm]	Precisión	Exactitud
1	4	$\pm 0.06$	0.13
2	6	$\pm 0.066$	0.25
3	12	$\pm 0.04$	0.16
4	25	$\pm 0.15$	0.11

*Nota.* Resultados de la tabla 54

Verificando los resultados de precisión y exactitud se puede ver que el sistema llega a ser confiable cuando se tiene distintos espesores de placas ya que los resultados de las pruebas no afectan a la geometría y datos a analizar de precisión y exactitud son muy pequeños, además en esta prueba se verificó que la máquina es capaz de cortar placas de 25 [mm] de espesor el cual era una de las metas a lograr. En el figura 188 están los resultados de los cortes

### Figura 188

*Resultados de la Prueba 4*



*Nota.* Cortes de la misma dimensión 50 [mm]

### ***Ejecución de proyecto constructivo comercial***

Desde el primer instante en que la máquina fue entregada, la empresa promociona su nuevo servicio de corte CNC plasma en el mercado local. Es así que la empresa fue contratada para ejecutar un proyecto constructivo donde se realizaría un cerramiento residencial tipo celosía decorativa como se aprecia en la figura N

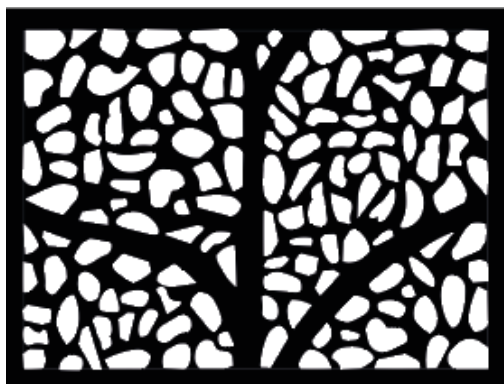
Fueron necesarias seis planchas enteras de 2,44m X 1,22m de acero ASTM A36 de 2 milímetros de espesor para realizar este trabajo.

Este proyecto puso a prueba la capacidad operativa de la máquina para realizar trabajos a gran escala. El resultado superó por mucho las expectativas por parte de la empresa Metal Imperial.

A continuación, se va a mostrar el diseño, proceso de corte, resultado de corte e instalación del cerramiento que pueden observar en las figuras 189,190,191 y 192.

#### **Figura 189**

*Diseño de cerramiento*



*Nota.* Tomado de la empresa Metal Imperial

**Figura 190**

*Proceso de corte de cerramiento*



*Nota. Tomado de la empresa Metal Imperial*

**Figura 191**

*Resultado del corte del cerramiento*



*Nota. Tomado de la empresa Metal Imperial*

**Figura 192**

*Instalación del cerramiento*



*Nota.* Tomado de la empresa Metal Imperial

Se sometió a una prueba más la cual consistía en realizar una puerta con el mismo diseño de la celosía y balcón, se puede observar el proceso de elaboración del balcón en la figura 193 y la instalación se puede observar en la figura 194, además de esto se realizó las pruebas del sistema IOT implementado en un dispositivo móvil para el monitoreo que se puede ver en la figura 195 y a su vez ver el registro guardado en la base de datos durante la hora de corte donde se tiene guardado que se tome un registro de cada 3 min y no sobrecargar de información la base de datos, se puede verificar el registro en la figura 196.



**Figura 193**

*Corte de balcón y celosía*



*Nota. Tomado de la empresa Metal Imperial*

**Figura 194**

*Instalación de puerta y balcón*



*Nota. Tomado de la empresa Metal Imperial*

## Figura 195

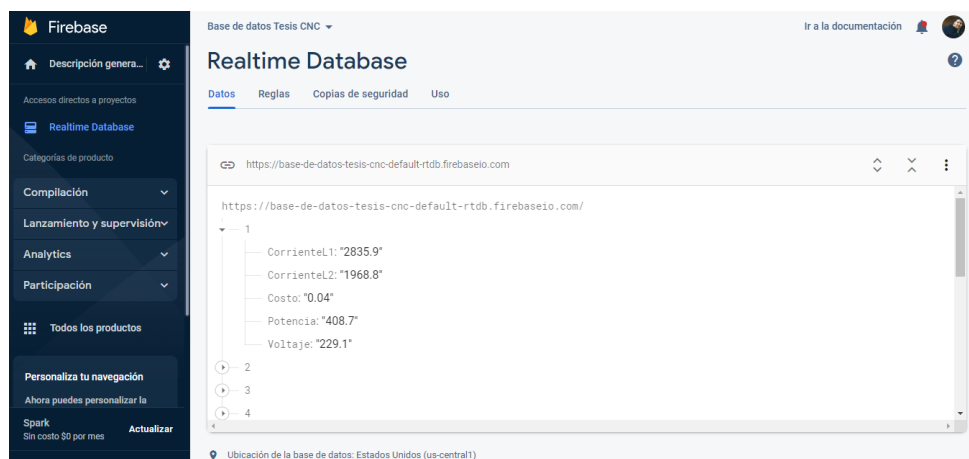
*Pruebas de conexión del sistema IoT*



*Nota.* Tomado desde un dispositivo móvil

## Figura 196

*Registro de datos en la base de datos del sistema IOT*



*Nota.* Tomado de la empresa Metal Imperial

### ***Aplicación del corte plasma***

Uno de los beneficios del sistema CNC por corte plasma es la facilidad que brinda el proceso para el corte de distintos diseños, una de estas aplicaciones es el corte de letras y logos, esto se desarrolló para poner el nombre a la mesa el cual es “IMPERIAL ENTERPRISE X” y se empleó la misma para su corte el cual se puede observar en la figura 197 y en la figura 198 se puede observar el resultado de los cortes y el proceso de pintado de las letras, finalmente en la figura 199 se observa el montaje de las letras y logos en la máquina.

#### **Figura 197**

*Proceso de corte de IMPERIAL ENTERPRISE X*



*Nota.* Tomado de la empresa Metal Imperial



**Figura 198**

*Resultados de corte de letras*



*Nota.* Tomado de la empresa Metal Imperial

**Figura 199**

*Montaje de las letras*



*Nota.* Tomado de la empresa Metal Imperial

## Capítulo V

### Análisis Económico Financiero

En este capítulo se mostrará el análisis del presupuesto necesario para la construcción e implementación de la mesa de control numérico computarizado (CNC) para el corte por arco de plasma de planchas de acero al carbono para la empresa Metal Imperial. Se presentarán tablas 56, 57, 58, 59, 60 y 61 de acuerdo al sistema que al pertenezca cada componente.

**Tabla 56**

*Presupuesto para el sistema mecánico*

Producto	Descripción	Unidad	Cant	P. Unitario	P.Total
<b>COMPRA EN EL MERCADO NACIONAL (ECUADOR)</b>					
<b>Tubo cuadrado estructural</b>	75*1,8 mm.	Unidad	1	41	41
<b>Tubo rectangular</b>	150*100*2mm	Unidad	2	81,2	162,4
<b>Tubo rectangular</b>	150*50*2mm	Unidad	1	57,9	57,9
<b>Tubo rectangular</b>	80*40*2mm	Unidad	2	45,14	90,28
<b>Tubo rectangular</b>	50*25*2mm		2	21	42
<b>Tubo cuadrado</b>	50*1,5mm	Unidad	2	21,17	42,34
<b>Angulo L</b>	40*3mm		3	13,44	40,32
<b>Platina</b>	40 mm en 3mm.	Unidad	20	8	160
<b>Tool en acero negro</b>	0,9mm.	Unidad	6	33	198
<b>Tool en acero galvanizado</b>	0,7 mm.	Unidad	3	28,25	84,75
<b>Ruedas</b>	200 mm	Unidad	4	14	56
<b>Piñón</b>	20 dientes	Unidad	3	15	45
<b>Cremallera helicoidal</b>	19*19 Módulo 1,5	Metro	8	38,5	308

<b>Carril lineal</b>	EGR15U	Metro	10,5	47	493,5
<b>Pintura</b>	Sintética	Galón	1	28,5	28,5
<b>Placa 6mm</b>	1220*600*6mm	Unidad	1	70	70
<b>Pernos Allen</b>	M5*12	Unidad	150	0,03	4,5
<b>Pernos Allen</b>	M5*20	Unidad	200	0,04	8
<b>Perno hexagonal</b>	3/8*2,5 inch	Unidad	3	0,25	0,75
<b>Perno hexagonal</b>	1/2*1inch	Unidad	14	0,5	7
<b>Perno hexagonal</b>	3/4*4inch	Unidad	6	1,5	9
<b>Barra roscada</b>	25 mm	Metro	1	20	20
<b>Tuerca</b>	25mm	Unidad	4	2	8
<b>Válvula de agua</b>	32 mm	Unidad	1	6	6
<b>Batepiedra</b>	Negro mate	Galón	2	18	36
<b>Disolvente</b>	Tipo laca	Galón	3	7,25	21,75
<b>Disco de corte INGCO</b>	4,5"	Unidad	20	0,75	15
<b>Disco de desbaste INGCO</b>	4,5"	Unidad	5	1,5	7,5
<b>Disco de pulir</b>	4,5" en grano 100	Unidad	10	1,23	12,3
<b>Alambre sólido</b>	70S-6 en 0,9mm. (kg)	Kg.	15	2,87	43,05
<b>Gas para soldadura GMAW</b>	Gas carbónico CO2	Kg.	20	1,5	30
<b>COMPRA MEDIANTE IMPORTACIÓN DESDE ESTADOS UNIDOS</b>					
<b>Bloque deslizante de carril lineal</b>	EGH15SA	Unidad	8	15	120
				<b>SUBTOTAL 1</b>	<b>\$ 2.268,84</b>

*Nota.* Estructura de la mesa y cama de agua

Tabla 57

*Presupuesto para el sistema eléctrico, electrónico y de control*

Producto	Descripción	Unidad	Cant	P.	P.To t
<b>COMPRA EN EL MERCADO NACIONAL (ECUADOR)</b>					
<b>Tubo cuadrado</b>	20*1,2mm	Unidad	2	5,83	11,6 6
<b>Tubo cuadrado</b>	15*0,9mm	Unidad	3	5	15
<b>Tool negro</b>	0,7mm.	Unidad	2	26	52
<b>Ruedas garruchas</b>	127mm	Unidad	2	3,25	6,5
<b>Cable eléctrico</b>	3x10AWG	Metro	5	3,5	17,5
<b>Cable eléctrico</b>	Calibre 12	Metro	5	0,7	3,5
<b>Cable eléctrico</b>	Gemelo 18	Metro	150	0,4	60
<b>Cable eléctrico</b>	Gemelo 22	Metro	250	0,21	52,5
<b>Cadena de arrastre</b>	Para cableado	Metro	4	28	112
<b>Canaleta anillada</b>	Negra	Metro	30	0,25	7,5
<b>Canaleta ranurada</b>	25mm	Metro	2	4,75	9,5
<b>Canaleta ranurada</b>	40mm	Metro	1	6	6
<b>Tubería reforzada PVC</b>	Gris	Metro	8	4,42	35,3 6
<b>Breaker</b>	32A	Unidad	1	6	6
<b>Pulsador emergencia</b>	Hongo	Unidad	2	2,45	4,9
<b>Portafusible</b>	10*38 32A	Unidad	2	1,77	3,54
<b>Fusible</b>	10*38 32A	Unidad	2	0,35	0,7
<b>Terminales</b>	Cal 18-16	Unidad	500	0,0187	9,35
<b>Pulsador doble</b>	22mm	Unidad	1	4,45	4,45
<b>Selector</b>	2 estados	Unidad	2	2,25	4,5
<b>Interruptor</b>	con llave	Unidad	1	2,5	2,5
<b>Ponchadora</b>	Cal 10-24	Unidad	1	31,14	31,1 4

<b>Borneras industriales</b>	Industrial	Unidad	25	0,51	12,7 5
<b>Borneras plásticas</b>	110mm	Unidad	20	0,35	7
<b>Contactor</b>	32A	Unidad	1	26,5	26,5
<b>Relé</b>	24VDC	Unidad	1	9	9
<b>Carril DING</b>	Metálico	Unidad	1	2	2
<b>Fuente de alimentación</b>	12 VDC	Unidad	1	15	15
<b>Fuente de alimentación</b>	24VDC	Unidad	1	29	29
<b>Conectores rápidos</b>	2 polos	Unidad	1	18	18
<b>Pantalla para computador</b>	Tamaño 17 pulgadas	Unidad	1	90	90
<b>Teclado para computador</b>	Conexión USB	Unidad	1	12	12
<b>Ventiladores</b>	12VDC	Unidad	7	3	21
<b>Mouse para computador</b>	Inalámbrico	Unidad	1	11	11
<b>COMPRA MEDIANTE IMPORTACIÓN DESDE ESTADOS UNIDOS</b>					
<b>Motor a pasos</b>	Nema 23 (110 mm) 3Nm	Unidad	3	40	120
<b>Driver</b>	Motor a pasos	Unidad	3	27	81
<b>Fuente de alimentación</b>	36 VDC	Unidad	2	30	60
<b>Tarjeta controladora</b>	MyPlasmCNC	Unidad	1	450	450
<b>Mesa deslizante CNC</b>	Con Nema 23 recorrido de 300 mm	Unidad	1	135	135
<b>CPU</b>	I7, RAM 16 GB, 256GB	Unidad	1	263	263
<b>Torre de señal</b>	2 luces led	Unidad	2	20	0
<b>Conectores rápidos</b>	Enchufe de aviación 4pines	Unidad	20	1	20
<b>Conectores rápidos</b>	Enchufe de aviación 3pines	Unidad	20	1	20
<b>Gamepad</b>	inalámbrico	Unidad	1	20	20



<b>Sensor final de carrera</b>	Inductivo de aproximación NPN	Unidad	5	4	20
SUBTOTAL 2					1898,35

*Nota.* Armario de panel de control

### Tabla 58

*Presupuesto para el sistema informático*

Producto	Descripción	Unidad	Cant	P.	P.Total
<b>COMPRA MEDIANTE IMPORTACIÓN DESDE ESTADOS UNIDOS</b>					
<b>Sensor</b>	Medidor de corriente	Unidad	2	13	26
<b>Sensor</b>	Medidor de tensión	Unidad	1	13	13
<b>Tarjeta ESP32</b>	Adquisición de datos	Unidad	1	12	12
SUBTOTAL 3					51

*Nota.* Para el sistema IOT

### Tabla 59

*Presupuesto para equipos*

Producto	Descripción	Unidad	Cant	P.	P.Total
<b>Everlast PowerPlasma 82i</b>	Cortadora de plasma	Unidad	1	1523	1523
<b>Antorcha PT80</b>	Antorcha CNC	Unidad	1	250	250
SUBTOTAL 4					1773

*Nota.* La empresa ya cuenta con la cortadora de plasma

**Tabla 60***Presupuesto para mano de obra*

<b>Servicio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cant</b>	<b>P.</b>	<b>P.Total</b>
<b>Soldadura</b>	Proceso GMAW	Horas	240	2,66	638,4
<b>Pintura</b>	Pintado de las partes de la máquina.	Horas	40	2,66	106,4
<b>Electrónica</b>	Instalaciones eléctricas y electrónicas	Horas	120	2,66	319,2
SUBTOTAL 5					1064

*Nota.* La empresa ya cuenta con esos servicios

**Tabla 61***Presupuesto para diseños*

<b>Servicio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cant</b>	<b>P.</b>	<b>P.Tot</b>
<b>Sistema mecánico</b>	Diseño de la mesa y el mecanismo CNC	Horas	200	2,66	532
<b>Sistema eléctrico, electrónico y de control</b>	Diseño del sistema eléctrico, electrónico y de control	Horas	240	2,66	638,4
<b>Sistema informático</b>	Diseño del sistema informático, programación.	Horas	120	2,66	319,2
SUBTOTAL 6					1489,6

*Nota.* Se clasifica el diseño por cada sistema

El presupuesto final se representa por la suma de cada uno de los subtotales el cual se presenta en la tabla 62.

**Tabla 62***Presupuesto final*

<b>SUBTOTAL Nro.</b>	<b>Valor</b>
<b>1</b>	2268,84
<b>2</b>	1898,35
<b>3</b>	51
<b>4</b>	1773
<b>5</b>	1064
<b>6</b>	1489,6
<b>Total</b>	<b>8544,79</b>

*Nota.* Todo el presupuesto fue cubierto por la empresa

## Capítulo VI

### Conclusiones y Trabajos Futuros

#### Conclusiones

La máquina se diseñó en base a tres ejes: longitudinal (Y) con una carrera de 3050 milímetros, transversal (X) con una carrera de 1550 milímetros y vertical (Z) con una carrera de 280 milímetros, lo que permite montar sobre la mesa planchas de acero de medidas estándares de 1500x3000 milímetros y planchas comerciales de 1220x2440 milímetros de un espesor máximo de 25 milímetros. Además, la gran apertura del eje vertical permite realizar cortes sobre perfiles estructurales de hasta 250 milímetros de altura.

El diseño mecánico de todos los componentes de la máquina se realizó basado en una tecnología modular, de tal forma que todas las partes son empernadas y desmontables para ser reemplazadas fácilmente cuando se lo requiera. Aplicar este criterio en la construcción de la máquina facilitó su ensamblaje ya que la mayoría de piezas eran fácilmente manipulables, pequeñas y livianas.

El programa de computador MyplasmCNC es el software, que, mediante su tarjeta electrónica, controla la máquina de corte por plasma. Es un entorno fácil de usar, lo que permite a personas sin conocimientos avanzados de programación operar el sistema con la mayor seguridad y comodidad posible. Este software, además, permite la conexión inalámbrica con un joystick o gamepad para controlar los movimientos de la máquina a distancia como si se tratara de un control remoto. Esta aplicación resulta de gran ayuda para poder ubicar la antorcha en cualquier punto deseado en la mesa de trabajo mientras el operador se desplaza alrededor de la máquina. El sistema permite la realización de cortes de forma manual en dirección longitudinal, transversal y diagonal, la implementación de gamepad facilita esta tarea.

La cama de agua implementada en la máquina inhibe en su totalidad la presencia de humo producto del corte por arco de plasma evitando así la contaminación del ambiente y manteniendo la limpieza de la máquina. Además, el nivel de la cama de agua al estar un centímetro por debajo de la pieza de trabajo evita que la misma sufra deformaciones indeseadas por la exposición al calor como el pandeo o torcedura de la plancha; se pudo verificar que la cama de agua es un excelente refrigerante ya que las planchas cortadas en todo momento se mantuvieron a temperatura ambiente durante y después del corte.

La máquina permite el corte de figuras de geometría compleja, por lo cual, la empresa Metal Imperial, desde el primer día en que fue entregada la máquina, ha logrado ofrecer un nuevo servicio al mercado local, el servicio de corte CNC plasma. Siendo sus primeros trabajos, contratos o proyectos la realización de un cerramiento, balcón y puerta con diseño personalizado tipo celosía. Esto evidencia claramente que la máquina construida satisface, a plenitud, las necesidades y expectativas de la empresa auspiciante y desde el inicio de su entrega comienza el retorno de la inversión.

Se diseñó el sistema de transmisión de los ejes X, Y e Y auxiliar con cremalleras y piñones helicoidales a motivo que estos brindan un menor ruido al momento de su funcionamiento y a su vez reducen la vibración que se puede generar en el sistema para así lograr una mayor precisión y exactitud en los cortes.

Se diseñó y construyó de una mesa de control numérico computarizado (CNC) para el corte por arco de plasma de planchas de acero al carbono donde la precisión de todo el sistema se encuentra en un valor de 0.109 mm y a su vez la exactitud del sistema tiene un valor de 0.17 mm, lo cual permite establecer que el sistema brinda una gran confiabilidad para cortes en cualquier geometría.

Se realizó distintas pruebas donde se sometió a la mesa de control numérico computarizado (CNC) para el corte por arco de plasma de planchas de acero al carbono a distintas situaciones como lo son distintas geometrías, distintos espesores, distintas dimensiones y distintas posiciones de colocación de las placas, no tuvo problemas en funcionar a toda su capacidad donde incluso se verificó que se cumpla uno de los alcances de la empresa el cual era cortes en placas de 25 mm y no presentó ningún inconveniente, a su vez en cada uno de los cortes realizados observó una calidad de acabado superficial muy alto.

Se implementó el sistema IoT para el monitoreo de variables, el cual consta de la medición de tensión y corriente, lo cual en cualquier dispositivo móvil con sistema operativo Android que tenga instalado nuestra aplicación podrá observar en tiempo real el costo de corte, la corriente que consume la mesa CNC y el consumo eléctrico en Wh.

Se evaluó con el monitoreo de la variables en el sistema CNC que realizar este proceso de manufactura no es muy elevado en costos ya que en una hora de trabajo aproximadamente el costo eléctrico no supera un dólar, lo cual es beneficioso para la empresa y permite ser más competitivos con otras que ofrecen el mismo servicio.

## Trabajo Futuro

Una vez concluido el proyecto de tesis se proponen algunas ideas que surgieron durante el desarrollo del proyecto

Implementar el cuarto eje o eje rotativo para realizar cortes en tuberías cuadradas, rectangulares y redondas con el fin de diversificar los servicios de Metal Imperial ya que en la localidad ninguna otra empresa dispone de dicho servicio. El software MyplasmCNC permite la implementación del eje rotativo y la máquina ya dispone de las conexiones eléctricas necesarias para dicho eje.

Implementar un sensor de anticolidión de la antorcha para evitar daños en la misma cuando ésta impacte con algún objeto durante su trayectoria a altas velocidades. La máquina dispone ya de las conexiones eléctricas para esta implementación.

Implementar motorreductores en los motores del eje Y y eje X para evitar la posible pérdida de pasos durante los cambios bruscos de dirección o sentido. Se recomienda usar motorreductores planetarios de relación 5:1.

Implementar un monitoreo de vigilancia por medio de cámaras y a su vez un modo de control de encendido y apagado de la mesa CNC por medio de la tecnología IoT.

Cambiar de base de datos a una privada que permita un mejor manejo con los datos en la plataforma ya que FireBase es una gran herramienta gratuita que permite almacenar la información y es muy adecuada, pero es muy restringida en el manejo de datos por lo cual es necesario emplear otros programas.

## Referencias

- Aaron, D. (1975). *Diseño de Maquinas*. Continental, S.A.
- Aeromaquinados. (2022). <https://www.aeromaquinados.com/manufactura-de-metal/mesa-de-corte-plasma-cnc/>
- ASCE. (2017). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Virginia: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS.
- Birh LH. (31 de Marzo de 2020).  
[https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/DPM/DPM01/es\\_DFM\\_DPM01\\_Contenidos/website\\_48\\_husillos.html#](https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/DPM/DPM01/es_DFM_DPM01_Contenidos/website_48_husillos.html#)
- Blog SEAS. (6 de Agosto de 2019). [https://www.seas.es/blog/disenio\\_mecanico/el-sistema-pinon-cremallera/](https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/el-sistema-pinon-cremallera/)
- Budynas, R. G. (2018). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Cary, H. (1992). *Manual de Soldadura Moderna*. Ciudad de México: Prentice-Hall Hispaamericana S.A.
- Cimech3D. (2022). <https://www.cimech3d.cl/producto/sensor-inductivo-lj12a3-4-z-bx-deteccion-4mm/>
- CMAA. (2000). *CMAA Specification #70*. Crane Manufacturers Association of America, Inc.
- Collins, D. (24 de Julio de 2015). *Linear Motion Tips*. <https://www.linearmotiontips.com/round-shaft-or-profiled-rail-how-to-choose/>
- Cortadoras plasma. (2021). <https://cortadorasdeplasma.online/cortadoras-de-plasma-manual/>





- Hypertherm*. (2022). <https://www.hypertherm.com/es/hypertherm/powermax/powermax85/>
- KOOM. (2019). <http://www.mecapedia.uji.es/catalogos/engranaje/spitkoom.1.pdf>
- Longs Motor. (2018). <https://www.longs-motor.com/stepper-motor-driver-dm542a-2.html>
- Maji, K. (2018). *Cortadora láser CNC*. Ibarra: UTN.
- Mendieta, T. P. (2019). La Capacidad del IOT de Transformar el Futuro. *AVENIR*, 15-18.
- Molina, S. (2017). *CORTADORA POR PLASMA DE TRES EJES*. ESPE.
- Naranjo, A. (2017). *Control numérico computarizado aplicado a la automatización de una cortadora a plasma*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Norton, R. (2011). *Diseño de máquinas. Un enfoque integrado*. México: Pearson Educación.
- NVEM. (2021). <https://www.nvcnc.net/nvem.html>
- OTECE. (2022). <https://www.otece.com.ec/producto/microswitch-final-de-carrera-roldana-metalica-frontal-strom/>
- Proma. (2018). <https://www.proma-elektronika.com/download/MyPlasm/MyPlasmCNCen.pdf>
- Proma Elektronika*. (2022). [https://www.proma-elektronika.com/download/MyPlasm/MyPlasmCNC\\_montage\\_EN.pdf](https://www.proma-elektronika.com/download/MyPlasm/MyPlasmCNC_montage_EN.pdf)
- Ruíz, L. (2006). *El control numérico computarizado en el desarrollo industrial*. BOON, GK.
- Ruíz, P. (2011). *Diseño de una maquina CNC genérica*. Tuxtla: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ.
- Sensores.top*. (19 de Noviembre de 2019). <https://sensores.top/sensor-capacitivo/>

- Solaris. (2017). <https://www.solaris-shop.com/content/American%20Wire%20Gauge%20Conductor%20Size%20Table.pdf>
- STEPPERONLINE. (2019). <https://www.omc-stepperonline.com/digital-stepper-driver-1-0-4-2a-20-50vdc-for-nema-17-23-24-stepper-motor-dm542t>
- SystéAl. (2022). <https://www.systeal.com/en/electronics/1387-nema-23-stepper-motor-126-nm.html>
- Tecnopower. (2020). *Tecnopower*. <https://www.tecnopower.es/sites/default/files/tecnopower-calculo-seleccion-cremallera-precision.pdf>
- Tettsa. (2020). <https://tienda.tettsa.gt/producto/motor-stepper-nema-23-114mm/>
- Valencia, N. (11 de Junio de 2015). *Drouiz*. <https://www.drouiz.com/blog/2015/06/11/maquinas-herramientas-cnc-y-fabricacion-digital/>
- Williams, A. (2011). *Steel Structures Desing*. New York: The McGraw-Hill Companies.

## Apéndices